



# Cambio climático: una visión desde México

Julia Martínez y  
Adrián Fernández Bremauntz  
(compiladores)

con la colaboración de Patricia Osnaya

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales  
Instituto Nacional de Ecología



# Cambio climático: una visión desde México

Julia Martínez y Adrián Fernández  
*Coordinadores*

con la colaboración de Patricia Osnaya



Primera edición: noviembre de 2004

D.R. © Instituto Nacional de Ecología.  
Secretaría del Medio Ambiente  
y Recursos Naturales

Periférico sur 5000  
Col. Insurgentes Cuicuilco,  
C.P. 04530, Delegación Coyoacán, México D.F.  
[www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)

CORRECCIÓN: Cynthia Godoy Hernández  
FORMACIÓN Y TIPOGRAFÍA: Luis Alberto Martínez López  
DISEÑO DE PORTADA: Alvaro Figueroa  
FOTO DE PORTADA: Claudio Contreras Koob

**ISBN 968-817-704-0**

*Impreso y hecho en México*

Las opiniones expresadas en los textos son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente la opinión de los compiladores o de las instituciones titulares de los derechos de autor.

# Índice

PRÓLOGO .....	11
SECCIÓN I: LAS BASES CIENTÍFICAS .....	15
El cambio climático global: comprender el problema <i>Víctor O. Magaña Rueda</i> .....	17
¿Qué es el efecto invernadero? <i>René Garduño</i> .....	29
Clima oceánico: los mares mexicanos ante el cambio climático global <i>Artemio Gallegos García</i> .....	41
Investigaciones de los glaciares y del hielo de los polos <i>Lorenzo Vázquez Selem</i> .....	53
Evidencia de cambio climático: cambios en el paisaje <i>Ma. Socorro Lozano García</i> .....	65
El ciclo global del carbono <i>Víctor J. Jaramillo</i> .....	77
Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático <i>Dick Homero Cuatecontzi y Jorge Gasca</i> .....	87
Registro histórico de los principales países emisores <i>José Luis Arvizu Fernández</i> .....	99
Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México <i>Luis Gerardo Ruiz Suárez y Xóchitl Cruz Núñez</i> .....	109

<b>SECCIÓN II: REACCIÓN DEL MUNDO ANTE EL PROBLEMA:</b>	
LA COLABORACIÓN INTERNACIONAL .....	123
Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, PICC	
<i>Montserrat Avalos Gómez</i> .....	125
La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	
<i>Edmundo de Alba</i> .....	143
México y la participación de países en desarrollo en el régimen climático	
<i>Fernando Tudela</i> .....	155
Los mecanismos flexibles del Protocolo de Kioto de la Convención	
Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	
<i>Aquileo Guzmán, Israel Laguna y Julia Martínez</i> .....	177
Lucha contra la desertificación y lucha contra el calentamiento global	
<i>Gonzalo Chapela</i> .....	189
<b>SECCIÓN III: IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN .....</b>	<b>201</b>
Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio	
climático en México	
<i>Víctor Magaña, Juan Matías Méndez, Rubén Morales y Cecilia Millán</i> .....	203
Vulnerabilidad en el recurso agua de las zonas hidrológicas de México	
ante el Cambio Climático Global	
<i>Víctor M. Mendoza, Elba E. Villanueva y Laura E. Maderey</i> .....	215
Impactos del cambio climático en la agricultura en México	
<i>Cecilia Conde, Rosa Ma. Ferrer, Carlos Gay y Raquel Araujo</i> .....	227
Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales	
<i>Lourdes Villers e Irma Trejo</i> .....	239
Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la	
biodiversidad de México	
<i>Laura Arriaga y Leticia Gómez</i> .....	255
Los asentamientos humanos y el cambio climático global	
<i>Adrián Guillermo Aguilar</i> .....	267
La variabilidad climática en los registros instrumentales de México	
<i>Ernesto Jáuregui</i> .....	279
Evaluación de la vulnerabilidad en zonas industriales	
<i>María Teresa Sánchez-Salazar</i> .....	291

Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación <i>Oralia Oropeza Orozco</i> .....	303
Sequía meteorológica <i>María Engracia Hernández Cerda y Gonzalo Valdez Madero</i> .....	315
El sector pesquero <i>Daniel Lluch-Cota</i> .....	327
El cambio climático global y la economía mexicana <i>Luis Miguel Galindo</i> .....	337
<b>SECCIÓN VI: MITIGACIÓN</b> .....	<b>353</b>
Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional <i>Omar Masera y Claudia Sheinbaum</i> .....	355
Opciones de captura de carbono en el sector forestal <i>Bernardus H. J. de Jong, Omar Masera y Tomás Hernández-Tejeda</i> .....	369
Proyecto Scolel Té: la participación de comunidades rurales en el mercado internacional de venta de carbono <i>Bernardus H. J. de Jong, Richard Tipper y Lorena Soto-Pinto</i> .....	381
Escenarios de emisiones futuras en el sistema energético mexicano <i>Juan Quintanilla Martínez</i> .....	391
Opciones para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte <i>Dick H. Cuatecontzi, Jorge Gasca, Uriel González y Francisco Guzmán L-F</i> .....	411
ILUMEX: desarrollo y lecciones del primer proyecto mayor de ahorro de energía en México <i>Odón de Buen Rodríguez</i> .....	423
Metodologías para calcular el coeficiente de emisión adecuado para determinar las reducciones de gases efecto invernadero atribuibles a proyectos de eficiencia energética y energías renovables <i>Oscar Vázquez Martínez y Beatriz Del Valle Cárdenas</i> .....	435
Mercado interno de permisos de emisiones de carbono. Estudio de caso, PEMEX <i>Salvador Gómez Avila</i> .....	447
Modelación del impacto económico de la mitigación de emisiones de gases efecto invernadero <i>María Eugenia Ibararán</i> .....	455

Potencial de participación del sector privado mexicano en el mecanismo de desarrollo limpio <i>Gabriel Quadri de la Torre</i> .....	467
--	-----

<b>SECCIÓN V: LA INFORMACIÓN, FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS Y LA SENSIBILIZACIÓN SOCIAL</b> .....	471
<b>Las comunicaciones nacionales de cambio climático</b> <i>Adrián Fernández y Julia Martínez</i> .....	473
<b>El papel de las organizaciones de la sociedad civil ante el cambio climático global</b> <i>Martha Delgado Peralta</i> .....	491
<b>La sensibilización y formación de recursos humanos como estrategia de apoyo para revertir el cambio climático</b> <i>Tiahoga Ruge y Concepción Velazco</i> .....	513
<b>El informador y el Cambio Climático</b> <i>Alejandro Ramos</i> .....	521



# Prólogo

EL CAMBIO CLIMÁTICO ES un problema con características únicas, ya que es de naturaleza global, sus impactos mayores serán en el largo plazo e involucra interacciones complejas entre procesos naturales (fenómenos ecológicos y climáticos) y procesos sociales, económicos y políticos a escala mundial.

Dada la importancia del tema, el Instituto Nacional de Ecología, como parte de su misión de generar y difundir información científica y técnica sobre problemas ambientales prioritarios solicitó a un grupo de especialistas de diversas disciplinas que contribuyeran a este libro aportando y compartiendo sus conocimientos y experiencias sobre los aspectos científicos, sociales, económicos e institucionales del cambio climático.

Lo anterior con el fin de tener un documento que abordara desde la teoría del cambio climático hasta la ratificación del Protocolo de Kyoto, incluyendo estudios realizados de México. En textos eclécticos y heterogéneos, los autores sitúan a nuestro país como emisor de gases de efecto invernadero en el contexto mundial; analizan la vulnerabilidad de diferentes sectores; evalúan opciones de mitigación y adaptación al cambio climático; describen negociaciones internacionales; y abordan los aspectos educacionales y de comunicación al público del tema.

Agradecemos a los autores de los capítulos su paciencia y apoyo en la revisión de diferentes versiones de los textos, tarea que por la amplitud del contenido del libro y por las saturadas agendas tanto de los escritores como de los editores se llevó casi dos años de trabajo.

El libro se presenta en un momento clave del concierto internacional de negociaciones, la Décima Reunión de la Conferencia de las Partes, que se llevará a cabo en Buenos Aires, Argentina, del 6 al 17 de diciembre del año

2004. Con la reciente ratificación del Protocolo de Kyoto por parte de Rusia, este instrumento entrará en vigor el 16 de febrero del año 2005.

Esto implica que la mayoría de los países industrializados del mundo tiene ahora el compromiso de realizar un esfuerzo vinculante multilateral en referencia al cambio climático. A medida que avancen en lograr sus compromisos, tendrán que demostrar que se trata de un reto que se puede superar.

Lo más importante es que la entrada en vigor del Protocolo de Kyoto también conllevará una nueva ronda de negociaciones que pueden producir acuerdos novedosos de espectros más amplios y durables. El texto del Protocolo contiene en su diseño muchos aspectos valiosos que conservar, especialmente el uso de mecanismos flexibles para reducir emisiones de la manera más costo-efectiva.

Sin embargo, se necesitarán nuevos enfoques para movilizar a un mayor número de países, tanto desarrollados como en desarrollo para que participen activamente contribuyendo de manera justa, equitativa y oportuna a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

El cambio climático no se considera más como un problema que compete sólo a los países desarrollados. La última década de análisis, discusiones y negociaciones nos muestra con claridad el estrecho vínculo entre cambio climático y desarrollo sustentable. Es tarea de países como México, identificar las múltiples oportunidades que representa la participación en el Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo, pero sobre todo instrumentar en el corto plazo aquellas acciones de política que simultáneamente nos brinden beneficios en la mejoría de la calidad de vida de nuestros habitantes a la vez que contribuimos reduciendo nuestras emisiones de gases de efecto invernadero.

Existen numerosas acciones para mejorar la eficiencia energética en el sector industrial, de generación de electricidad, doméstico y de transporte que permiten reducir la contaminación del aire en nuestras grandes ciudades a la vez que mitigamos el cambio climático.

La calidad y amplitud con que los especialistas mexicanos abordan cada uno de los temas del libro es muestra clara del gran potencial humano que nuestro país tiene, tanto en el ámbito de la investigación, como en el del análisis social y político del cambio climático.

Finalmente, esperamos que este libro logre estimular a estudiosos de otras disciplinas para que se acerquen al tema, al ciudadano común para

que al comprender el fenómeno pueda contribuir a su solución, a los legisladores para que impulsen las iniciativas de ley que promuevan las energías renovables en México y a los tomadores de decisiones para que destinen los recursos institucionales y financieros necesarios para atender con seriedad y eficacia el problema.

*Adrián Fernández Bremauntz y Julia Martínez Fernández*



Sección I  
Las bases científicas



# El cambio climático global: comprender el problema

*Víctor O. Magaña Rueda\**

## INTRODUCCIÓN

EL CLIMA DEPENDE DE un gran número de factores que interactúan de manera compleja. A diferencia del concepto tradicional de clima, como el promedio de alguna variable, hoy en día se piensa en éste como un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y el continente, en diversas escalas de tiempo y espacio. Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta (concentración de gases de efecto invernadero, cambios en el uso de suelo, etc.) resultado de la actividad humana. Las formas de variabilidad del clima son muchas y, por tanto, pronosticarlo a largo plazo no es fácil. Es por ello que distinguir qué produce cambios en el clima de un año a otro, o en escalas mayores de tiempo, constituye un reto científico.

Saber qué parte de la variabilidad del clima es predecible abre la posibilidad de realizar predicciones útiles en diversas actividades socioeconómicas. Estas predicciones estacionales, por ejemplo, ya se realizan para regiones altamente afectadas por el fenómeno El Niño / Oscilación del Sur (ENOS). En ese caso, la lenta respuesta térmica del océano constituye una memoria útil para el clima. Hoy en día se sabe que la humedad en el suelo también constituye un mecanismo de memoria que puede afectar el clima. Es por ello que la deforestación o la urbanización resultan en variabilidad o cambio climático, al afectar la humedad que puede ser retenida por el suelo.

Aunque entendemos las causas astronómicas de las variaciones del tiempo y del clima, existen fluctuaciones en escalas de días a siglos, de gran interés para la sociedad, que estamos lejos de explicar. En este sentido, sabemos de ciertos factores que pueden producir cambios en el clima, aunque no de manera precisa. Tal es el caso del cambio climático del último siglo. Es por ello que no fue sino hasta 1995 que un grupo de científicos reunidos en el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC) sugirió que: “El balance de las evidencias sugiere que hay una influencia humana discernible en el clima global” (ver el capítulo *El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*, PICC, de M. Ávalos, en la sección II). El problema de pronunciarse de manera definitiva respecto al cambio climático radica en que, a diferencia de los ciclos regulares de las glaciaciones (ver el capítulo *Investigaciones de los glaciares y del hielo de los polos*, de L. Vázquez) o de las estaciones, muchas formas de variabilidad natural de muy baja frecuencia del sistema climático apenas comienzan a explicarse y no es fácil diferenciarlas del cambio climático de origen antropogénico. Las anomalías del clima experimentadas en el último siglo, o por vivirse en las próximas décadas podrían incluir alteraciones en las formas como actualmente experimentamos la variabilidad interanual o interdecadal del clima. Eventos de El Niño más frecuentes o intensos, huracanes de mayor magnitud, ondas cálidas o frías más pronunciadas son algunas de las formas como la atmósfera podría manifestar las alteraciones climáticas resultado de la actividad humana.

Los impactos de un clima anómalo o extremo en diversos sectores de la actividad humana son lo que ha llevado a la sociedad, incluyendo sus instituciones de gobierno, a interesarse en el tema del cambio climático. Las agendas de naciones desarrolladas y en desarrollo incluyen un componente dedicado al análisis de los potenciales impactos del cambio climático, de la vulnerabilidad de las regiones a condiciones extremas en el clima, así como de las potenciales medidas de adaptación ante tales cambios. Pero, para determinar acciones de respuesta global, regional o local, se debe primero comprender el problema del cambio climático, principalmente analizando los alcances y limitaciones del conocimiento científico que se tiene hasta ahora sobre el tema.

## CAMBIOS EN EL CLIMA

La Tierra absorbe radiación solar (radiación de onda corta), principalmente en la superficie, y la redistribuye por circulaciones atmosféricas y oceánicas



para intentar compensar los contrastes térmicos, principalmente del ecuador a los polos. La energía recibida es re-emitada al espacio (radiación de onda larga) para mantener en el largo plazo, un balance entre energía recibida y re-emitada. Cualquier proceso que altere tal balance, ya sea por cambios en la radiación recibida o re-emitada, o en su distribución en la Tierra, se reflejará como cambios en el clima (ver el capítulo *¿Qué es el efecto invernadero?* de R. Garduño, en esta sección). A tales cambios en la disponibilidad de energía radiativa se les conoce como forzamientos radiativos. Cuando éstos son positivos tienden a calentar la superficie de la Tierra. Un enfriamiento se producirá si el forzamiento radiativo es negativo.

Los aumentos en la concentración de los llamados gases de efecto invernadero reducen la eficiencia con la cual la Tierra re-emite la energía recibida al espacio. Parte de la radiación saliente de onda larga emitida por la Tierra al espacio es re-emitada a la superficie por la presencia de esos gases. Así, la temperatura de superficie se elevará para emitir más energía, y aunque parte de ella quede “atrapada”, suficiente energía saldrá al espacio para alcanzar el balance radiativo que mantiene relativamente estable el clima. Es claro, si las concentraciones de gases de efecto invernadero continúan aumentando, la temperatura de superficie del planeta mantendrá una tendencia positiva. Aun si las emisiones de estos gases se estabilizan, los efectos del calentamiento perdurarán mucho tiempo, pues los gases de este tipo tienden a permanecer por muchos años en la atmósfera (ver el capítulo *Las gases regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de D. H. Cuatecontzi y Jorge Gasca, en esta sección).

Por otro lado, los aerosoles de origen antropogénico emitidos a la troposfera, como aquellos producidos por las industrias o por la quema de bosques, pueden reflejar radiación solar, constituyéndose en un forzante radiativo negativo que tiende a enfriar el sistema climático. Dado que algunos aerosoles como el hollín de las fábricas, absorben radiación solar, su presencia puede resultar también en proclive al calentamiento. Sin embargo, la presencia de los aerosoles puede alterar la cantidad y reflectividad de las nubes, por lo que en promedio se estima que su efecto final es el de enfriar el sistema climático. Los volcanes también pueden aportar grandes cantidades de material sulfúrico en la estratosfera (ej. dióxido de sulfuro) que resultan en aerosoles. Su efecto es el de enfriar la atmósfera baja por periodos de unos cuantos años.

Cuando se cambia el forzante radiativo, naturalmente o por actividad humana, el sistema climático responde en varias escalas de espacio y tiempo. Cambios significativos en el balance radiativo de la Tierra, incluyendo aquellos debidos al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero, alterarán la circulación del mar y la atmósfera y, consecuentemente, el ciclo hidrológico, lo que se manifestará como cambios en la precipitación y la temperatura en superficie. Las alteraciones en el clima por efecto de la actividad humana afectarán las variaciones naturales de éste en un amplio rango de escalas. Así, la variabilidad natural del sistema climático, como la asociada al ENOS, podría verse afectada por la influencia humana. La forma como tales impactos del cambio climático de origen antropogénico se manifestarán en los procesos relacionados con la variabilidad natural del clima es aún materia de estudio.

## ESCENARIOS FUTUROS DEL CLIMA

Desde mediados del siglo xx, los modelos numéricos para simular procesos de circulación atmosférica han mejorado notablemente. La simulación y el pronóstico del clima han sido objetivos primordiales de los científicos atmosféricos. A manera de laboratorio, los modelos de circulación general de la atmósfera se han usado para estudiar la variabilidad y el cambio climático (ver la sección III, *Impactos, vulnerabilidad y adaptación*). En ambos casos, una vez conocido el forzante del proceso climático por simular, se utiliza un modelo para comparar la simulación numérica con el forzante impuesto, con aquella generada por el modelo pero sin forzantes. Por ejemplo, para analizar los impactos de El Niño en el clima del planeta, se usa un modelo de circulación de la atmósfera en el que se impone una anomalía en la temperatura de superficie del mar en el Pacífico ecuatorial del este. Las alteraciones (anomalías climáticas) que dicho forzante produzca se obtienen comparando con aquella simulación en la que no se impone el forzante. Ésta ha sido la filosofía seguida en el uso de modelos del clima para determinar los impactos de los forzantes. Evidentemente, para que un modelo climático sea considerado útil para usarse como herramienta de análisis debe poder simular, al menos aproximadamente, el ciclo anual promedio del clima.

En el estudio del cambio climático se realiza un manejo de los forzantes radiativos, efectuándose simulaciones numéricas en donde se aumentan gradualmente las concentraciones de gases de efecto invernadero. Depen-

diendo de qué tipo de aumento en estos gases se proponga, será la respuesta en el clima que se obtenga. La mayoría de los modelos del clima sugieren que a mayor concentración de gases de efecto invernadero, mayor la magnitud de la anomalía climática. No existe un experimento climático único para analizar el cambio climático, pues depende de cómo se piense que serán las emisiones. Una buena descripción de qué son los modelos de circulación del clima aparece en el Tercer Reporte de Evaluación (TAR, por sus siglas en inglés) del Grupo I del IPCC. En ella se analizan los elementos de los modelos que, por su complejidad y también por su importancia en el clima, requieren consideración especial. Entre éstos se tiene al vapor de agua, las nubes, el océano, la estratosfera, la criosfera, los continentes o el ciclo del carbono. Más adelante se analiza el caso del vapor de agua.

Para que las predicciones de algún modelo sean consideradas con cuidado, éstas deben incluir algunas características observadas hasta ahora del calentamiento global. Idealmente se esperaría que un modelo describiera que:

- 1) La temperatura de superficie ha aumentado y continuará aumentando, más rápidamente sobre el continente que sobre los océanos.
- 2) La troposfera baja también se ha estado calentando, aunque a un menor ritmo que la superficie.
- 3) La amplitud del ciclo diurno de la temperatura ha disminuido al aumentar las temperaturas mínimas por el aumento en la nubosidad y la precipitación.
- 4) Los glaciares se han retraído, y la cubierta de hielo y nieve disminuido.
- 5) El calor en el océano ha aumentado.
- 6) Hay más vapor de agua en la atmósfera que resulta en más precipitación, como en el Hemisferio Norte.
- 7) Algunas partes del Hemisferio Sur no parecen estar calentándose.
- 8) No hay tendencias en la extensión de la cubierta de hielo y nieve en la Antártica.
- 9) Las variaciones observadas en la intensidad y frecuencia de los ciclones extratropicales no muestran una tendencia significativa.

La mayoría de los modelos simulan adecuadamente sólo algunos de los puntos antes mencionados, pero se puede pensar que las proyecciones que se obtienen de ellos deben tomarse seriamente, principalmente las variaciones de muy baja frecuencia y las tendencias del clima pronosticadas (figura

1). Se puede concluir que se dispone de simulaciones de cambio climático confiables, al menos en escalas espaciales subcontinentales y a escalas temporales de una estación a décadas. Sin embargo, aún es difícil obtener conclusiones sobre el cambio climático en escalas espaciales regionales o locales. Es por ello que se han propuesto estrategias para inferir cómo impactará el cambio climático a un país en particular, tal es el caso de México (ver la sección III, *Impactos, vulnerabilidad y adaptación*).

Hay algunas consideraciones adicionales que se deben hacer antes de concluir cómo afecta el cambio climático a México y al resto del mundo. Por ejemplo, de ser mayor el calentamiento en latitudes altas que en los trópicos, como lo pronostican los modelos y lo confirman las observaciones, no serían necesarias tantas o tan intensas ondas de latitudes medias para transportar calor a latitudes altas. La disminución de la actividad de las ondas afectaría, entre muchas otras cosas, la actividad de nortes en invierno. Sin embargo, aún no existen evidencias observacionales o en los modelos que indiquen que esto esté sucediendo. De manera similar, el cambio climático pronostica un aumento en la intensidad y frecuencia de los huracanes. Aunque en el Pacífico nororiental esto parece suceder, no es el caso en el Atlántico. Desafortunadamente, no se puede obtener ninguna conclusión sobre este punto a partir de

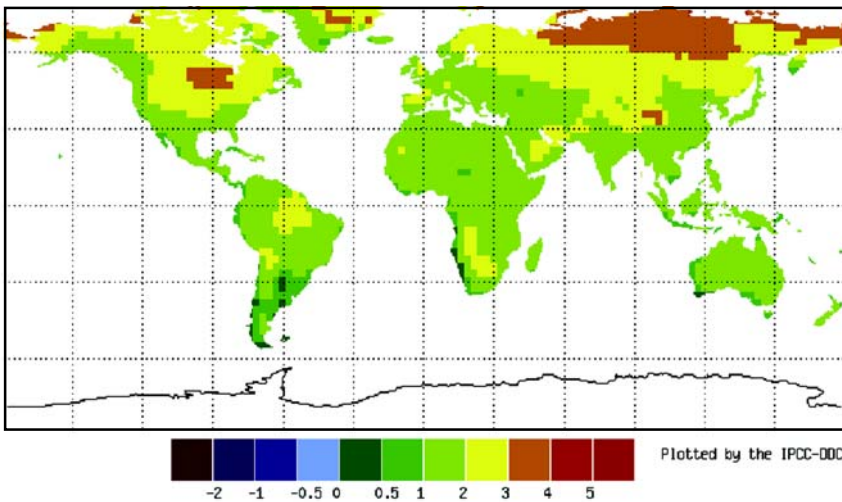


Figura 1. Escenario de los cambios en la temperatura media anual continental de la década de 2020 en comparación con el periodo 1961-1990, de acuerdo con el modelo del Hadley Center.

los modelos, ya que no son capaces de simular ciclones tropicales, esenciales para describir el clima mexicano. En pocas palabras, hay procesos que se espera se modifiquen basados en principios físicos fundamentales, que, sin embargo, ni los modelos ni las observaciones aún delatan.

## LA IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

El gas de efecto invernadero más importante en la Tierra es el vapor de agua. Aun cuando los diferentes estados del agua pueden afectar el clima de diversas maneras, los humanos no pueden, hasta el momento, controlar su distribución o cambios de fase en la atmósfera de manera consciente. El vapor de agua calienta la atmósfera actuando como gas de efecto invernadero, y en el siglo pasado mostró una tendencia positiva (figura 2). Sin embargo, el hielo y el agua líquida tienden a enfriarla, pues reflejan radiación solar.

Mediante modelos simples de transferencia de radiación, como el propuesto por P. J. Webster (1994), se encuentra que los parámetros clave que determinan la temperatura de superficie de equilibrio en el planeta son la *emisividad* (grado al cual la atmósfera emite radiación infrarroja) y el *albedo* de la superficie terrestre (relación entre la radiación solar recibida y la radiación solar reflejada). La emisividad depende de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y sería cero si no existiera ésta. En general, la temperatura de superficie tiende a aumentar cuando aumenta la emisividad (ej. mayor concentración de gases de efecto invernadero). Sin embargo, la temperatura de superficie tiende a disminuir con un mayor

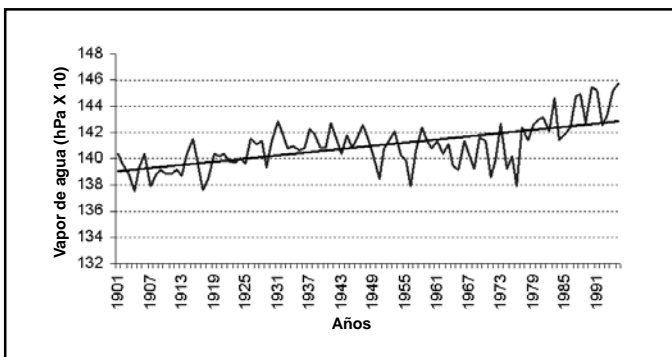


Figura 2. Presión de vapor de agua media anual (y tendencia) promediada en el área de 60N a 60S y 180E a 180W.

albedo (ej. aumento en la cubierta nubosa o en la cubierta de hielo y nieve). Por lo tanto, para que la temperatura de superficie permanezca por arriba del punto de congelación, el albedo debe ser relativamente bajo y la emisividad (en infrarrojo) relativamente alta. Con valores estimados de emisividad y albedo para la Tierra se obtiene una temperatura global promedio para la superficie de aproximadamente 285°K, que es cercana a la observada. Pequeños cambios en la emisividad o el albedo pueden resultar en cambios sustanciales en la temperatura de superficie. Éste es el caso cuando aumenta la concentración de gases de efecto invernadero y el resultado del calentamiento global observado.

El problema del calentamiento global se torna complicado porque el albedo y la emisividad están relacionados, ya que ambos aumentan al aumentar el espesor de las nubes. Como el albedo y la emisividad tienen efectos opuestos en la temperatura de superficie, tienden a compensarse. El signo y magnitud de la compensación resultan clave para entender el problema del calentamiento global, pues al cambiar el CO<sub>2</sub> o el metano, cambia la emisividad y eventualmente el albedo por los impactos del calentamiento en el ciclo hidrológico. Al calentarse el planeta se espera un aumento en la evaporación aumentando el vapor de agua, el cual incrementa la emisividad. Sin embargo, al formarse más nubes aumenta el albedo. La respuesta final de la temperatura de superficie al aumento del CO<sub>2</sub> dependerá de la respuesta de la emisividad y el albedo del sistema. Por ejemplo, si el albedo permaneciera constante y la emisividad aumentara se produciría un fuerte calentamiento del sistema. Si, como parece ocurrir en la realidad, el albedo aumenta pero a una razón menor a la de la emisividad, el calentamiento es menor. Finalmente, si el albedo aumentara a una razón mayor a la que aumenta la emisividad, se produciría un enfriamiento. La mayoría de los modelos del clima usados para analizar el incremento en los gases de efecto invernadero pronostican un ligero calentamiento del planeta (caso intermedio). Debe recordarse, sin embargo, que tal resultado surge de parametrizaciones muy crudas de las propiedades físicas y radiativas de las nubes (emisividad) y el albedo del suelo.

En resumen, el aumento en la concentración de vapor de agua constituye un factor de retroalimentación en el clima de primordial importancia y, sin embargo, sus variaciones como resultado de un incremento en la concentración de CO<sub>2</sub>, por ejemplo, son difíciles de modelar.

## LAS EVIDENCIAS OBSERVACIONALES

Los trabajos realizados hasta finales del siglo XX dan cuenta de cambios en diferentes variables que caracterizan al clima. Hoy en día no queda duda de que la temperatura global del planeta está aumentando y de que los regímenes de lluvia están cambiando. Si bien es cierto que en escalas de tiempo de miles o millones de años las concentraciones en gases de efecto invernadero cambiaron considerablemente de manera natural, produciendo sustanciales variaciones en la temperatura, éstas se produjeron en muchos millones de años. Incluso los ciclos de las glaciaciones (salir de periodos glaciales) en el planeta requieren miles de años. Nunca como ahora, cambios drásticos en el clima se produjeron en escalas tan cortas de tiempo (décadas). De mediados del siglo XIX a la fecha, la actividad humana ha resultado en aumentos globales de la temperatura del orden de  $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$  (IPCC, 2001). Tal conclusión se basa en estudios que han considerado las limitaciones de los instrumentos (distribución y precisión) del pasado.

Entre otras cosas, el IPCC reporta en el TAR del Grupo I, que los aumentos en temperatura más importantes se han producido en las regiones continentales, principalmente en los valores de las temperaturas mínimas. Hay indicaciones, adicionalmente, de que el contenido de calor en los océanos ha aumentado. Las observaciones también indican que los aumentos son mayores en las latitudes medias, tal y como los modelos numéricos lo predicen. Este efecto tiene su origen en los cambios de la cubierta de hielo y nieve (disminución del albedo) registrados en décadas recientes a esas latitudes.

Uno de los resultados observacionales más interesantes es el del enfriamiento de la estratosfera baja, como lo indican los sondeos (figura 3). Tal resultado también concuerda con lo físicamente esperado al aumentar la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, ya que al aumentar el  $\text{CO}_2$ , la atmósfera media radía más energía al espacio. Con ello se fortalece el argumento de que es el efecto de gases como el  $\text{CO}_2$  lo que altera el clima del planeta.

Existen otras evidencias físicas que llevan a concluir que el efecto del  $\text{CO}_2$  y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera es real. La más clara es el hecho de que año tras año se hable del año más caliente del milenio. Los noventa resultaron la década más calurosa en mucho tiempo. El año 1998 se consideró el más caliente del siglo, pero, al parecer, el 2001 fue aún más caliente. ¿Hasta dónde se llegará?

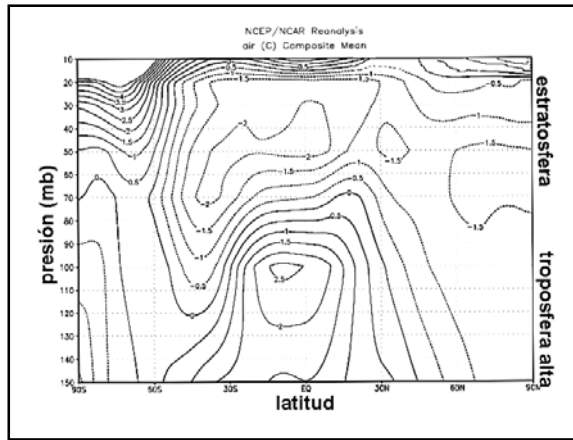


Figura 3. Corte transversal de la diferencia en la temperatura media zonal en la atmósfera media entre la década de 1990 y la década de 1960. Intervalo del contorno 0.5C. Líneas punteadas indican valores negativos.

## ALGUNAS CONCLUSIONES

Desde el punto de vista científico, el problema del cambio climático resulta fascinante. Existen muchos aspectos que han acaparado la atención por constituir una amenaza directa a muchas poblaciones. Así, el aumento en el nivel del mar, el deshielo de los glaciares o los potenciales impactos en la salud están en los discursos de muchos países. Sin embargo, existen muchos aspectos relacionados a la dinámica de una atmósfera más caliente que requieren un análisis detallado. Las llamadas “sorpresas” resultado del cambio climático, podrían estar asociadas con las interacciones no lineales en la atmósfera o con aspectos de la dinámica que no han sido analizados en detalle.

Para analizar más profundamente el problema del cambio climático, en particular para los países en los trópicos y subtrópicos, como México, será necesario que se consideren, entre muchas otras cosas:

- Los cambios en los gradientes meridionales de temperatura y sus impactos en la actividad de ondas de latitudes medias asociadas con frentes fríos y cálidos.
- Los cambios en la actividad de huracanes y el aumento del riesgo para los países afectados por estos fenómenos.
- Los cambios en la actividad del ENOS



- El que ciertas regiones del planeta puedan ser más secas que hoy en día, incluso con las tendencias positivas en la precipitación (frecuencia e intensidad de sequías)
- Las implicaciones del enfriamiento de la estratosfera.

No se piense que la dificultad en materia de cambio climático es una razón para no actuar en contra del problema. Por el contrario, el que comencemos a analizar los aspectos finos del fenómeno significa que conocemos las causas del problema y hemos avanzado lo suficiente en conceptos fundamentales del cambio climático como para actuar con medidas de mitigación y de adaptación.

Más sobre la forma como el cambio climático a escala regional requerirá de estudios con modelos y observaciones, ya que las manifestaciones del problema involucran procesos de gran escala y de escala regional e incluso local. Para poder definir los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación se requerirá del trabajo interdisciplinario. Al tratar de analizar los cambios del clima a escala regional, los procesos de deforestación y cambio en el uso de suelo en general requerirán de un análisis especial. Es probable que muchas de las manifestaciones del cambio climático en países como México se asocien a la tala inmoderada de nuestros bosques o el abuso de nuestro medio ambiente. En este sentido, nuestra responsabilidad es tan grande como la de aquellos responsables del aumento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero.

## BIBLIOGRAFÍA

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical Summary. WMO-UNEP. Cambridge: Cambridge University Press.
- Webster, P. J. 1994. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. *Reviews of Geophysics* 32: 422-476.

## Notas

---

\* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.



# ¿Qué es el efecto invernadero?

*René Garduño\**

TODOS —ABSOLUTAMENTE TODOS— los cuerpos emiten *radiación*; estos rayos o *fotones* son *ondas electromagnéticas* que no necesitan ningún medio material para propagarse, más bien la materia dificulta su avance. Como cualquier onda, las electromagnéticas se caracterizan por su *longitud de onda* o —alternativamente— por su *frecuencia*, siendo ambas cantidades inversamente proporcionales: una onda larga es de baja frecuencia y una corta es de alta frecuencia. Se llama *espectro* electromagnético el (o un) conjunto total (o parcial) de ondas de diversas frecuencias (Garduño 1998).

La luz (visible) es la radiación electromagnética más conocida; abarca cierto intervalo del espectro y tiene colores diversos que van del rojo al violeta conforme su frecuencia va aumentando. Más allá del violeta siguen, sucesivamente, según crece su frecuencia, la radiación (o luz) *ultravioleta*, los rayos X y los *gama* ( $\gamma$ ). Más cerca al rojo están formadas, conforme disminuye su frecuencia, la radiación (o luz) *infrarroja*, las *microondas* y las de TV y de radio (Garduño 1998).

La radiación emitida depende de la temperatura del cuerpo emisor en dos aspectos: por un lado, la cantidad de radiación aumenta tremendamente conforme lo hace la temperatura, y, por otro, su longitud de onda disminuye cuando la temperatura sube. En la atmósfera y el clima actúan dos tipos de radiación claramente distintos: la luz visible originada en el Sol y la radiación infrarroja (invisible) emitida por la Tierra. La enorme diferencia entre ellas se debe a la gran disparidad de temperaturas: el Sol emite su radiación como a 6 mil grados centígrados ( $^{\circ}\text{C}$ ); en cambio, los elementos de la Tierra (el suelo, el mar, los casquetes polares, las capas atmosféricas, las nubes, etc.) lo hacen a temperaturas que andan alrededor de  $0^{\circ}\text{C}$ . Por

esta gran diferencia en su longitud de onda, a la radiación *solar* se le llama de onda corta, y a la *terrestre*, de onda larga, constituyendo espectros francamente ajenos (Toharia 1984 y Voituriez 1994).

Por estar a una cierta distancia del Sol y tener un determinado *albedo* (blancura, capacidad de reflejar la radiación que le llega), la Tierra debiera tener una temperatura característica de equilibrio llamada *efectiva*. Si el planeta estuviera más lejos del Sol sería más frío, y si fuera más negro (o mate) sería más caliente. Naturalmente, a mayor distancia de la fuente se recibe menos radiación, y un cuerpo más oscuro (o menos brillante) absorbe más radiación. La temperatura efectiva es el resultado neto del balance entre la radiación solar (de onda corta) absorbida por la Tierra y la emitida (en onda larga) por ella misma (Toharia 1984). Los valores concretos del albedo planetario y de la distancia del planeta a la estrella determinan para la Tierra una temperatura efectiva de  $-18^{\circ}\text{C}$ , un valor muy diferente de la temperatura que realmente tiene el planeta (en su superficie), cuyo valor *típico* (promedio anual y global) es de  $+15^{\circ}\text{C}$ , ¡ $33^{\circ}\text{C}$  más arriba! Esta gran diferencia entre la temperatura efectiva y la real se debe al *efecto invernadero* (EI), que se da en cualquier planeta o satélite natural que tenga atmósfera. Es decir, si la Tierra no tuviera atmósfera sería  $33^{\circ}\text{C}$  más fría, un planeta helado (Cosgrove 1994, Rivera 1999, Suplee 1998 y Voituriez 1994).

El efecto invernadero resulta de que el aire es (muy) transparente para la radiación de onda corta y (muy) opaco a la de onda larga. O sea que la atmósfera es un filtro radiativo, que deja pasar los rayos solares; unos de ellos son absorbidos por la superficie terrestre (y por los demás componentes de la Tierra), que se calienta(n) en consecuencia y entonces emite la radiación terrestre, que es detenida (absorbida) por la atmósfera y las nubes. Las capas atmosféricas (y las nubes) van sucesivamente absorbiendo, calentándose y reemitiendo (hacia arriba y hacia abajo) radiación térmica procedente de abajo. El resultado de este complejo mecanismo es sencillo: la atmósfera superficial es cálida y se va enfriando conforme uno asciende a través de ella. En realidad, el complejo dispositivo esbozado se complica más por mecanismos termodinámicos no radiacionales. En primer lugar, la *convección* atmosférica, consistente en que el aire inferior, al calentarse por el contacto directo con la superficie y por la radiación procedente de ella, se dilata, aligera y sube, al tiempo que las porciones frías (superiores) descienden, en un proceso continuo de mezcla vertical. En segundo lugar está el mecanismo de *cambio de fase* del agua, consistente en que el aire ascendente

se enfría (principalmente porque la densidad y la presión de la atmósfera disminuyen con la altura) y entonces el vapor de agua contenido en él se condensa, pasando de la fase gaseosa a la líquida. Este proceso libera calor. De cualquier modo, el resultado neto es el ya mencionado: la temperatura disminuye con la altura. Es decir, aunque en última instancia el Sol es la fuente original de la energía térmica (o calor) contenida(o) en la atmósfera, ésta no se calienta por arriba sino desde abajo. Por supuesto, y debido al albedo planetario, no toda la radiación solar incidente es absorbida por la Tierra; una porción considerable es reflejada (y devuelta) hacia el espacio exterior. Tampoco toda la radiación terrestre es atrapada por la atmósfera (y las nubes); una parte se fuga (también) hacia el espacio. El EI es producido por la fracción absorbida de ambas radiaciones (Garduño 1998, Hardy *et al.* 1986 y Voituriez 1994).

El nombre efecto invernadero proviene de su similitud con las instalaciones construidas para cultivar plantas en un ambiente más cálido que el exterior; dado que el techo de un invernadero tiene la misma propiedad de dejar entrar la radiación solar y bloquear la terrestre generada en su interior. Algunos autores dicen que el nombre efecto invernadero no es el más adecuado, pues un invernadero se calienta más por impedir la convección que por atrapar radiación, y sugieren que se le llame más bien *efecto atmósfera*. Pero, en fin, sigamos con la costumbre de nombrarlo EI. Otra diferencia entre un invernadero (botánico) y el EI de la atmósfera consiste en que el funcionamiento de aquél está concentrado en una capa delgada (el techo); en cambio, el EI actúa gradualmente a lo largo de todo el espesor de la atmósfera, la cual, además, no tiene ni siquiera una frontera exterior nítida, sino que se va atenuando indefinidamente con la altura. Por lo mismo, pecan de simplistas los esquemas gráficos del efecto invernadero que le ponen a la atmósfera una especie de tapa superior, para que se parezca a un invernadero, la cual funciona como el techo de éste; es decir, como la cubierta que bloquea la salida de la radiación, justamente arriba, donde la atmósfera es más tenue, siendo que la obstrucción de la radiación terrestre se da mayormente en los niveles inferiores, donde la atmósfera es más densa. De cualquier manera, esa imagen simple es una buena representación del EI en primera instancia (Garduño 1998 e IPCC 2001).

La atmósfera es una mezcla de gases y de *aerosoles* (partículas sólidas y líquidas) suspendidos en ella. Surge la pregunta: ¿cuáles de esos componentes son los responsables del efecto invernadero? Naturalmente, no to-

dos; los aerosoles hacen más bien un efecto contrario: aumentan el albedo planetario, o sea que reflejan la radiación solar y reducen la cantidad de ella que penetra a las capas inferiores y llega a la superficie. Consecuentemente, este efecto se debe a los gases atmosféricos; pero no a todos, sólo a los más complejos y minoritarios, llamados justamente *gases de invernadero* (GI) o *termoactivos*. El oxígeno ( $O_2$ ) y el nitrógeno ( $N_2$ ) son abrumadoramente los componentes principales de la atmósfera (99%): el  $O_2$  constituye 21%, y el  $N_2$ , 78%; sin embargo, ellos no son gases efecto invernadero. O sea que si la atmósfera estuviera formada sólo por  $N_2$  y  $O_2$ , sería tan respirable como ahora, pero la temperatura típica de la Tierra sería de  $-18^\circ\text{C}$ , igual que si no hubiera atmósfera (Toharia 1984 y Voituriez 1994). Por lo tanto, los gases efecto invernadero están dentro del 1% restante de la composición atmosférica. En general, están constituidos por tres o más átomos; los que forman moléculas *diatómicas* (como el  $O_2$  y el  $N_2$ ) o *monoatómicas* son transparentes a la radiación terrestre. Los más importantes son el vapor de agua ( $H_2O$ ) y el bióxido de carbono ( $CO_2$ ); los demás GI ( $CH_4$ ,  $NO_x$ , CFCs, etc.) se llaman *gases traza* (GT) por su presencia ínfima en la atmósfera (Hardy *et al.* 1986). Algunos autores incluyen al  $CO_2$  en los GT (Voituriez 1994); aquí lo excluimos.

La humedad atmosférica, o sea el contenido de vapor de agua en el aire, es sumamente variable, tanto en el espacio (horizontal y verticalmente) como en el tiempo (ver el capítulo *El cambio climático global: comprender el problema*, de V. Magaña, en esta sección); sin embargo, su distribución vertical tiene una regularidad: la humedad del aire disminuye con la altura; en otras palabras, además de que hay menos aire entre más arriba estemos, hay menos vapor en el aire superior que en el inferior. En cambio, el  $CO_2$  está bien mezclado en el aire, la proporción de  $CO_2$  es casi uniforme. Por consiguiente, tanto el vapor como el  $CO_2$  disminuyen con la altura, pero el vapor disminuye más rápido que el  $CO_2$ , dado que aparte de la atenuación del aire (y del  $CO_2$ ) mismo, el vapor se atenúa dentro del aire. Los perfiles verticales de la concentración de vapor y de  $CO_2$  son curvos, o sea que no decaen proporcionalmente con la altura sino más rápido, y (por lo dicho antes) el perfil de vapor es más curvo. Siendo ambos los principales gases que causan el efecto invernadero, y siendo éste el causante del perfil vertical de temperatura en la atmósfera, resulta curioso que éste sí sea recto; es decir que la temperatura disminuye proporcionalmente con la altura, a razón de  $6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ , o sea que por cada kilómetro que uno ascienda, la temperatura disminuye  $6.5^\circ\text{C}$ . Esta cantidad se llama *gradiente térmico* y es igual en cualquier

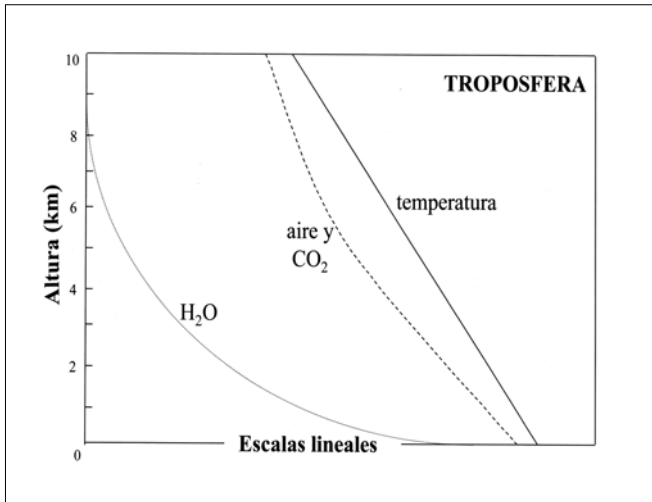


Figura 1.

lugar geográfico. Los tres perfiles descritos se ilustran en la figura 1, para los primeros 10km de altura a partir del nivel del mar. Esta capa inferior de la atmósfera se llama *troposfera*, en ella está contenida prácticamente toda el agua atmosférica y, por lo mismo, encima de ella no hay propiamente clima (Cosgrove 1994, Eden y Twist 1997 y Toharia 1984).

La figura 2 ilustra la esencia del efecto invernadero. La radiación solar atraviesa la atmósfera y llega a la superficie (continente y océano), que la absorbe. Entonces la superficie se calienta y emite radiación terrestre, la cual es absorbida por el vapor de agua y el CO<sub>2</sub> contenidos en la atmósfera. Como esta radiación va de abajo hacia arriba y los gases absorbedores se atenúan (más rápido el vapor que el CO<sub>2</sub>) en la misma dirección, también la radiación terrestre se va distribuyendo más o menos en el mismo sentido. Al simplificar la figura quedaron fuera muchos elementos: la radiación solar reflejada (hacia arriba) por las nubes y la superficie, la radiación solar dispersada (en todas direcciones) por la atmósfera, la radiación terrestre emitida en direcciones distintas a la vertical, la radiación (terrestre) reemitida por la atmósfera y las nubes, la radiación terrestre que se fuga al espacio exterior, la presencia y acción de los GT, etc. (Hardy *et al.* 1986 y Voituriez 1994).

El EI siempre ha existido; es consecuencia de la composición natural de la atmósfera y por él tenemos en la Tierra una temperatura relativamente alta, que ha propiciado el surgimiento y la evolución de la vida. Sin embar-

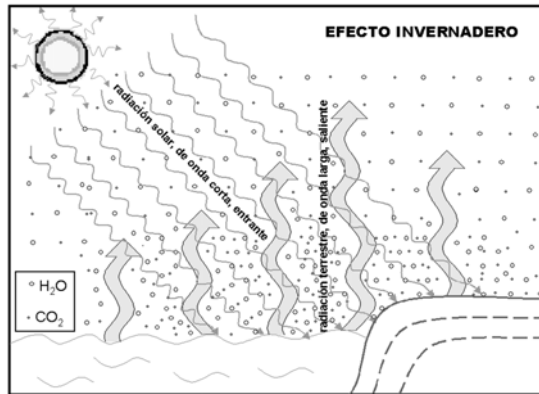


Figura 2.

go, esta situación normal y natural ha sido alterada anormal y artificialmente por el progreso humano de los últimos siglos, debido a que la industrialización ha inyectado a la atmósfera  $\text{CO}_2$  y GT (ver el capítulo *Los principales países emisores, emisiones históricas*, de J. L. Arvizu, en esta sección). El  $\text{CO}_2$  antropógeno procede de la quema de combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón mineral) y de la deforestación (por urbanización, agricultura, etc.) (Hardy *et al.* 1986, Suple, 1998, Tanck 1971). Los GT son emitidos también por diversos artefactos y actividades industriales, domésticas, agropecuarias, etc. Con excepción de los clorofluorocarbonos (CFCs) (y sus sustitutos recientes), los GT y el  $\text{CO}_2$  son componentes naturales del aire, siempre han existido en la atmósfera; lo que ha hecho el hombre es acrecentarlos (ver el capítulo *Los gases regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de D. H. Cuatecontzi y Jorge Gasca, en esta sección), y este fenómeno conlleva, por supuesto, al aumento del efecto invernadero, pues más gases absorbedores presentes atrapan más radiación en el sistema climático (Eden y Twist 1997, Hardy *et al.* 1986, Rivera 1999, Tanck 1971, Toharia 1984 y Voituriez 1994). Por lo tanto, el efecto invernadero, del que se habla mucho en las últimas décadas, debe llamarse propiamente *incremento antropógeno de éste*, y a su correspondiente efecto en el clima, denominado comúnmente *calentamiento global* o *cambio climático global*, debe ponérsele el apellido *antropógeno* o *actual*, dado que ha habido otros calentamientos (y enfriamientos) naturales y el clima ha cambiado muchas veces antes, de hecho “Lo único constante del clima es su variabilidad” (Rolando García) (Garduño 1998, Tanck 1971 y Toharia 1984).



Durante varios siglos previos a la industrialización, el CO<sub>2</sub> tuvo una concentración casi constante en la atmósfera, con 280 partes por millón en volumen (ppmv), y a esta cantidad se le llama, en consecuencia, *nivel preindustrial*. A partir de mediados del siglo XIX, esta concentración ha aumentado, estando ahora en 370 ppmv (IPCC 2001). Con los GT pasa algo parecido. El comportamiento radiacional de los gases efecto invernadero se calcula con la teoría cuántica y se observa experimentalmente en el laboratorio, pero también lo demuestra la historia del clima (Voituriez 1994). La figura 3 muestra los paleo-registros de temperatura y de contenido de CO<sub>2</sub> y metano (CH<sub>4</sub>) en la atmósfera, a lo largo de 420 mil años. Se observa un claro paralelismo entre estas tres variables: suben y bajan juntas (IPCC, 2001; Steffen, 2000). No obstante, la situación actual rompe esta secuencia; en el pasado, los tres registros han tenido cuatro oscilaciones, con periodo de unos cien mil años, y oscilan dentro de los mismos límites superior e inferior. Este comportamiento representa un sistema bio-geo-físico-químico complejo y autocontrolado, es el *metabolismo* natural de la biosfera terrestre, del cual el EI es sólo un componente. El máximo de CO<sub>2</sub> alcanzado cinco veces en este periodo geológico es de 280 ppmv, nunca se sobrepasó; ahora hay ¡370 ppmv!, un valor insólito que se sale del cuadro que contiene los registros, además se ha alcanzado con una rapidez también insólita, en cosa de un siglo, siendo que los cambios previos de ese tamaño necesitaron decenas de milenios para darse. Gran duda y preocupación significan las consecuencias que esta violenta perturbación antropógena del CO<sub>2</sub> pueda tener en el equilibrio de los sistemas naturales, como el clima a largo plazo (Steffen 2000).

La sincronía observada entre la temperatura y los (principales) GI es notoria en el intervalo geológico mostrado en la figura 3; en periodos menores no es tan clara, pues otros fenómenos de plazos cortos perturban la (señal de) temperatura; entre ellos destacan oscilaciones naturales internas del sistema climático como el *Niño* y la *Niña*: el primero eleva la temperatura a escala planetaria, y la segunda la reduce (Voituriez 1994). Otro factor importante de la *variabilidad* interanual del clima son las erupciones volcánicas, que inyectan hasta la estratosfera aerosoles que quedan suspendidos por años y enfrían el clima planetario (Eden y Twist 1997, Hardy *et al.* 1986, Suplee 1998 y Voituriez 1994). El *Niño* tiene cierta periodicidad de recurrencia (ver el capítulo *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad climática y el cambio climático en México* de V. Magaña, Juan M., Rubén

M. y Cecilia M., en la sección III); en cambio, el vulcanismo es más bien azaroso en su manifestación, y la magnitud de ambos es muy variable. Hay un aerosol artificial, el sulfato, producido también por la industria, que aumenta sistemáticamente y atenúa el calentamiento debido al incremento del efecto invernadero. Por todos estos elementos, adicionales al efecto invernadero, que afectan al clima, los registros históricos (no mostrados) de

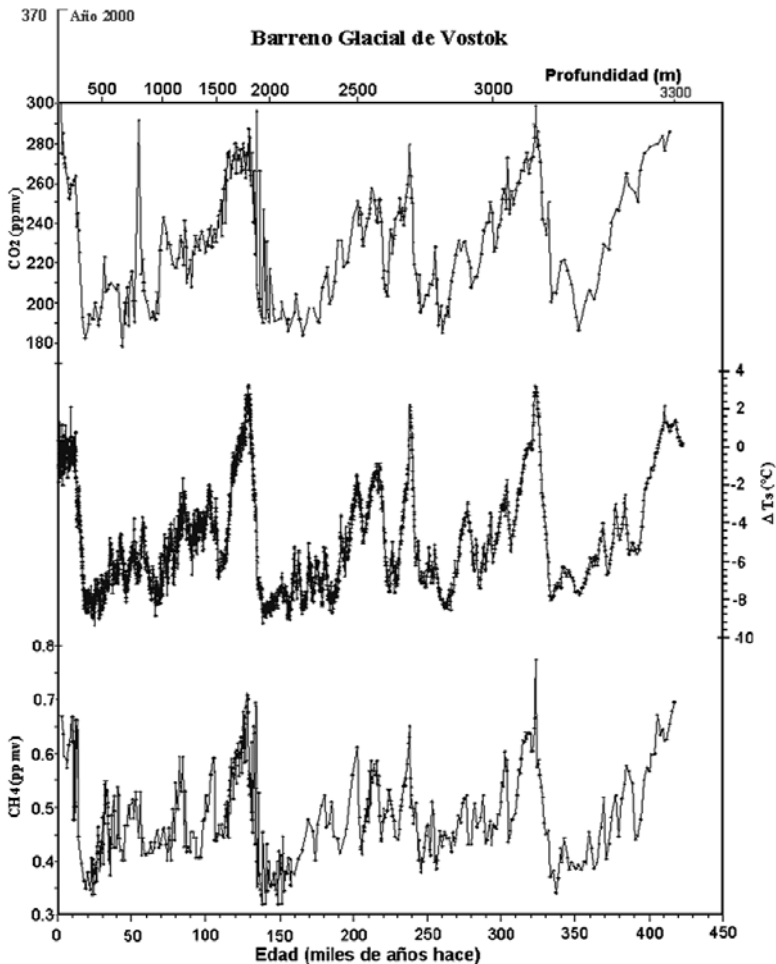


Figura 3.

Fuente: Petit, J.R. *et al.* 2001, Vostok Ice Core Data for 420,000 Years, IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2001-076. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

CO<sub>2</sub> (aumentado antropógenamente) y de la temperatura a partir de mediados del siglo XIX no van paralelos, aunque sí hay un incremento claro de ésta, como de 0.6°C (IPCC 2000, Toharia 1984 y Voituriez 1994).

Los fenómenos antropógenos detectados a escala planetaria se intensifican localmente en las ciudades, por la aglomeración de gente, industria, etc. En las urbes se acumulan gases efecto invernadero y aerosoles (polvo, hollín, etc.) antropógenos, con efectos térmicos contrapuestos; pero dominan los primeros, dando por resultado la llamada *isla de calor*: la mayor temperatura de la ciudad respecto a su entorno rural o respecto al mismo lugar antes de la urbanización (ver el capítulo *La variabilidad climática en los registros instrumentales de México* de E. Jáuregui, en la sección III). Por supuesto que muchos otros elementos artificiales contribuyen al clima urbano: el cambio de albedo asociado al uso del suelo, la resequedad debida a la deforestación, la ventilación natural bloqueada por los edificios, el calor emitido por máquinas, vehículos, etc. (Eden y Twist 1997 y Garduño 1998).

El ozono (O<sub>3</sub>) es gas efecto invernadero y está presente en dos ámbitos atmosféricos distintos. Por un lado, forma la capa estratosférica planetaria, que en las últimas décadas se ha reducido notablemente, sobre todo en la Antártida, situación llamada comúnmente *hoyo de O<sub>3</sub>*. Por otro lado, el O<sub>3</sub> es un contaminante en las ciudades (de hecho es ahora el principal en la Cd. de México); está concentrado en los niveles bajos de la atmósfera y por eso se llama O<sub>3</sub> troposférico. La disminución del O<sub>3</sub> estratosférico (debida a los CFCs, que también son gases efecto invernadero) y el aumento del O<sub>3</sub> troposférico son fenómenos antropógenos y ambos perjudican la salud, porque el O<sub>3</sub> estratosférico bloquea la radiación solar ultravioleta y el O<sub>3</sub> troposférico irrita las mucosas y la piel. Sin embargo, los efectos térmicos de ambas alteraciones del O<sub>3</sub> atmosférico son pequeños y contrarios entre sí; por un lado, al haber menos O<sub>3</sub> en la estratosfera, más radiación terrestre se fuga del planeta y eso enfría el clima; por otro lado, al haber más O<sub>3</sub> en la troposfera, más radiación terrestre se atrapa en la atmósfera y eso calienta el clima. De modo que el hoyo de O<sub>3</sub> se contrapone al efecto invernadero y la contaminación urbana por O<sub>3</sub> refuerza el EI (Eden y Twist 1997, IPCC 2001, Tank 1971 y Voituriez 1994).

A escala global no se aprecia una alteración del vapor de agua atmosférico como consecuencia directa de la acción humana, pero sí la hay como consecuencia indirecta. Cuando el clima se calienta, por cualquier causa en general y por el aumento del CO<sub>2</sub> y de GT en particular, la atmósfera tiende

a conservar su *humedad relativa*; por lo tanto, el agua superficial (principalmente del océano) se evapora en mayor cantidad y el contenido de vapor en la troposfera aumenta, incrementando así el efecto invernadero y reforzando el calentamiento original (ver el capítulo *El cambio climático global: comprender el problema* de V. Magaña, en esta sección). Resulta entonces que el vapor de agua no es un gas efecto invernadero estrictamente antropógeno, pero sí es un *retroalimentador positivo* del efecto climático inducido por el aumento antropógeno de los otros gases efecto invernadero, ya que amplifica el calentamiento debido a ellos (Garduño 1998 e IPCC 2001).

El cambio climático global antropógeno actual continuará seguramente, dado que seguirán creciendo el CO<sub>2</sub> y los GT, pues sus emisiones son consustanciales al estilo de vida de nuestra civilización, misma que ha comenzado a interesarse y preocuparse del problema y sus repercusiones en los sistemas naturales y artificiales (IPCC 2001).

## AGRADECIMIENTOS

A Oscar Sánchez y Rodolfo Meza por las figuras, y a Elvira Morales por la captura del texto.

## BIBLIOGRAFÍA

- Cosgrove, B. 1994. *La atmósfera y el tiempo*. México: Biblioteca Visual Altea.
- Eden, P. y C. Twist. 1997. *Tiempo y clima*. México: Publicaciones Citem-CNCA.
- Garduño, R. 1998. *El veleidoso clima*. México: La Ciencia para Todos, #127. FCE-SEP-CONACYT.
- Hardy, R., P. Wright, J. Gribbin y J. Kington. 1986. *El libro del clima*, Vol. III. Barcelona: Ediciones Orbis, S.A.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical Summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.
- Rivera, M. A. 1999. *El cambio climático*. México: Colección Tercer Milenio, CNCA.
- Steffen, W. 2000. An integrated approach to understanding Earth's metabolism. *IGBP Newsletter 41*: 9-16.
- Suplee, C. 1998. Desentrañando el enigma del clima. *National Geographic 2* (5): 38-70.
- Tanck, H. J. 1971. *Meteorología*. Madrid: Alianza Editorial.

- Toharia, M. 1984. *Tiempo y clima*. Colección Temas Clave, Madrid: Salvat Editores.
- Voituriez, B. 1994. *La atmósfera y el clima*. Barcelona: Colección Conocer la Ciencia. RBA Editores.

## Notas

---

- \* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.



# Clima oceánico: los mares mexicanos ante el cambio climático global

*Artemio Gallegos García\**

## INTRODUCCIÓN

HA TRANSCURRIDO POCO MÁS de un siglo desde las primeras advertencias sobre el aumento en la concentración de bióxido de carbono atmosférico ( $\text{CO}_2$ ) debido a la quema de combustibles fósiles pudiera alterar las propiedades ópticas de la atmósfera (Arrhenius 1896 y Callendar 1938) e inducir cambios en las componentes de la ecuación del equilibrio termodinámico de la Tierra, particularmente la que se refiere a la temperatura media global de la capa límite de la troposfera baja.

En la década de 1950, algunos científicos —entre los que destacaron Carl Gustav Rossby y Roger Revelle— revivieron el tema de la creciente concentración del  $\text{CO}_2$  y alentaron la realización de estudios analíticos que condujeron a las primeras estimaciones detalladas de este problema (Revelle y Suess 1957, Bolin y Eriksson 1959). Tales trabajos germinales estimularon una línea de investigación geofísica de suprema importancia y de contundente actualidad —el estudio del *clima terrestre* y del *cambio climático global*— con la que al paso del tiempo se constata que la enérgica actividad desarrollista del conglomerado humano perturba la “evolución natural” de la atmósfera, del mar y de la tierra, a tal grado que pone en riesgo su propia supervivencia en éste nuestro planeta.

El tiempo transcurrido desde entonces ha atestiguado la emergencia vigorosa de las Ciencias Ambientales y el desarrollo de investigaciones teóricas y empíricas específicas, y la realización de extensos programas nacionales e internacionales de observación, registro y medición de muy diversas variables ambientales relacionadas con el clima terrestre; su evolución, variabilidad y predicción a escalas local, regional y global.

## EL CLIMA

La más obvia manifestación del clima en algún lugar de nuestro planeta, escogido al azar, es el carácter de los cambios en las condiciones ambientales que suceden en ese punto geográfico. De esta manera emergen y se identifican los acontecimientos locales del estado atmosférico cotidiano —el ‘tiempo’ diario— de cuya estadística acumulativa resultan las definiciones de temporadas (‘lluvias’, ‘sequía’, ‘nevadas’, etc.) y las condiciones meteorológicas promedio que distinguen a las estaciones del año en ese lugar. Típicamente, en un periodo de varias décadas, estos cambios se dan regularmente y casi siempre en el mismo orden. Éstos se repiten año con año en la misma sucesión y con expresiones ambientales distintivas de cada época, aunque debe destacarse que en muchos lugares son notorias algunas manifestaciones anómalas entre estaciones similares, una o más veces en una década.

Existen en la literatura científica muy diversas descripciones coherentes del clima terrestre (SCOPE 1986 y Schneider 1989), comúnmente conocidas como ‘modelos del Sistema Climático Global’. Refiriéndose a éstos de manera muy resumida, todos afirman que el Sol es la fuente principal —y prácticamente única— de energía del Sistema Climático Global (SCG), y que la radiación solar se distribuye y se absorbe de manera heterogénea y diferencial en la biosfera terrestre, creando persistentes gradientes generalizados, lo suficientemente intensos como para generar e impulsar movimientos atmosféricos y oceánicos de redistribución de energía, *momentum* y masa, que tienden a debilitar o eliminar a tales gradientes para establecer un estado de equilibrio termodinámico y de homogeneidad total, que el SCG alcanzaría sólo después de que desaparezca el forzamiento externo de la radiación solar.

Algunos modelos del SCG enfatizan el origen y las características distintivas de las estaciones; otros se esfuerzan en destacar el ciclo regular anual del clima; unos cuantos enfocan una descripción que explique la ocurrencia de las manifestaciones anómalas en la sucesión de los ciclos anuales y también hay los que acentúan su descripción en las variaciones de muy largo plazo, como son las glaciaciones (ver el capítulo *Investigaciones de los glaciares y del hielo de los polos* de L. Vázquez, en esta sección) y otros cambios milenarios de escala geológica (Kraus 1982).



## EL OCÉANO Y EL CLIMA GLOBAL

Otro aspecto fundamental que los modelos del SCG tienen en común es que todos ellos establecen, como premisa elemental, que el océano juega un papel central en la evolución del clima por su capacidad para almacenar, transportar y liberar enormes cantidades de calor latente. En efecto, todos parten del hecho de que el océano es el que conduce y modula el SCG mediante tres procesos básicos de interacción océano-atmósfera: (1) la absorción y emisión de radiación electromagnética (fundamentalmente se absorbe radiación solar y se emite radiación infrarroja); (2) la evaporación y precipitación del agua, y (3) los flujos de *momentum*, flotabilidad y calor.

Al océano se le considera, en todos los modelos, como una especie de 'volante inercial' del SCG en virtud de que el clima terrestre está dominado por la intensidad, duración, ubicación y extensión geográficas de las *tasas de transferencia* de energía, *momentum* y masa entre el océano y la atmósfera. Tales condiciones físicas determinan el carácter, la frecuencia, las dimensiones y la fuerza de los meteoros que constituyen el tiempo meteorológico y contribuyen de manera acumulativa a las singularidades y a la identidad del clima local.

## EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

En principio, todo intento para abordar el problema del cambio climático global debe tener como base el conocimiento preciso del estado actual de la circulación atmosférica y oceánica en nuestra región, la caracterización física de las fuerzas que producen tales circulaciones y los cambios que tales fuerzas sufrirán como consecuencia del calentamiento global. Para ello es necesario, desde el punto de vista metodológico, detectar e identificar los cambios estadísticamente significativos en la circulación regional de la atmósfera y del océano que pudieran asociarse claramente al calentamiento global.

Para el caso del océano, infortunadamente y a pesar de que durante los últimos 30 años se ha avanzado notablemente en el conocimiento de la estructura hidrográfica regional de los mares de México, no existe suficiente información oportuna y contemporánea de la circulación regional del océano, ni en cantidad ni en calidad, para abordar el problema únicamente de esta manera. La situación para el caso de la atmósfera no es muy distinta.

## MODELOS NUMÉRICOS

La modelación numérica del movimiento del océano es una disciplina fundamental en la investigación oceanográfica moderna. Es una metodología en permanente desarrollo y expansión, siguiendo de cerca los avances más recientes en tecnología cibernética y en algoritmos numéricos. No existe área de las Ciencias del Mar que no haya sido tocada con las técnicas de la modelación numérica, y el tema de la circulación oceánica es sin duda el que más a fondo ha sido abordado: así lo corrobora la gran familia de modelos de circulación oceánica. Hoy en día existen modelos que se pueden usar para imitar la circulación del océano a escala global, o bien para remedar el flujo de las corrientes en una bahía de unos cuantos kilómetros de extensión.

Los modelos numéricos se usan para examinar la física de los procesos dinámicos y termodinámicos de tendencia al equilibrio que ocurren en el océano, en un amplio rango de escalas de tiempo y espacio. En particular, con los modelos de circulación del océano se intenta reproducir corrientes y transferencias de calor, masa y *momentum* bajo diversas condiciones de forzamiento, entre otras por viento y por flujos de flotabilidad. Además de tener ahora una mejor resolución espacial y temporal, muchos modelos actuales admiten procedimientos de asimilación de información e incorporan datos *in situ* (hidrografía, altimetría satelital, nivel del mar, precipitación, nubosidad, radiación solar, temperatura de la superficie del mar, etc.). El beneficio de tales avances se refleja ahora en reproducciones más parecidas a las observaciones oceanográficas. En resumen, los modelos numéricos actuales de la circulación del océano son herramientas muy útiles para la predicción y, en consecuencia, tienen una gran aplicación en los estudios sobre los impactos del cambio climático global.

## ESCENARIO DEL CLIMA

La Tierra, durante el último millón de años, ha completado ocho ciclos glaciales, oscilando de manera irregular entre un periodo '*glacial primordial*', cuando las condiciones ambientales promedio del planeta son de frío, sequedad o lluvias escasas, gran extensión de los hielos polares y glaciares y el consecuente descenso del nivel del mar, y un periodo '*interglacial húmedo*', caracterizado por condiciones ambientales medias de gran humedad y precipitación intensa, calor persistente, ausencia o presencia escasa de hielo polar y glaciar y un elevado

nivel del mar (Broecker 1982). El clima actual se encuentra entre tales condiciones extremas, pero de manera inexorable avanza hacia alguna de ellas. Superpuestas sobre estas milenarias oscilaciones de escala global, existen otras fluctuaciones climáticas de mucho más corta duración y de menor extensión geográfica. Un ejemplo es el periodo que dura alrededor de 400 años (de 800 a 1200 d. C.), conocido como el 'Pequeño Medioevo Cálido', cuando el nivel medio del mar estuvo casi medio metro por arriba de su valor actual y la temperatura media ambiental fue 1°C más cálida que ahora. Sin duda ha sido ése el periodo más caliente de los últimos 2000 años, y fue más claramente percibido en las costas de la región del Atlántico del norte (Williams y Wigley 1983). Cambios en el clima regional como éste podrían dispararse a causa de un aumento en la concentración de gases invernadero en la atmósfera, y son dichos cambios futuros los que demandan la atención de nuestra sociedad actual.

El ciclo hidrológico de la Tierra se sustenta en la capacidad del océano para almacenar, transportar y liberar enormes cantidades de calor, y debido a esta virtud tiene una influencia determinante en el clima y su variabilidad. Sin embargo, el océano se subordina a los cambios que ocurren en la atmósfera, particularmente a las fluctuaciones en el régimen de vientos sobre la superficie del mar, a los procesos de evaporación-precipitación marina y a la radiación neta sobre el océano. Este hecho nos permite indagar sobre las condiciones oceánicas que prevalecerían en una Tierra más caliente si se conocen con un nivel razonable de certidumbre la distribución geográfica y la intensidad media de los vientos dominantes, régimen de precipitación- evaporación y radiación neta sobre la superficie de nuestro planeta.

Diversos estudios sobre paleoclima y sobre el clima reciente (Butzer 1964, Lamb 1964, Harris y Fairbridge 1967, Kellog 1977, Palutikof *et al.* 1984, y Jones y Wigley 1990) proporcionan elementos para reconstruir de manera razonable la distribución geográfica de vientos dominantes, evaporación, precipitación, radiación neta y presión atmosférica a nivel del mar, bajo condiciones típicas de una Tierra más caliente, lo mismo que de una más fría. Bajo esta premisa se puede intentar entonces la descripción de la circulación oceánica en las condiciones ambientales imaginadas. Circunscribimos nuestro interés en la circulación del océano en una Tierra más caliente, en virtud del inminente calentamiento global (ver el capítulo *El ciclo global del carbono*, de V. Jaramillo, en esta sección).

Así, los resultados de las reconstrucciones sugieren que en una Tierra con temperatura ambiental promedio más alta:

- El calentamiento en verano sobre los continentes es más pronunciado, lo cual es causa a su vez de que las presiones atmosféricas a nivel del mar sean más bajas que las actuales, la radiación neta sea mayor, la evapo-transpiración más intensa, y ocurra una intensificación en las circulaciones tipo monzón entre tierra y mar, en la troposfera baja. Además, aumenta el contraste entre las condiciones meteorológicas promedio sobre tierra y sobre mar, que se traduce en una mayor precipitación a lo largo de la franja costera y, consecuentemente, decrece la precipitación tierra adentro.
- Durante los veranos, los gradientes térmicos y de presión atmosférica a nivel del mar entre tierra y mar son mucho más acentuados que los que se desarrollan durante el invierno. Así, la interacción entre centros de alta y baja presión atmosférica resulta en una conversión de energía potencial disponible a energía cinética más violenta y efectiva. Este proceso se manifiesta en la intensificación de los vientos dominantes y, consecuentemente, se ejerce un mayor esfuerzo del viento sobre el océano.
- Los inviernos muestran una diferencia muy débil entre los centros semi-permanentes de alta y de baja presión atmosférica (a nivel del mar). Los mecanismos que mantienen la circulación atmosférica se tornan laxos y la radiación neta estimula movimientos convectivos endebles. En consecuencia, los desplazamientos relativos latitudinales de masas de aire húmedo tropical y de aire seco subtropical provocan ciclones y anticiclones en latitudes medias que inducen débiles vientos dominantes.

En la suposición de tales condiciones atmosféricas típicas de una Tierra más caliente, la circulación del océano, por lo menos de su estrato superficial (0 - 1000 m), debe responder a un forzamiento atmosférico con fuertes contrastes entre invierno y verano. Pero la inercia dinámica y térmica del océano hace que éste responda al forzamiento con un retraso de dos a cuatro meses. Así, los impulsos atmosféricos de verano se manifiestan en el océano plenamente hasta mediados o fines de otoño y su señal persiste hasta la primavera o principios del verano siguiente, según la magnitud del flujo de energía que la atmósfera haya cedido al océano —principalmente por efecto del viento— el verano anterior. De esta manera, un invierno suave no establecería condiciones propicias para la disipación de la energía cinética de las corrientes

marinas de superficie, y el forzamiento atmosférico del verano siguiente sería más eficaz que el anterior. Por el contrario, si se da un invierno crudo y prolongado, la disipación de las corrientes marinas superficiales sería más drástica y el forzamiento del verano siguiente tendría condiciones iniciales poco favorables para el restablecimiento de corrientes superficiales de magnitud similar al verano anterior. Esta línea de pensamiento conduce a proponer escenarios posibles de la circulación oceánica en una Tierra más caliente. Así, por ejemplo, una sucesión de inviernos suaves favorece la intensificación de las corrientes marinas, en tanto que la sucesión de inviernos crudos y prolongados debilitaría el movimiento del estrato superficial del mar.

El punto que se debe enfatizar es que en una Tierra más caliente, la variabilidad de la circulación superficial del océano es básicamente el resultado de la magnitud y rapidez con que se den los cambios verano-invierno en el forzamiento atmosférico, así como de su extensión y ubicación geográfica. Tales cambios: (1) determinan la posición, rapidez y dirección de las corrientes marinas superficiales; (2) establecen la localización, extensión y frecuencia de episodios de surgencia eólica; (3) definen la localización, extensión y frecuencia de episodios de sedimentación-erosión y de inundación costera; (4) controlan la magnitud y variabilidad de los transportes de volumen, masa y calor a través de estrechos, pasos y canales entre cuencas oceánicas, y (5) gobiernan la generación, desplazamiento y disipación de los movimientos de mesoescala en el océano (anillos, vórtices, filamentos, ondas largas de muy baja frecuencia, etc.). En resumen, el inminente calentamiento del SCG inducirá cambios en la circulación superficial de los mares, por lo que la manifestación de tales cambios y sus posibles efectos deben anticiparse con toda oportunidad. ¿Qué se requiere para que esto sea posible?

## RECOMENDACIONES

La medición y el registro regularizado de variables físicas, químicas y biológicas de los mares de México es una actividad de primordial importancia para cubrir las demandas básicas de cualquier estudio serio del impacto potencial del cambio climático global en la región marina y continental de México. La observación sistemática es necesaria para conocer, medir y describir de manera apropiada la variabilidad oceánica que pudiera identificarse como una manifestación regional del cambio climático y para advertir posibles impactos de carácter ambiental (ver el capítulo *La variabilidad*

*climática en los registros instrumentales de México*, de E. Jáuregui, en la sección III). ¿Qué variables marinas, en qué lugares y con qué frecuencia se deben registrar y medir para detectar cambios significativos y de probables efectos de las condiciones oceánicas de los mares de México a causa del cambio climático?

Las variables oceánicas que se deben registrar de manera sistemática son:

- Hidrográficas físicas, químicas y biológicas: temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes (nitratos, fosfatos, etc.), clorofila y productividad primaria.
- De superficie: nivel del mar, temperatura del aire, presión atmosférica, radiación incidente, emitida y neta; nubosidad, evaporación, precipitación y temperatura de la superficie del mar.
- Cinemáticas: perfiles de la velocidad del agua de mar (corrientes marinas, mínimo de la superficie hasta 1000 m de profundidad) registrados con tecnología moderna [ADCP's (perfilador acústico dopler de corriente), anclajes de correntímetros, flotadores rastreados con satélite, etc.].
- De condición de frontera: viento y esfuerzo del viento sobre el mar, descarga de ríos y batimetría de alta resolución, particularmente en la zona de transición de la plataforma continental.

Los lugares donde se considera conveniente realizar observaciones y registros de manera regular y programada, son estrechos, pasos y canales y aquellos identificados como áreas de surgencia persistente. Específicamente, se debe medir en la boca, en la parte media y en el extremo interior del Golfo de California; también a lo largo de por lo menos 10 transectos (al menos de 250 km de longitud) perpendiculares a la costa mexicana del Pacífico, uniformemente espaciados, desde la frontera con Estados Unidos hasta la frontera con Guatemala.

El Golfo de Tehuantepec es un área de singular interés en virtud de que se conecta meteorológicamente con el Golfo de México durante la temporada de 'nortes'. Esta señal es muy rica en información climática.

En el Golfo de México es necesario realizar observaciones y registros en el Canal de Yucatán, en por lo menos 10 transectos (de al menos 250 km de longitud) perpendiculares a la franja costera, espaciados de manera regular desde Tampico hasta Chetumal; uno de éstos desde Tuxpan, Veracruz, hasta

el Arrecife de Alacranes, sobre la Plataforma de Yucatán. Además, se deben hacer las observaciones y mediciones marinas pertinentes para la detección y seguimiento de los anillos anticiclónicos que se generan intermitentemente en el Golfo de México. Hay también, en la frecuencia, magnitud e intensidad de éstos, una señal climática muy importante.

Las observaciones sistemáticas que se realicen deben ser tales que la resolución espacial y temporal de las series de tiempo que de ellas resulten, permitan identificar con claridad señales oceánicas estacionales, anuales, interanuales y decadales. Ello implica, por ejemplo, que si se 'siembran' anclajes de correntímetros, éstos se mantengan en servicio por un periodo de al menos tres años.

El registro sistemático y regular del nivel del mar, que debería efectuarse en todos los puertos de México, es una señal de importancia fundamental para el estudio del clima oceánico y del cambio climático. Sus fluctuaciones de muy baja frecuencia (o largo plazo), una vez filtradas las mareas, están correlacionadas con cambios en la presión atmosférica a nivel del mar (efecto del barómetro invertido), con la expansión térmica del agua de mar y con los cambios en las corrientes marinas. La instrumentación científica para registrar y medir el nivel del mar es asequible y se puede instalar en casi cualquier lugar de la costa o en aguas someras. Todo proyecto de investigación integral del cambio climático que se precie sensato debe examinar la variable 'nivel del mar' con todo detalle (Gallegos *et al.* 1993).

Los acervos históricos nacionales de información meteorológica y oceanográfica existentes en la actualidad deben someterse a un nuevo análisis, si es que ya antes han sido analizados, para extraer de ellos la máxima información posible relativa al cambio de clima en la región mexicana y alimentar con ella a los modelos numéricos del clima más confiables. Los productos contribuirán, seguramente, a una predicción más acertada de los impactos potenciales, adversos o benéficos, que el cambio climático imponga en México.

## CONCLUSIONES

La circulación superficial del océano es una condición de frontera para los sistemas de corrientes marinas sobre la plataforma continental que afectan el equilibrio del agua dulce *versus* agua de mar de los ecosistemas costeros y modifican la ubicación y magnitud de los procesos costeros de sedimenta-

ción y erosión (Hendry 1993). La circulación superficial del océano es también determinante en la distribución de huevos y larvas y en los patrones de migración de especies marinas de importancia comercial; luego entonces, es un factor importante en la localización y comportamiento de las áreas de pesca. Más aún, los planes de contingencia para derrames marinos de sustancias contaminantes y el trazado de rutas óptimas para la transportación marítima se diseñan sobre la base de la mejor información regional posible de las condiciones meteorológicas y ambientales, incluyendo a las corrientes marinas. Luego entonces, es necesario conocer los cambios esperados en la circulación oceánica con el propósito de estar preparados para atenuar los impactos socioeconómicos negativos y para administrar los beneficios regionales que pueda traer consigo el cambio climático en México, principalmente en la zona costera.

Es por ello urgente e indispensable conocer, describir y entender la variabilidad de las condiciones oceanográficas de los mares mexicanos e indagar sobre sus tendencias a escalas climáticas. La caracterización de la estructura espacio-temporal del clima oceánico es crucial para la oportuna detección de cambios significativos en la circulación del estrato superficial de los mares mexicanos.

Si bien los modelos numéricos y la paleoclimatología son herramientas útiles para reconstruir escenarios posibles del clima regional, éstas no sustituyen de manera alguna los indispensables programas de observación, medición y registro sistemático de las variables ambientales elementales del SCG. En tanto estos programas, obligatorios e ineludibles, no se lleven a cabo de manera apropiada, será imposible hacer predicciones razonables y plausibles sobre los impactos potenciales que en México —sus tierras y sus aguas marinas— tendrá el inminente cambio climático global.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arrhenius, S. 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Phil. Mag.* 41: 237.
- Bolin, B. y E. Eriksson. 1959. Changes of the carbon content of the atmosphere and the sea due to fossil fuel combustion. In: Bolin, B. (ed.), *The atmosphere and the sea in motion*. Rossby Memorial Volume. New York: The Rockefeller Institute Press.
- Broecker, W. S. 1982. Glacial to interglacial changes in ocean chemistry. *Progress in Oceanography* 11(2): 151-197.



- Butzer, K. M. 1964. *Environments and Archaeology*. Chicago: Aldine Publishing Co.
- Callendar, G. S. 1938. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 64: 223.
- Gallegos, A., S. Czitrom, J. Zavala y A. Fernández. 1993. Scenario modeling of climate change on the ocean circulation of the Intra-Americas Sea. En: G. A. Maul (ed.). *Climate Change in the Intra-Americas Sea*. London: Edward Arnold Publishers.
- Harris, S. A. y R. W. Fairbridge. 1967. Ice-age climatology. In: R. W. Fairbridge (ed.) *The Encyclopedia of Atmospheric Sciences and Astrogeology*. London: Reinhold Publishing Corp.
- Hendry, M. 1993. Sea-level movements and shoreline change. En: G. A. Maul (ed.). *Climate Change in the Intra-Americas Sea*, London: Edward Arnold Publishers.
- Jones, P. D. y T. M. L. Wigley. 1990. Global warming trends. *Sci. Am.* 263(2): 66-73.
- Kellog, W. W. 1977. Effects of human activities on global climate. Geneva: WMO *Tech. Note No. 156*.
- Kraus, E. B. 1982. Oceanic variability on climatic scales. *Progress in Oceanography* 11(2): 61-68.
- Lamb, H. H. 1964. The role of atmosphere and oceans in relation to climatic changes and the growth of ice-sheets on land. In: *Problems in Paleoclimatology*. London: John Wiley & Sons, Interscience.
- Palutikof, J. P., T. M. L. Wigley y J. M. Lough. 1984. *Seasonal scenarios for Europe and North America in a high-CO<sub>2</sub> warmer world*. U.S. Dept. of Energy, Carbon Dioxide Research Division. Tech. Report TR012.
- Revelle, R. y H. E. Suess. 1957. Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> during the past decades. *Tellus* 9:18.
- Schneider, S. H. 1989. The changing climate. *Sci. Am.* 261 (3): 38-47.
- SCOPE, B. Bolin (editor). 1986. *The greenhouse effect, climatic change and ecosystems*. Great Britain: John Wiley and Sons Publisher.
- Williams, J. y T. M. L. Wigley. 1983. A comparison of evidence for late Holocene summer temperature variations in the Northern Hemisphere. *Quaternary Res.* 20: 286-307.

## Notas

---

\* Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.



# Investigaciones de los glaciares y del hielo de los polos

*Lorenzo Vázquez Selem\**

## LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS DEL CUATERNARIO Y LAS GLACIACIONES

A MEDIADOS DEL SIGLO XIX, algunos naturalistas europeos que realizaban observaciones en la región de los Alpes notaron que existían huellas de una extensión de los glaciares mucho mayor a la de entonces. Bloques de roca de grandes dimensiones situados lejos de su lugar de origen, extensos depósitos sedimentarios formados por mezclas caóticas de rocas de todos tamaños, y una variedad de formas de relieve muy características, sugerían la presencia de masas de hielo en movimiento (glaciares) en sitios para entonces cubiertos por bosques, prados, campos de cultivo y poblados. Este descubrimiento, que tardó varias décadas en ser plenamente aceptado por la comunidad científica, representó una revolución en las ciencias naturales, pues implicaba que el paisaje había sufrido cambios dramáticos en épocas geológicas relativamente recientes (ver el capítulo *Evidencia del cambio climático: cambios en el paisaje* de S. Lozano, en esta sección). A finales del siglo XIX ya habían sido identificadas en los Alpes y en el norte de Europa huellas de cuatro etapas de avance de los hielos, llamadas genéricamente *glaciaciones*, separadas por periodos de clima más cálido o *interglaciales*. Muy pronto ese mismo patrón se detectó en las montañas y zonas boreales de Norteamérica y gradualmente en otras zonas del planeta.

Tal vez la consecuencia más importante del descubrimiento de las glaciaciones fue la idea de que el clima terrestre había variado significativamente en tiempos recientes, ya que la presencia de extensos glaciares era incompatible con el clima templado vigente en las latitudes medias del planeta. Así, desde fines del siglo XIX se estableció la noción de que el clima

del planeta está sujeto a fluctuaciones mayores con una periodicidad de cientos de miles de años. Con esta idea en mente, los geólogos subdividieron la era Cenozoica (últimos 60 millones de años) en dos periodos: Terciario y Cuaternario, el último de los cuales se inició hace unos dos millones de años y se caracteriza fundamentalmente por las glaciaciones. A su vez, el Cuaternario se subdividió en dos épocas: el Pleistoceno, que consiste en varias fases glaciales e interglaciales, y el Holoceno, que se inició hace unos 10 mil años al finalizar la más reciente de las glaciaciones y que continúa hasta hoy. Vivimos entonces en una fase interglacial que tarde o temprano dará paso a un nuevo periodo frío.

Acerca de las causas de estas fluctuaciones climáticas de largo periodo se han formulado diversas hipótesis. La más aceptada se refiere a las variaciones en la radiación solar que llega a la Tierra como resultado de cambios cíclicos en la órbita del planeta en relación con el Sol. Éstos incluyen cambios graduales en la forma de la órbita (variando de un círculo a una elipse); cambios en la inclinación del eje terrestre, y cambios en el punto de la órbita en que ocurren los equinoccios y solsticios. Estos tres tipos de variaciones tienen ciclos de diferente duración y ocurren simultáneamente, produciendo un patrón muy complejo cuya explicación detallada escapa a los fines de este capítulo. Lo que interesa destacar aquí es que los cambios orbitales generan variaciones en la cantidad de radiación que llega a una zona determinada de la Tierra. Por ello, en ciertos periodos las zonas de latitud alta han recibido menos radiación, sus climas se han enfriado y partes de ellas se han cubierto de glaciares. El enfriamiento se ha generalizado en todo el planeta mediante de complejos mecanismos de la circulación atmosférica y oceánica.

En el último tercio del siglo xx, los estudios de las evidencias de glaciación en los continentes, pero sobre todo los realizados en núcleos de sedimentos extraídos de los fondos marinos, mostraron que durante el Cuaternario han ocurrido cerca de veinte y no sólo cuatro fases de enfriamiento planetario, separadas por fases de calentamiento, cada una con duración de varias decenas de miles de años. Todo ello en concordancia con las variaciones orbitales del planeta (Imbrie e Imbrie 1979).

En las dos décadas pasadas se han hecho descubrimientos de gran trascendencia sobre la naturaleza de los cambios climáticos. Por un lado, se ha detectado que dentro de las fases glaciales e interglaciales existen fluctuaciones climáticas muy pronunciadas con duración de mil-dos mil años hasta unos cuantos siglos, y que en muchos casos el tránsito de un estado del

clima hacia otro radicalmente diferente puede ocurrir en unas cuantas décadas o incluso en pocos años, es decir de manera abrupta. Por ejemplo, entre los siglos XVI y XIX, ocurrió un episodio conocido como la *Pequeña Edad Glacial*, que, según los registros históricos, meteorológicos y geológicos de muchas partes del mundo, se caracterizó por un clima más frío que antes y después (Grove 1988). Así pues, hay cambios climáticos de escala milenaria y centenaria que se superponen a los de origen orbital de ciclo mucho más largo. Estudios recientes sugieren que ocurren con un periodo de alrededor de 1,500 años, tal vez relacionados con fluctuaciones en la actividad solar (Bond *et al.* 2001). Sin embargo, existen mecanismos complejos en el sistema climático que transmiten y amplifican los cambios de origen orbital o solar. La circulación de los océanos parece ser el más importante de ellos.

Otro descubrimiento reciente de gran importancia es que las zonas intertropicales no han permanecido ajenas a los cambios climáticos del Cuaternario, en contraste con la idea hasta hace poco dominante de que habían sido climáticamente estables. Si bien los avances de los glaciares en los trópicos se limitaron a montañas de gran altitud, los climas pleistocénicos intertropicales fueron significativamente más fríos y generalmente más secos que los actuales. Más aún, inspirados en los recientes descubrimientos sobre el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (ver el capítulo *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad climática y el cambio climático en México*, de V. Magaña *et al.*, en la sección III), los científicos han comenzado a explorar la posibilidad de que el cambio climático global esté controlado en gran medida por lo que ocurre en los trópicos, en especial por las fluctuaciones térmicas de los océanos tropicales (Kerr 2001).

Muchos de los cambios climáticos planetarios o regionales antes mencionados han podido ser detectados o corroborados por medio de la reconstrucción de las fases de glaciación. El siguiente apartado expone los fundamentos de este método.

## LAS FLUCTUACIONES DE LOS GLACIARES COMO INDICADORES DE CAMBIOS CLIMÁTICOS

Los glaciares son masas de hielo formadas por la acumulación prolongada de nieve y su transformación en hielo. Estas masas se deforman y desplazan lentamente por efecto de la gravedad sobre las laderas y en ocasiones simplemente por su propio peso. De manera general existen dos tipos de

glaciares: los casquetes de hielo, como los de Groenlandia y la Antártida (o los ya desaparecidos de Norteamérica y norte de Europa), que se forman a manera de domos sobre grandes extensiones continentales en latitudes altas y pueden alcanzar hasta miles de metros de espesor; y los glaciares de montaña o alpinos, asociados a climas fríos y topografías abruptas propias de las altas montañas del mundo a cualquier latitud, que normalmente tienen varias decenas de metros de espesor y longitudes entre algunos cientos de metros y varios kilómetros.

En los glaciares se distingue un sector superior donde predomina la acumulación neta de nieve y hielo, y un sector inferior donde el clima es menos frío y por consiguiente predomina la ablación o pérdida de masa por fusión y sublimación. Estas dos zonas están separadas por una franja estrecha denominada *línea de equilibrio*, que en los glaciares de montaña corresponde aproximadamente con una temperatura media de verano de 0°C. Cuando el clima se torna más frío y/o aumenta la precipitación en forma de nieve, la zona de acumulación se expande ladera abajo. En otras palabras, la *línea de equilibrio* desciende en altitud, lo que significa que el frente del glaciar puede alcanzar cotas más bajas, produciéndose entonces un *avance glacial*. Cuando, por el contrario, la temperatura regional aumenta y/o disminuye la precipitación sólida, la línea de equilibrio asciende en altitud y el frente del glaciar migra hacia cotas cada vez más altas, lo cual se denomina *retroceso glacial*.

Se sabe entonces que la temperatura de una región y, en menor medida, la precipitación sólida (nieve o granizo), controlan la expansión y la retracción de ambos tipos de glaciares (si bien los de montaña son más sensibles a los cambios climáticos debido a sus menores dimensiones). Por ello al reconstruir la extensión de glaciares del pasado es posible reconstruir de manera indirecta las fluctuaciones del clima. Por ejemplo, entre las evidencias más concluyentes de la *Pequeña Edad Glacial* están los avances de los glaciares en la región de los Alpes registrados en pinturas y descripciones de la época (Grove 1988). De manera similar, una de las pruebas más tangibles del calentamiento global durante el siglo xx es el retroceso acelerado de los glaciares de montaña en casi todo el mundo, incluyendo México y otras zonas tropicales (Kaser 1999).

Para periodos sin evidencias documentales (como documentos históricos, descripciones, pinturas, fotografías, etc.), los estudios de las fluctuaciones de los glaciares se basan en evidencias geológico-geomorfológicas; es decir, en la identificación, mapeo y fechamiento de los sedimentos deposi-

tados por los hielos en sus márgenes (llamados morrenas). Esto permite ubicar aproximadamente la altitud a la que se encontraba la *línea de equilibrio* de los glaciares en una época determinada. Con base en la coincidencia entre esta línea y la temperatura de verano de 0°C, y tomando como referencia la altitud a la que ocurre hoy en día ese mismo valor de 0°C, es posible estimar el descenso de temperatura asociado a determinada extensión de los glaciares.

Como se mencionó antes, durante el Cuaternario ocurrieron numerosas fases de enfriamiento. Sin embargo, el registro de glaciaciones en los continentes es limitado debido a que las huellas de un avance de los hielos tienden a ser destruidas por la acción erosiva y acumulativa del siguiente. Con todo, quedan claras evidencias de varias glaciaciones en los últimos 500 mil años. Las reconstrucciones más detalladas obviamente se han logrado para la más reciente, llamada *Wisconsin* en Norteamérica y *Wurm* en Europa, que se desarrolló entre 120,000 y 10,000 años antes de hoy con varias etapas de expansión y contracción de los hielos. Los casquetes de hielo continentales de Norteamérica y el norte de Europa alcanzaron su máxima extensión y espesor hace unos 21,000 años, fase que se denomina Último Máximo Glacial Global (UMMG), cuando había tal cantidad de agua almacenada en forma de hielo sobre los continentes que el nivel se encontraba 130 m por debajo del actual. Hace unos 9,000 años quedaban sólo restos de estos casquetes de hielo.

Los glaciares de montaña en algunas zonas alcanzaron su máxima expansión hace 75,000-65,000 años, en otras alrededor del UMMG, pero aparentemente en todo el mundo avanzaron entre 18,000 y 16,000 años antes del presente, para luego contraerse o desaparecer en forma abrupta (Clapperton 1997). La reconstrucción de los glaciares de montaña sugiere que durante el UMMG las temperaturas medias eran alrededor de 6°C más bajas que las actuales, en zonas tanto templadas como tropicales. Posteriormente, los glaciares de todo el mundo han presentado avances relativamente menores, el último de los cuales corresponde a la *Pequeña Edad Glacial*. Para esta fase se ha calculado un descenso altitudinal de los glaciares de 100-200 m, equivalentes a un enfriamiento de 0.5-1.2°C (Porter 1986).

En México, las evidencias de glaciación se limitan a las trece montañas con más de 3,800 m de altitud, todas ellas ubicadas en el Sistema Neovolcánico Transversal. El autor ha reconstruido las fases de glaciación y descensos térmicos asociados en el volcán Iztaccíhuatl (5,286 m) para los

CUADRO 1. AVANCES GLACIALES DEL IZTACCÍHUATL EN LOS ÚLTIMOS 30,000 AÑOS Y DESCENSO TÉRMICO ESTIMADO (DATOS DEL AUTOR)

AVANCE GLACIAL	EDAD (AÑOS ANTES DEL PRESENTE)	LÍMITE INFERIOR DE LOS GLACIARES (MSNM)	ALTITUD DE LA LÍNEA DE EQUILIBRIO DE LOS GLACIARES (MSNM)	DESCENSO ESTIMADO DE TEMPERATURA (°C)
Presente	40 (año 1960)	4,860	4,970	0
Ayoloco	400 - 100	4,510	4,715	1.5
Milpulco-2	8,400 - 7200	4,050	4,420	3.3
Milpulco-1	12,000 - 10,000	3,810	4,240	4.4
Hueyatlaco-2	17,000 - 14,000	3,500	4,040	5.6
Hueyatlaco-1	20,000 - 17,500	3,390	3,940	6.2

Hoy en día en México sólo existen glaciares en las tres montañas con altitud superior a los 5,000 m; a saber: el Pico de Orizaba (5,675 m), el Popocatepetl (5,452 m) y el Iztaccíhuatl (5,286 m). Su área total en 1960 era de apenas 11.4 km<sup>2</sup> (Lorenzo 1964).

últimos 20,000 años (cuadro 1). Estos datos deben ser extrapolables a otras montañas y en general a todo el centro del país, ya que los avances glaciales obedecen al clima regional. Investigaciones similares se han realizado antes en el mismo Iztaccíhuatl y en otras montañas de la zona (White 1987 y Heine 1994), aunque con menos exactitud en los fechamientos. En general existe coincidencia en la magnitud de los avances glaciales de México respecto a los de otras zonas tropicales y templadas, lo cual indica que se trata de fenómenos de alcance global controlados por el clima.

## EL RETROCESO RECIENTE DE LOS GLACIARES EN EL MUNDO Y EN MÉXICO

Desde mediados o fines del siglo XIX, pero en especial durante las últimas décadas, los glaciares en casi todo el mundo han retrocedido –muchos hasta el punto de desaparecer– como resultado del aumento global de las temperaturas. Este fenómeno, que representa una de las evidencias más notables de los cambios climáticos recientes y en curso, ha sido especialmente acentuado en las montañas de los trópicos (Kaser 1999) y se observa claramente en México. Esto se debe a que en los trópicos el calentamiento se



amplifica con la altitud a causa del aumento conexo de la humedad atmosférica (Beniston *et al.* 1997).

El aumento de la temperatura parece ser la causa dominante, aunque no única, del retroceso. No hay duda de que los glaciares continuarán contrayéndose en una escenario de calentamiento global, aun cuando la precipitación también aumentase localmente en algunos glaciares.

Los casquetes de hielo de Groenlandia y la Antártida representan 96% del área cubierta por glaciares en el planeta y el 99% del volumen de agua terrestre en forma de hielo. Por ello su contracción es de interés no sólo como indicador del cambio climático, sino sobre todo por sus consecuencias potenciales. Se estima que la fusión total del casquete de la Antártida (21.5 millones de km<sup>3</sup> de agua) ocasionaría un ascenso del nivel del mar global de unos 59 m, y en el caso de Groenlandia (2.38 millones de m<sup>3</sup>), de unos 6 m (Sugden y John 1976). En contraste, la fusión total del resto de los hielos del mundo provocaría un ascenso de solamente 0.3 a 0.7 m. Aunque estos escenarios extremos son improbables, sí existe una tendencia general hacia la fusión de parte de este hielo como resultado del calentamiento global, con los consecuentes riegos de ascenso del nivel marino e inundación de las tierras bajas adyacentes al océano. De hecho, el nivel global del mar aumentó entre 10 y 20 cm durante los últimos 100 años (Oerlemans y Fortuin 1992). Si bien el calentamiento global puede incrementar la precipitación sobre partes del casquete de la Antártida y engrosarlo, en general las proyecciones indican una disminución en los volúmenes de hielo y un aumento del nivel del mar en el rango de 0.09 a 0.88 m hacia el año 2100 (McCarthy *et al.* 2001).

En glaciares de montaña de zonas templadas del Hemisferio Norte la altitud de la línea de equilibrio ha ascendido 100-200 m desde el máximo avance de la Pequeña Edad Glacial a mitad del siglo XIX (Porter 1986). El retroceso de los glaciares no ha sido continuo, sino más bien interrumpido por cortas fases de avance (1880-1890, 1900-1910, 1915-1930, 1960-1980) tanto en zonas templadas como en tropicales (Porter 1986 y Kaser 1999). En los trópicos las fluctuaciones han obedecido a distintas (y a veces complejas) combinaciones de factores. El retroceso ocurrido durante la segunda mitad del siglo XIX parece haberse debido a una disminución en la humedad atmosférica; el de 1930-1950, a un aumento de la temperatura combinado con menor humedad atmosférica; el ligero avance de 1960-1980 coincide con aumentos en la precipitación; y el acelerado retroceso desde

1980 resulta de un aumento de temperaturas combinado con un aumento de la humedad atmosférica (Kaser 1999).

Durante la Pequeña Edad Glacial los glaciares de las tres montañas más altas de México descendieron hasta una altitud de  $\sim 4,500$  m. En el Iztaccíhuatl, la línea de equilibrio se encontraba en promedio a 4,715 m; es decir, unos 300 m más abajo que en la actualidad. El glaciar de Ayoloco, el más extenso de esa montaña, descendía hasta 4,300 m y su línea de equilibrio se hallaba a 4,675 m. No se sabe lo ocurrido en la segunda mitad del siglo XIX, pero en 1898 el frente se encontraba a 4,465 m; en 1953, a 4,660 m; y en 1960, a 4,725 m. En total, entre 1898 y 1960 el frente del glaciar de Ayoloco retrocedió 260 m en altitud y 810 m en distancia, a razón de 13 m/año (White 1981). Para mediados de 1980, dos de los nueve glaciares existentes en el Iztaccíhuatl en 1960 habían desaparecido y uno más estaba cerca de desaparecer (Delgado *et al.* 1985). Mediciones preliminares del autor indican una reducción de cerca de 40% en el área cubierta por glaciares en el Iztaccíhuatl entre 1960 y 1983. En el Popocatepetl, la tendencia ha sido similar, aunque modificada por la actividad eruptiva de 1919-1921 y la registrada desde 1994 (Delgado 1997). En el Pico de Orizaba también se ha observado una acelerada contracción en las últimas décadas (Palacios y Vázquez-Selem 1996). A las tasas actuales de retroceso, es posible que los glaciares mexicanos desaparezcan por completo en menos de 30 años.

## LOS HIELOS ACTUALES: UN ARCHIVO DE LA HISTORIA CLIMÁTICA DEL PLANETA

En climas fríos extremos como los de los polos y las cimas de las altas montañas, cada año se acumula una capa de nieve que gradualmente se transforma en hielo por efecto de la compactación y la recristalización. Al igual que las capas de sedimentos de mares y lagos, estas sucesiones de capas de hielo contienen evidencia detallada de las fluctuaciones ambientales de los últimos miles o decenas de miles de años, con una precisión en muchos casos anual para los últimos siglos. Mediante perforaciones en los casquetes de los polos y en los glaciares de algunas montañas de gran altura se han obtenido muestras de estos hielos, denominadas *núcleos de hielo*. Entre los más importantes están el núcleo Vostok de la Antártida, con un registro de más de 400 mil años; y los núcleos GRIP y GISP de Groenlandia, con más de 100 mil años, todos ellos con más de 300 m de profundidad. Varios núcleos

más cortos pero con información invaluable han sido obtenidos en glaciares tropicales y subtropicales del Tibet y los Andes y abarcan desde algunos siglos hasta más de 20 mil años (Bradley 1999).

El hielo de los glaciares consiste mayoritariamente en agua, pero también contiene impurezas tales como burbujas de aire, iones disueltos y partículas sólidas. El análisis de estas impurezas, así como la composición molecular del hielo mismo, proporciona información sobre los cambios ambientales pasados y presentes.

La composición isotópica del hielo permite reconstruir la temperatura que existía al momento de producirse la precipitación, ya que de la temperatura depende la proporción de uno u otro isótopo de oxígeno presente en las moléculas de agua, en particular qué tan abundante es el isótopo  $^{16}\text{O}$  con relación al  $^{18}\text{O}$ . De este modo, las capas anuales sucesivas producen un registro continuo de los cambios de temperatura en la región del glaciar. Las burbujas de “aire fósil” atrapadas en el hielo representan muestras de la composición de la atmósfera del tiempo en que ocurría la precipitación. Su análisis ha mostrado que el contenido de “gases invernadero” tales como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ) ha variado sustancialmente en el tiempo, haciendo posible determinar el papel que estos gases han tenido en las fases de calentamiento y enfriamiento climático. El estudio de las variaciones en la concentración de polvo atmosférico y de iones solubles en el hielo arroja información sobre los cambios en intensidad y dirección de la circulación atmosférica, mientras que la presencia de partículas de ceniza volcánica y los picos de acidez (asociados a  $\text{SO}_2$ ) registran el depósito de aerosoles inyectados a la atmósfera por erupciones volcánicas.

De particular importancia son los núcleos de hielo extraídos en montañas tropicales y subtropicales, pues muestran que los trópicos han registrado cambios climáticos similares a los de otras zonas del planeta (Thompson *et al.* 1998). Por ejemplo, los núcleos del Huascarán (Perú) y del Nevado Sajama (Bolivia) indican temperaturas 8-12°C más bajas durante la última glaciación, y presentan clara evidencia de enfriamientos durante la Pequeña Edad Glacial. Asimismo, contienen un registro de cambios climáticos abruptos (como el inicio y el final de la Pequeña Edad Glacial), de periodos de sequía y de mayor humedad, que muestran que el calentamiento planetario afecta de manera especialmente acentuada a los trópicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, D.E. 1997. Younger Dryas research and its implications for understanding abrupt climatic change. *Progress in Physical Geography* 21(2): 230-249.
- Beniston, M., H.F. Diaz y R.S. Bradley. 1997. Climatic change at high elevation sites: an overview. *Climatic Change* 36: 233-251.
- Bond, G. 2001. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science* 294(5549): 2130-2136.
- Bradley, R. S. 1999. *Paleoclimatology : reconstructing climates of the quaternary*. San Diego: Academic Press.
- Clapperton, C.M. 1997. Fluctuations of local glaciers 30-8 K BP: Overview. *Quaternary International* 38/39: 3-6.
- Delgado, H. 1997. The glaciers of Popocatépetl volcano (Mexico): changes and causes. *Quaternary International* 43/44: 53-60.
- , R. Arciniega y D. Calvario. 1985. Los glaciares del Popocatépetl y el Iztaccíhuatl. *GEOS Boletín: Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana*. Oaxaca, México.
- Grove, J. M. 1988. *The Little Ice Age*. London : Methuen.
- Heine, K. 1994. Present and past geocryogenic processes in Mexico. *Permafrost and Periglacial Processes* 5: 1-12.
- Imbrie, J. y K. P. Imbrie. 1979. *Ice Ages. Solving the mystery*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kaser, G. 1999. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change* 22: 93-103.
- Kerr, R. A. 2001. The tropics return to the climate system. *Science* 292(5517): 660-661.
- Lorenzo, J. L. 1964. *Los glaciares de México*. México: Monografías del Instituto de Geofísica, 1. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Oerlemans, J. y J. P. F. Fortuin. 1992. Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming. *Science* 258: 115-117.
- Palacios, D. and L. Vázquez-Selem. 1996. Geomorphic effects of the retreat of Jamapa Glacier, Pico de Orizaba Volcano (Mexico). *Geografiska Annaler* 77(A): 19-34.
- Porter, S. C. 1986. Pattern and forcing of Northern Hemisphere glacier variations during the last millennium. *Quaternary Research* 26: 27-48.
- Sugden, D. E. y B. S. John. 1976. *Glaciers and landscape. A geomorphological approach*. London: Edward Arnold.
- Thompson, L. G. *et al.* 1998. A 25,000-year tropical climate history from Bolivian ice cores. *Science* 282(5395): 1858-1864.

- White, S. E. 1981. Neoglacial to recent glacial fluctuations on the volcano Popocatépetl, Mexico. *Journal of Glaciology* 2796: 356-363.
- . 1987. Quaternary glacial stratigraphy and chronology of Mexico. *Quaternary Science Reviews* 5(1-4): 201-205.

## Notas

---

\* Instituto de Geografía, UNAM.



# Evidencia de cambio climático: cambios en el paisaje

*Ma. Socorro Lozano García\**

*Las temperaturas medias globales se han incrementado durante el último milenio al igual que la concentración de los gases de invernadero. Tales cambios son consecuencia de la actividad humana pero éstos están superpuestos o subyacentes a las variaciones naturales. ¿Cómo podemos discernir entre lo natural y lo inducido? (PAGE, 2000)*

## ANTECEDENTES

AÑO CON AÑO observamos fluctuaciones en el clima; así, un invierno se presenta más frío que el precedente. Estas alteraciones climáticas pueden ser más o menos dramáticas, como ocurre durante el fenómeno de El Niño (ver el capítulo *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad climática y el cambio climático en México*, de V. Magaña *et al.*, en la sección III). El registro instrumental de dichas variaciones climáticas nos permite tener datos sobre cambios en temperatura y precipitación durante periodos variables. Así, en México, por ejemplo, se tienen datos de los últimos 100 años, mientras que en otras regiones, como en Europa, los registros escritos acerca de los cambios en el clima abarcan periodos más amplios (ver el capítulo *La variabilidad climática en los registros instrumentales de México*, de E. Jáuregui, en la sección III). Un conjunto de documentos que ofrece datos sobre las cosechas de uvas en Francia, provee de información sobre el clima desde el siglo XVI. Se han comparado estos registros con los datos sobre cosechas de cereales para los mismos años y se ha obtenido un patrón general.

Cuando la cosecha de uvas era tardía y la de cereales muy pobre, los veranos eran húmedos y fríos; una buena cosecha de uvas correspondía a veranos secos y cálidos. Durante la llamada pequeña edad de hielo, de *ca.* (del latín *circa*, que significa aproximadamente) 1400 a *ca.* 1800, las condiciones climáticas fluctuantes en Europa afectaron a la población, causando inundaciones, sequías, hambruna y epidemias, y matando a gran número de personas (Fagan 2000). Contrasta este periodo de climas fríos e impredecibles con el precedente, denominado el periodo cálido medieval, durante el cual los vikingos migraron a Islandia y Groenlandia y realizaron viajes a la costa de Norteamérica. Esta variación o cambio climático natural en ocasiones está superpuesto al cambio climático inducido por las actividades humanas; a veces exacerbando la respuesta del sistema o atenuándola (ver el capítulo *¿Qué es el efecto invernadero?*, de R. Garduño, en esta sección).

El análisis de estos registros instrumentales e históricos muestra la variabilidad constante del clima, periodos cálidos y húmedos que pueden durar décadas o centurias son seguidos de climas fríos y secos. La historia del cambio climático en periodos más amplios está escrita en otro tipo de archivos, como son los núcleos de hielo (ver el capítulo *Investigaciones de los glaciares y del hielo de los polos*, de L. Vázquez, en esta sección), los sedimentos oceánicos y lacustres, corales y anillos de árboles (Alley 2000). Estos archivos naturales guardan información sobre los cambios ambientales pasados de los diferentes componentes del sistema Tierra: atmósfera, criosfera, océano y biosfera (Bradley 1999). El estudio de los “paleo” registros abre posibilidades para comprender cómo funciona el sistema climático terrestre, cuáles son los mecanismos que disparan los cambios y cuáles son los procesos de retroalimentación positiva y negativa. La información contenida en estos archivos se descifra y los datos cuantitativos se traducen en términos de parámetros ambientales y así se emprende la tarea de reconstruir los ambientes pasados. La perspectiva paleo del cambio climático permite obtener información que es traducida y empleada para calibrar los modelos de predicción climática; estos modelos son probados para verificar si son capaces de reproducir los climas del pasado.

El clima varía en diferentes escalas temporales, desde fluctuaciones interanuales hasta variaciones en escalas de millones de años. Existe un conjunto de mecanismos generadores de cambio climático que se divide en internos y externos, los cuales operan en distintas frecuencias y afectan de manera directa al sistema climático terrestre (Bradley 1999). El clima en la



Tierra ha variado de forma cíclica, de acuerdo con la investigación realizada en una amplia gama de paleorregistros estudiados en diferentes zonas del planeta. En general, los climas glaciales o fríos han sido los dominantes durante el último millón de años y los climas interglaciales o cálidos han sido más escasos y de corta duración. Cambios en la órbita terrestre alrededor del Sol modifican la distribución estacional de la energía radiante (mecanismo externo) que llega a nuestro planeta. Las fluctuaciones en los parámetros orbitales de la Tierra, como excentricidad, oblicuidad y precesión conducen al sistema climático a entrar y salir de condiciones glaciares de manera relativamente predecible.

A partir de las técnicas isotópicas desarrolladas para estimar temperaturas y el análisis de núcleos del fondo oceánico, se han obtenido importantes datos sobre las variaciones en temperatura. El análisis de éstos ha permitido tener información e inferir las variaciones en el volumen de hielo que ha existido sobre la Tierra durante los últimos 450,000 años. La modelación de los ciclos orbitales y su comparación con los valores de temperatura obtenidos de estos núcleos oceánicos, mostraron la existencia de una correlación alta con los ciclos de excentricidad de 100,000 años, de oblicuidad de 43,000, y de precesión de 23,000. No sólo la acumulación de hielo, sino también otros paleoindicadores de cambio climático, como la concentración de metano y  $\text{CO}_2$  de las burbujas atrapadas durante la acumulación de hielo en los casquetes polares, responden a estas periodicidades de las variaciones de la intensidad de la radiación solar.

Otro conjunto de factores modeladores del clima que se ha documentado son los mecanismos internos, como el efecto de la actividad volcánica, los cambios en la circulación oceánica y las variaciones en la actividad solar. Estos factores naturales producen variabilidad climática, pero en periodos más cortos.

La producción de millones de toneladas de gases y cenizas a la estratosfera como consecuencia de erupciones volcánicas, tiene efecto en el albedo, con la consecuente alteración del clima. La erupción del volcán El Chichón, el 4 de abril de 1982, produjo millones de toneladas de dióxido de sulfuro y en mayor cantidad la erupción del Monte Pinatubo en Filipinas en 1992. El efecto inmediato de las erupciones es un enfriamiento que se produce por la presencia de aerosoles en la atmósfera, aunque es de corto periodo, de dos a tres años. Los cambios en la composición de la atmósfera alteran el clima terrestre. La presencia de grandes cantidades de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  (ga-

ses de invernadero) en la atmósfera, modifica el balance energético de la Tierra, reduciendo la pérdida de calor.

Los océanos juegan un papel fundamental en el clima de la Tierra; cambios en la circulación oceánica alteran la circulación de las masas de aire. En los últimos años se han estudiado con detalle los núcleos de los océanos, descubriéndose una serie de cambios cíclicos en la circulación oceánica en escalas de tiempo de milenios, frecuentemente rápidos y abruptos. Los más notables son los denominados eventos Heinrich y los Dansgaard-Oeschger (D/O). Al final de la última glaciación, cuando se inició el calentamiento, alrededor de 14,000 años aP (antes del presente), el casquete polar se desintegraba, pero repentinamente hubo un enfriamiento en el clima del Atlántico del norte, Groenlandia y Europa. Condiciones frías, secas y ventosas retornaron al norte de Europa, donde la distribución de la vegetación cambió. Los bosques, que habían colonizado las áreas expuestas por la retirada de los hielos, fueron reemplazados por comunidades árticas y, en particular, se detecta en numerosos depósitos de esta edad el polen de una planta, *Dryas ocotopetala*, indicadora de condiciones muy frías. Este enfriamiento fue rápido y abrupto, estimándose una disminución de 6°C, y se le denomina evento Henricho o Younger Dryas. La terminación fue igual de rápida, ocurriendo un calentamiento de 7°C en sólo 50 años.

En los núcleos de hielo de Groenlandia, donde está “escrita” la historia climática de los últimos miles de años, se han detectado periodos de calentamiento rápido, con una duración de 1,500 años, a los que se ha dado el nombre de ciclos Dansgaard-Oeschger (D/O). Las evidencias indican que el mecanismo generador de estas fluctuaciones son los cambios en la circulación oceánica del Atlántico del Norte, debido a la descarga masiva de agua dulce procedente del casquete polar cuando hay un incremento en la temperatura, alterando la circulación profunda.

La correspondencia entre los cambios de los parámetros orbitales y formación de hielo, glaciares de montaña, distribución de las plantas, acumulación de polvo y concentración de gases de invernadero, muestra la interrelación del sistema Tierra (PAGES 2000). El conjunto de paleorregistros ofrece una perspectiva más amplia del cambio climático. Estos datos revelan que el clima en la Tierra no ha sido estable; cambia de un estado glacial a interglacial, dependiendo de factores tanto externos como internos. Los trabajos de investigación en paleoclimatología están dirigidos a descifrar los indicadores de cambio climático.

Un aspecto fundamental para la historia climática es el contar con una escala temporal, o cronología precisa, para situar en el tiempo los eventos que se

documentan. Al analizar un cierto fósil, no sólo es necesario conocer las condiciones ambientales en las que se desarrolló, por ejemplo temperatura, sino que es también fundamental determinar la edad de dicho organismo. Un marco cronológico adecuado permite establecer el momento en el que ocurren los eventos. También permite la comparación de estos eventos en áreas distantes, con otros archivos provenientes de ambientes distintos, como son el marino y el terrestre, lo que lleva a determinar si la señal climática es o no sincrónica.

El conjunto de métodos para fechamiento se divide en cuatro categorías: (1) radioisotópicos: se basan en medir la tasa de desintegración atómica de los isótopos radioactivos ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ , series de Uranio, termoluminiscencia, trazas de fisión); (2) paleomagnético: donde se estudió los efectos del campo magnético de la Tierra en una muestra; (3) químicos: se analizan los cambios químicos en lapsos en las muestras; y (4) biológicos: estos métodos consisten en estimar el tamaño o crecimiento de una planta como índice de la edad de la misma.

El método de fechamiento más ampliamente usado es el  $^{14}\text{C}$ , ya que se encuentra en una variedad de muestras como son los huesos, turbas, conchas, paleosuelos, sedimentos lacustres, materia orgánica como semillas y polen, agua marina y dulce, y en el  $\text{CO}_2$  atrapado en los hielos.

La tasa de decaimiento de un isótopo es constante independientemente de las condiciones físicas y/o químicas. El tiempo que le toma a un isótopo radioactivo decaer hasta la mitad de la cantidad inicial se denomina vida media, y para el  $^{14}\text{C}$  es de 5730 años. La fuente natural de  $^{14}\text{C}$  es el bombardeo del  $\text{N}^2$  atmosférico por los rayos cósmicos. Una vez que se forma el  $^{14}\text{C}$ , éste es asimilado por los organismos a la misma velocidad que los otros isótopos del carbono, que son el  $^{12}\text{C}$  y  $^{13}\text{C}$ . Cuando, por ejemplo, la planta muere y deja de realizar la fotosíntesis y la respiración, parando el intercambio y consumo de carbono, en ese momento la planta tiene la misma proporción de  $^{14}\text{C}$  que la atmósfera. Al morir, se inicia el funcionamiento del reloj radioactivo con el decaimiento de  $^{14}\text{C}$ , que consiste en la emisión de una partícula beta (un electrón); por lo que la proporción de  $^{14}\text{C}$  en una muestra dependerá del tiempo.

## REGISTROS TERRESTRES

En los continentes, aparte de la información sobre temperaturas que ofrecen los glaciares de montaña, la mayor parte de datos paleoclimáticos proviene de los restos de plantas. La vegetación está en sintonía con su entorno,

y cambios en la humedad y/o temperatura actuarán modificando la composición y la distribución de las comunidades vegetales. Para los ambientes terrestres, los sedimentos que se depositan en los fondos de los lagos son una valiosa fuente de información paleoclimática y paleoecológica. Dichos sedimentos lacustres poseen un conjunto de datos o líneas de evidencia sobre el cambio climático. Mediante su estudio es posible estimar paleotemperaturas con el empleo de métodos isotópicos, tasas de erosión, información sobre composición y variación de los componentes de los ecosistemas acuáticos y terrestres, y cambios en los niveles lacustres que se interpretan en términos de cambios en la precipitación.

El polen es un indicador de cambio climático ampliamente usado en las investigaciones sobre la historia de la vegetación de los últimos miles de años. Estos microfósiles abundan en los sedimentos lacustres y están presentes en secuencias estratigráficas donde registran los cambios de la vegetación de manera continua durante largos periodos. La palinología es la disciplina que estudia la distribución y composición de estos microfósiles, aportando información paleoecológica valiosa.

La vegetación de un sitio produce granos de polen y esporas, los cuales son liberados al aire o a la tierra, para posteriormente ser transportados a un sitio de depósito, donde son preservados, archivándose el registro de la vegetación. La composición de los conjuntos polínicos o lluvia de polen variará dependiendo de la comunidad vegetal que los produzca (figura 1). Existen diferencias en la producción y dispersión de polen entre las plantas, por lo que su representación en los depósitos puede variar. Para resolver este problema se analizan las lluvias de polen de la vegetación productora y se establecen las relaciones entre los datos polínicos y la frecuencia de las plantas por medio de métodos estadísticos. Los conjuntos polínicos son un reflejo de la vegetación productora, y ésta se desarrolla bajo ciertas condiciones climáticas. Estos datos polínicos, que son porcentajes de polen, son entonces utilizados para calibrar las lluvias de polen fósiles que se recuperan de los depósitos, posibilitando por lo tanto hacer inferencias sobre los climas pasados.

Con base en los datos palinológicos se ha reconstruido la vegetación de vastas zonas del planeta, en periodos clave para comprender el funcionamiento del sistema climático.

Hace 18,000 años, durante el máximo glacial, el casquete polar alcanzó su máximo desarrollo; en Norteamérica el hielo se extendió al sur, cubriendo la zona de los grandes lagos; el nivel del mar descendió 100 metros res-

pecto al nivel actual. Se establecieron condiciones extremadamente frías; la composición de la atmósfera se modificó, reduciéndose la concentración de  $\text{CO}_2$  y metano; para las latitudes medias, hay evidencia de abundante polvo, el cual fue transportado por intensos vientos, hay registro de este polvo tanto en los núcleos de hielo como en los sedimentos oceánicos.

La distribución de la vegetación cambió, debido a las condiciones climáticas, y la composición de los biomas se modificó. Como resultado del enfriamiento, los glaciares de montaña aumentan y los elementos de la vegetación descienden aproximadamente 1000 m. Se estima una disminución en la temperatura para las latitudes medias y bajas de  $5^\circ\text{C}$ , acompañada de reducción en la precipitación. Las zonas desérticas del norte de México y sudoeste de Estados Unidos soportan comunidades templadas, dada la migración al sur de los vientos del oeste. Los conjuntos de polen fósil en las

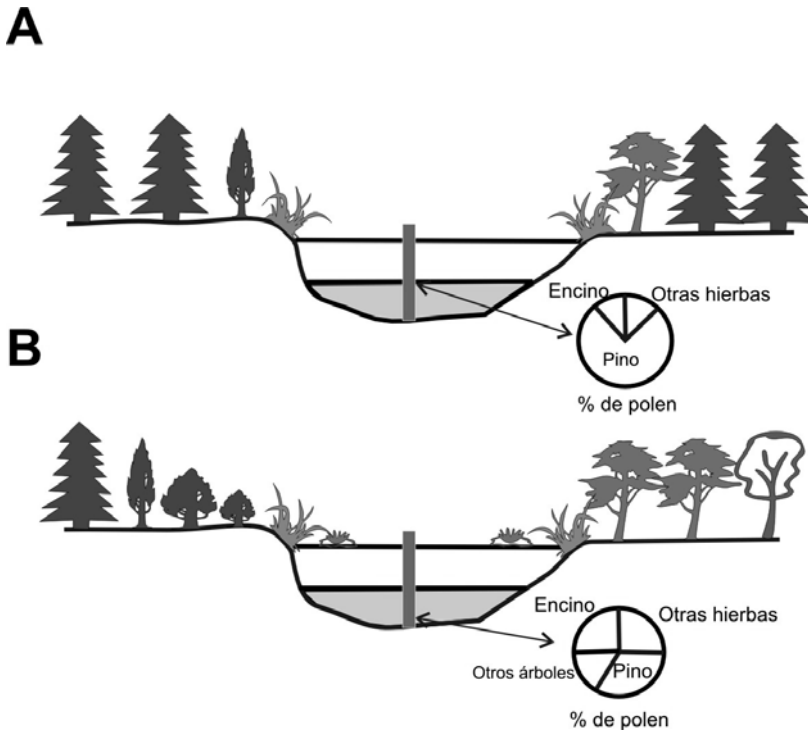


Figura 1. (A) Espectro palinológico de una comunidad donde dominan los pinos obtenido de sedimentos superficiales del lago. (B) Reconstrucción de la vegetación con base en el análisis palinológico, que considera las proporciones relativas de los granos de polen y esporas depositados en el pasado en el lago.

tierras bajas en el Amazonas muestran la sustitución de la selva tropical por comunidades de sabana en amplias zonas.

Algunas regiones de México han sido estudiadas desde el punto de vista de la historia de la vegetación, relacionándose ésta con el cambio climático global y regional.

*Zona centro de México.* La existencia de lagos en el centro del país ofrece amplias posibilidades para las investigaciones sobre cambio climático natural. Estudios palinológicos y paleolimnológicos realizados en el sector centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) (lagos de Chalco, Texcoco, Tecocomulco de la cuenca de México), muestran la evolución de las comunidades vegetales y los niveles lacustres en sintonía con el cambio climático (Lozano-García *et al.* 1993, Lozano-García y Ortega-Guerrero, 1998 y Caballero-Miranda *et al.* 1999). Respecto al máximo glacial (18,000 años aP) es evidente el desarrollo de comunidades boscosas abiertas con presencia importante de pastos y arbustos (figura 2). Polen de plantas de climas fríos, como *Picea* y *Podocarpus*, está presente en las secuencias de polen de Chalco y Texcoco. También se encontró en la zona de Chalco, polen de *Mimosa biuncifera*; esta planta actualmente se desarrolla en la porción norte de la cuenca, donde la precipitación media anual es de 600 mm. Los niveles lacustres en los lagos son bajos. El conjunto de paleoindicadores apoya la hipótesis de una disminución relevante de la precipitación.

En la región centro-occidental de la FVT, la señal climática para el mismo periodo es mixta, con bosques abiertos para el área de Cuitzeo; mientras que en Pátzcuaro dominan los bosques de Pino. Durante periodos cortos, la sedimentación se ve interrumpida en algunas de las secuencias palinológicas (Lerma, Tecocomulco, Texcoco, Pátzcuaro y Zacapu), evidenciando la supuesta reducción en la precipitación (Grimm *et al.* 2001).

*Zona noroeste de México.* El paisaje desértico del norte de México, en particular el de la región occidental del desierto sonorense, no caracterizaba a esta zona durante el Pleistoceno tardío. La Laguna Seca de San Felipe, en Baja California norte, localizada en la zona más árida de Norteamérica, definiéndose como el núcleo del desierto, ofrece información paleoclimática. El registro de polen de la Laguna Seca permite reconstruir un paisaje completamente diferente para el periodo entre los 44,000 a 13,000 años aP; la zona estaba cubierta de bosques de pino piñonero y chaparrales (Ortega-

Guerrero *et al.* 1999). Este paisaje corresponde a condiciones de humedad mayores que las actuales.

Los modelos generales de circulación atmosférica se han desarrollado para estimar la tasa de cambio climático de la Tierra. Para el máximo glacial, los vientos Alisios, el sistema que aporta lluvia a México durante el verano, se desplazaron al sur, reduciendo el aporte de precipitación hacia la zona central de México. Por otra parte, los vientos del oeste, que actualmente producen

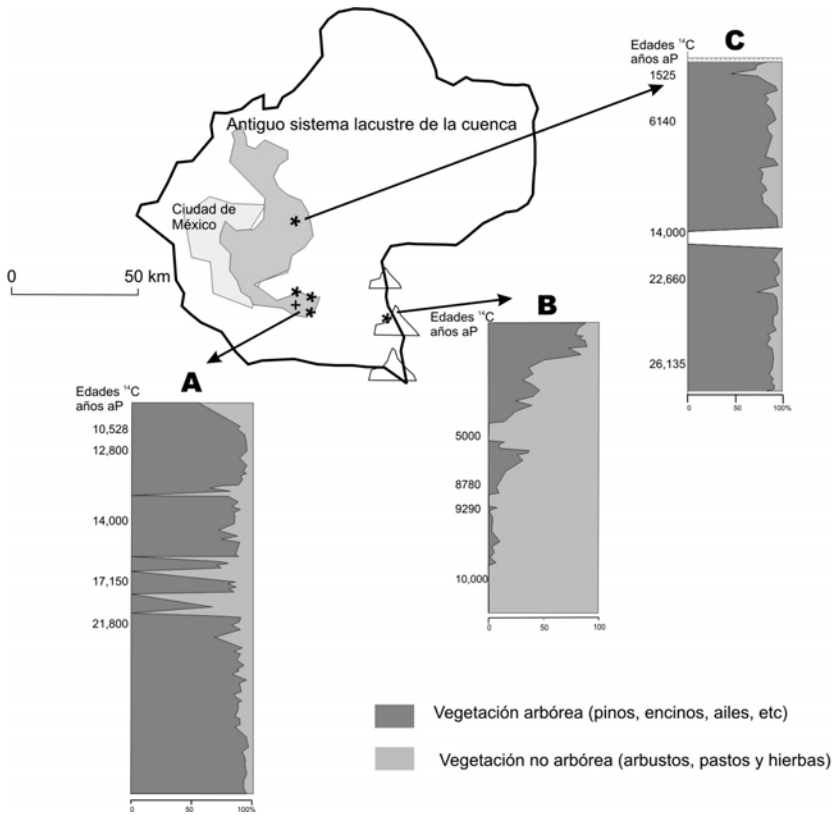


Figura 2. Registros palinológicos de la Cuenca de México. (A) Diagrama de polen del lago de Chalco abarcando los últimos ca. 25,000 años. (B) Diagrama de polen de los últimos 10,000 años del sitio "El Marrano" en la vertiente NO del volcán Iztacchúatl. Se observa la colonización del sitio por el zacatonal alpino y en los últimos 4000 años se establece el bosque de *Pinus hartwegii*. (C) Diagrama palinológico de Texcoco de los últimos 28,000 años, donde se observa las fluctuaciones en la cubierta arbórea.

lluvias de invierno en el extremo noroccidental del país, también migraron al sur debido al desarrollo del casquete. Se plantea una hipótesis, la cual supone un incremento en las lluvias de invierno en el norte y centro de México para el máximo glacial (Bradbury 1997). La reconstrucción del paisaje en San Felipe indiscutiblemente apoya dicha hipótesis; sin embargo, los datos palinológicos para los lagos de FVT no sustentan este escenario. Excluyendo solamente el lago de Pátzcuaro, el cual indica ambientes húmedos para ese tiempo, el resto de los sitios apunta hacia climas fríos y secos.

Condiciones ambientales variables caracterizan el Holoceno o época posglacial (últimos 10,000 años), el periodo de climas templados y cálidos en el que se encuentra nuestro planeta actualmente. El calentamiento global y la desintegración del casquete de hielo Laurentino en el hemisferio norte conllevan cambios en la circulación oceánica, y en la distribución de flora y fauna. Las asociaciones planta-suelo responden rápidamente al calentamiento, modificando su distribución y extensión (Roberts 1998). En Europa, los bosques boreales se desplazan al norte, Escandinavia y el norte de Rusia; la tundra y la estepa desaparecen.

Para Norteamérica, la transición glacial a interglacial permitió que las especies de bosques templados migraran al norte, debido al retraimiento del casquete de hielo Laurentino. La selva amazónica reducida y fragmentada durante la época glacial, expande sus rangos hasta alcanzar su distribución actual. Los bosques templados y tropicales migran altitudinalmente en las zonas montañosas, debido al calentamiento y la retracción de los glaciares de montaña.

Una señal climática en varias secuencias de la FVT es la reducción de bosques de juníferos, indicadores de ambientes secos, y el aumento en los bosques de encinos. En la cuenca de México, el Holoceno está bien representado en dos secuencias palinológicas: una en el lago de Chalco a 2,200 m de altitud, y la otra (Valle Agua el Marrano) en la vertiente oeste del Iztaccíhuatl, a 3,850 m de altitud (véase la figura 2). Ambas secuencias muestran cambios en el paisaje. En el Holoceno temprano (10,000 a 7,000 años aP), en Chalco hay desarrollo de bosques mixtos de pino y encino. Entre los 10,000 y 8,000 años, polen abundante de oyamel en Chalco caracteriza esta parte de la secuencia, sugiriendo climas húmedos y templados. En el Iztaccíhuatl hay evidencias de un avance glaciar Milpuco-1, y al retroceder el glaciar se inicia la colonización por el zacatonal alpino. Un breve periodo frío se registra a los 7,400 años (Mipulco-2); posteriormente un calentamiento rápido y abrupto, permitiendo la colonización del sitio por el bosque de pino. Este evento también está



presente en Chalco. Para el centro de México, en todas las localidades analizadas hay un incremento en la humedad que se manifiesta con niveles lacustres altos y amplias comunidades boscosas. La actividad humana impacta la vegetación en varias de las cuencas lacustres y los diagramas de polen se ven alterados, aumentando significativamente el polen de plantas asociadas a agricultura y disturbio. Estas variaciones en el aporte de la humedad para el centro de México durante el Holoceno se asocian con el desplazamiento a la posición más norteña de la zona intertropical de Convergencia y con celda de alta presión Bermuda-Azores.

Los análisis isotópicos en conchas de gasterópodos, geoquímica, polen y susceptibilidad magnética de sedimentos de lagos en la península de Yucatán, en combinación con datos arqueológicos, muestran el efecto del cambio climático en la sociedad Maya (Grimm *et al.* 2001). Una intensa sequía ocurre en la zona Maya cerca de 800 a 1,000 años a.C., y coincide con el colapso Maya (PAGES 2000). Para otras zonas como el altiplano andino y África, hay evidencias de sequías durante la misma época, lo que sugiere sincronismo con el cambio climático (PAGES 2000).

Un aspecto fundamental del sistema climático es que hay interconexiones entre partes del mismo. Así, cuando ocurre el evento de El Niño del océano Pacífico tropical, tiene impacto en otras áreas lejanas como Alaska (ver el capítulo *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad climática y el cambio climático en México*, de V. Magaña *et al.*, en la sección III). Para evaluar estas teleconexiones, es necesario analizar en diferentes escalas temporales y espaciales los diferentes paleoindicadores. Los registros paleoambientales abren amplias posibilidades para el estudio de las variaciones naturales del clima y permiten entender el funcionamiento del sistema climático terrestre.

## AGRADECIMIENTOS

La elaboración de las figuras fue realizada por Susana Sosa y la revisión del texto estuvo a cargo de Magdalena Alcayde.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alley, R. B. 2000. *The Two-Mile Time Machine*. Princeton: Princeton University Press.
- Bradbury, J. P. 1997. Sources of Glacial Moisture in Mesoamerica. *Quaternary International* 43/44: 97-116.

- Bradley, R.S. 1999. *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternary*. Harcourt Academic Press.
- Caballero, M., M. S. Lozano-García, B. Ortega-Guerreo, J. Urrutia y J. L. Macias. 1999. Environmental characteristics of Lake Tecocomulco northern Basin of Mexico, for the last *ca.* 50,000. *Palaeolimnology* 22 (4): 399-411.
- Fagan, B.M. 2000. *The Little Ice Age. How the Climate Made History 1300-1850*. Basic Books.
- Grimm, E.C., M.S. Lozano-García, H. Behling y V. Markgraf. 2001. Holocene Vegetation and Climate in the Americas. En: V. Markgraf (ed.) *Interhemispheric Climate Linkages*. San Diego: Academic Press.
- Lozano-García, M.S., B. Ortega-Guerrero, M. Caballero-Miranda y J. Urrutia-Fucugauchi. 1993. Late Pleistocene/Holocene Paleoenvironments of Chalco Lake, Central México. *Quaternary Research* 40: 332-342.
- y B. Ortega-Guerrero. 1998. Late Quaternary environmental changes of the central part of the basin of Mexico; correlation between Texcoco and Chalco basins. *Review of Palaeobotany and Palynology* 99: 77-93.
- Ortega-Guerrero, B., M. Caballero-Miranda, M.S. Lozano García y M. De la O. 1999. Late Quaternary palaeoenvironmental studies in San Felipe Basin, Sonora Desert, Mexico. *Geofísica Internacional* 38 (3): 153-163.
- PAGES. 2000. Environmental Variability and Climate Change. *IGBP Science Series* 3: 34 p.
- Roberts, N. 1998. *The Holocene. An Environmental History*. Blackwell Publishers.

## Notas

---

\* Instituto de Geografía, UNAM.

# El ciclo global del carbono

*Víctor J. Jaramillo\**

## INTRODUCCIÓN

EL CARBONO (C) ES UN elemento fundamental de los compuestos orgánicos, en los que se combina con nitrógeno, fósforo, azufre, oxígeno e hidrógeno para constituir las moléculas más importantes para la vida. Como sucede con todos los elementos, la disponibilidad de C no es infinita en el planeta y, por tanto, el C circula entre la materia orgánica y el ambiente físico-químico de manera constante. El movimiento del C ocurre a diferentes escalas espacio-temporales, que van desde el nivel molecular, pasando por el orgánico hasta el global. El C, en su unión molecular con el oxígeno, constituye el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), gas resultante de procesos tanto geoquímicos como biológicos, y cuya presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas de invernadero (ver el capítulo *¿Qué es el efecto invernadero?*, de R. Garduño, en esta sección).

El bióxido de carbono ha sido un componente importante de nuestra atmósfera desde hace miles de millones de años, cuando la gran actividad volcánica del planeta lo lanzaba a la atmósfera. La atmósfera primitiva era más rica en bióxido de carbono –aproximadamente una concentración de 3% contra 0.036% en la actualidad– y evitaba la salida de la radiación, produciendo, junto con el vapor de agua, un calentamiento global en el planeta (Lovelock, 1988). La importancia del  $\text{CO}_2$  y el vapor de agua en la atmósfera para la regulación de la temperatura del planeta es tal que sin su presencia la temperatura promedio actual del planeta sería aproximadamente 33°C más fría y, por lo tanto, el planeta estaría congelado (Schlesinger 1997).

## EL FLUJO DE CARBONO

Las plantas superiores adquieren el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico por difusión a través de pequeñísimos poros de las hojas conocidos como estomas, y es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis. Cierta cantidad de este  $\text{CO}_2$  regresa a la atmósfera, pero la cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta (PPB). Ésta se ha estimado globalmente en 120 PgC/año (1 Pg [Petagramo] =  $10^{15}$  g; figura 1). La mitad de la PPB (60 PgC/año) se incorpora en los tejidos vegetales, como hojas, raíces y tejido leñoso, y la otra mitad regresa a la atmósfera como  $\text{CO}_2$  debido a la respiración autotrófica (respiración de los tejidos vegetales,  $R_a$ ). El crecimiento anual de las plantas es el resultado de la diferencia entre el carbono fijado y el

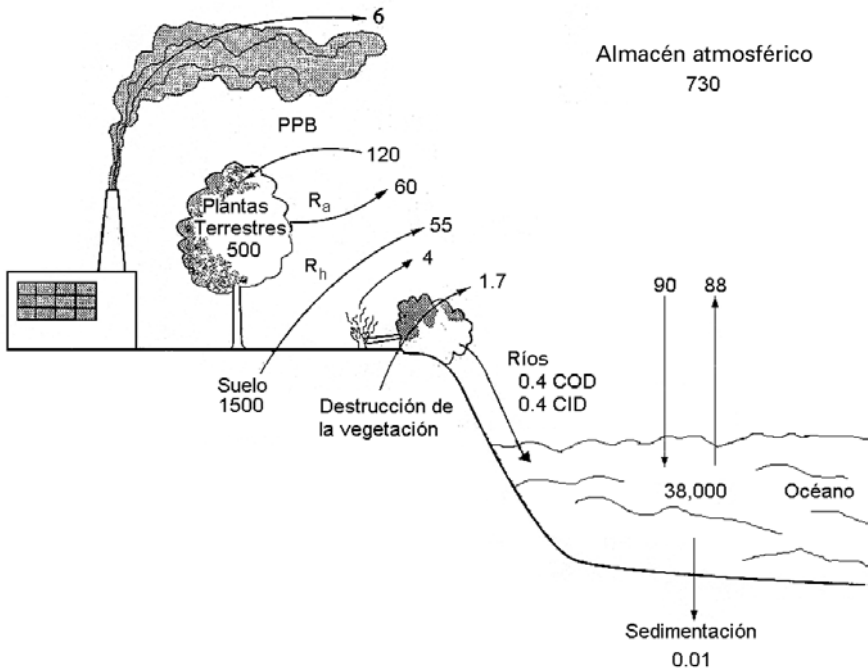


Figura 1. El ciclo global del carbono en la actualidad. Los almacenes están expresados en Pg C y los flujos en Pg C/año. PPB = producción primaria bruta;  $R_a$  = respiración autotrofa;  $R_h$  = respiración heterótrofa; COD = carbono orgánico disuelto; CID = carbono inorgánico disuelto. Fuente: Esquema modificado de Schlesinger 1997, y actualizado con información de IPCC 2001.

respirado. Se le conoce como producción primaria neta (PPN) y en el nivel global se ha estimado en 60 PgC/año. Eventualmente, en el transcurso de pocos a muchos años, casi todo el C fijado por vía de la PPN regresa a la atmósfera por medio de dos procesos: la respiración heterótrofa ( $R_h$ ), que incluye a los descomponedores de la materia orgánica (bacterias y hongos que se alimentan de tejidos muertos y de exudados) y a los herbívoros; y por la combustión en los fuegos naturales o antropogénicos. Gran parte de la biomasa muerta se incorpora al detritus y a la materia orgánica del suelo, donde es “respirada” a diferentes velocidades dependiendo de sus características químicas. Se producen así almacenes de C en el suelo que regresan el C a la atmósfera en diferentes periodos. La diferencia entre la fijación de C por la PPN y las pérdidas por la  $R_h$ , en ausencia de otras perturbaciones que producen pérdidas de carbono (p. ej. el fuego o la cosecha), se conoce como la producción neta del ecosistema (PNE). Y cuando todas las pérdidas de C se contabilizan, tales como el fuego, la cosecha o la remoción, el transporte por los ríos a los océanos y la erosión, lo que queda es el C que acumula efectivamente la biosfera nivel global, y que se conoce como la producción neta del bioma (PNB). Ésta se ha calculado en  $0.2 \pm 0.7$  PgC/año para la década de los ochenta, y en  $1.4 \pm 0.7$  PgC/año para la de los noventa.

¿Qué procesos regulan la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera? Se considera que existen dos mecanismos generales que operan de manera conjunta pero en escalas diferentes de tiempo. En el largo plazo (cientos de millones de años), el ciclo geoquímico del Carbonato-Silicato opera como regulador de dicha concentración. En este ciclo, el  $\text{CO}_2$  atmosférico se disuelve en el agua de lluvia y forma ácido carbónico que reacciona con los minerales expuestos sobre la superficie terrestre, generando lo que se conoce como intemperismo de la roca. Los ríos acarrean los productos disueltos al océano. En el océano se forma el carbonato de calcio; éste se deposita en los sedimentos marinos que por el proceso de subducción entran a la corteza baja de la Tierra. En este proceso se reincorporan elementos a los minerales primarios de las rocas y el carbono regresa a la atmósfera como  $\text{CO}_2$  por las emisiones volcánicas e hidrotermales. Este ciclo geoquímico ha ayudado a mantener la concentración del  $\text{CO}_2$  atmosférico por debajo de 1% durante los últimos 100 millones de años; sin embargo, los flujos de carbono anuales son relativamente pequeños.

La aparición de la vida sobrepuso al ciclo geoquímico un ciclo *biogeoquímico* de corto plazo. En éste dominan dos grandes transferencias

anuales de C: el flujo de  $\text{CO}_2$  de la atmósfera a las plantas como resultado de la fotosíntesis, y el regreso de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera como resultado de la descomposición de la materia orgánica. En los periodos de la historia de la Tierra en los que la producción de materia orgánica ha excedido a su descomposición, el C orgánico se ha acumulado en los sedimentos geológicos. La magnitud de estos flujos es tal que ha sido posible detectarlos mediante las variaciones estacionales de las concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$ , particularmente en el Hemisferio Norte debido a su mayor masa continental en comparación con el Hemisferio Sur.

Otro componente natural del ciclo del carbono lo constituye el metano ( $\text{CH}_4$ ). Este gas es, después del bióxido de carbono, el compuesto de carbono más abundante en la atmósfera (Schlesinger, 1997). Se produce por la fermentación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, tal como ocurre, por ejemplo, en los humedales, los sedimentos lacustres y en el aparato digestivo de los rumiantes y las termitas. La concentración de metano muestra variaciones latitudinales es mayor en el Hemisferio Norte que en el Sur y fuertes oscilaciones estacionales. Tiene una capacidad de absorción de radiación infrarroja 20 veces mayor por molécula que el bióxido de carbono (Silver y DeFries, 1990), por lo que el aumento de la concentración de este gas en la troposfera tiene también el potencial para contribuir de manera significativa a un cambio climático global (ver el capítulo *Los gases regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de D. H. Cuatecontzi y Jorge Gassca, en esta sección).

## PERTURBACIONES AL CICLO Y EL BALANCE GLOBAL ACTUAL

Las perturbaciones al ciclo global del carbono se enmarcan dentro de un contexto más amplio reconocido como «el cambio ambiental global», que amenaza de diversas formas el funcionamiento del planeta e incluye varios fenómenos y procesos íntimamente relacionados. Un cambio global se define a partir de dos tipos de fenómenos: a) aquel que altera las capas de fluidos del sistema de la Tierra (la atmósfera o los océanos), y que, por lo tanto, es experimentado a escala planetaria, y b) aquel que ocurre en sitios discretos pero tan ampliamente distribuidos que constituye un cambio global (Vitousek 1992). Como ejemplos del primero tenemos el cambio en la composición de la atmósfera (p. ej. aumentos en la concentración de bióxido de carbono y de metano), el cambio climático, la destrucción de la capa de

ozono en la estratosfera y el aumento de la incidencia de radiación ultravioleta. Dentro del segundo tipo están la pérdida de la biodiversidad, el cambio en el uso del suelo (p. ej. la destrucción de los bosques para uso agropecuario), los cambios en la química atmosférica (p. ej. la lluvia ácida y el aumento en la concentración de ozono en la troposfera) y las invasiones biológicas.

El denominador común de todos los componentes del cambio ambiental global es el ser humano y sus actividades, que han adquirido enormes proporciones con relación a los flujos de energía y materiales en el nivel global. Por ejemplo, el ser humano consume directamente, el solo, cerca de 2% de la productividad primaria neta de los ecosistemas terrestres, pero al hacerlo utiliza o destruye cerca de 40% del total (Vitousek *et al.* 1986). Las perturbaciones del ciclo global del carbono tienen graves repercusiones en el clima del planeta debido a las propiedades del CO<sub>2</sub> y del metano como gases de efecto invernadero: a una mayor concentración en la atmósfera mayor temperatura promedio global del planeta.

El aumento en las concentraciones de bióxido de carbono y de metano en la parte baja de la atmósfera (troposfera), está bien documentados (IPCC, 2001). Las mediciones realizadas en Mauna Loa, Hawai, desde 1957, así como las mediciones indirectas (p. ej. con núcleos de hielo), han mostrado un aumento de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>: de 280 partes por millón (ppm) en 1750 a 367 ppm en 1999. Esto significa un incremento de 31% en poco más de 100 años. Aunque se han documentado concentraciones similares a la actual en el registro geológico, ésta constituye el nivel más alto alcanzado en los últimos 420,000 años, y la velocidad de cambio no parece tener precedente en los últimos 20,000 años (IPCC, 2001). Sin embargo, la tasa de aumento presenta variaciones anuales bastante grandes. La concentración de metano en la atmósfera, que es mucho más baja que la de CO<sub>2</sub>, aumentó de cerca de 700 partes por billón (ppb) en 1750 a 1745 ppb en 1998, lo que representó un aumento de 150%. Esta concentración no ha sido excedida tampoco en los últimos 420,000 años. Las causas del incremento de la concentración de gases de carbono en la atmósfera están bien identificadas. En el caso del CO<sub>2</sub> son el uso industrial y doméstico de combustibles que contienen carbono (petróleo, carbón, gas natural y leña), la deforestación –que provoca la descomposición de la materia orgánica– y la quema de la biomasa vegetal. En el caso del metano son la agricultura (p. ej. cultivo de arroz), el uso de gas natural, los rellenos sanitarios, el aumento del hato ganadero y la quema de la biomasa vegetal. Sin embargo, es el uso

indiscriminado e ineficiente de los combustibles fósiles el principal generador de la tendencia actual (IPCC, 2001, cuadro 1). Desde la perspectiva del ciclo global del C, estos flujos antropogénicos son pequeños si se les compara con los que ocurren naturalmente entre la atmósfera, los ecosistemas terrestres y los océanos (ver magnitudes en la figura 1), pero son suficientes para modificar los flujos netos y aumentar el contenido de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Es importante notar que son los movimientos anuales de carbono, más que la cantidad almacenada en los diferentes reservorios, lo que importa en este contexto. Por ejemplo, el océano contiene el mayor almacén de C cerca de la superficie de la Tierra (figura 1), pero la mayor parte de dicho almacén no está en intercambio activo con la atmósfera.

CUADRO 1. EL BALANCE GLOBAL DEL CARBONO EN PgC/AÑO PARA DOS DÉCADAS

	1980	1990
Aumento atmosférico	3.3 ± 0.1	3.2 ± 0.1
Emissiones (combustibles fósiles, cemento)	5.4 ± 0.3	6.3 ± 0.4
Flujo océano-atmósfera	-1.9 ± 0.6	-1.7 ± 0.5
Flujo tierra-atmósfera*	-0.2 ± 0.7	-1.4 ± 0.7
*dividido como		
Cambio de uso del suelo	1.7 (0.6 a 2.5)	ND
Sumidero terrestre residual	-1.9 (-3.8 a 0.3)	ND

Los valores positivos son flujos hacia la atmósfera, y los valores negativos representan captura desde la atmósfera. Los errores indican 1 D.E. como valor de incertidumbre, pero no la variabilidad anual, que es sustancialmente mayor. ND = información no disponible

Fuente: Cuadro modificado de IPCC 2001.

El balance muestra a las emisiones, en particular por combustibles fósiles, como el flujo más importante hacia a la atmósfera, y se observa un aumento en las emisiones de la década de 1980 a la de 1990 (cuadro 1). El aumento atmosférico se mantiene constante y además sólo representa una proporción de estas emisiones. Pasó de representar 61% de las emisiones en la década de 1980, a 51% en la de 1990. Esto plantea la interrogante sobre el destino del carbono que no se acumula en la atmósfera. El cuadro 1 identifica dos sumideros de carbono, indicados con flujos negativos, uno en el océano y el otro en la superficie terrestre. La cuantificación de estos flujos, a pesar de las grandes incertidumbres asociadas, representa uno de los mayo-



res logros de la investigación sobre el ciclo global del carbono en la última década. El flujo océano-atmósfera indica que los océanos capturan entre 1.7 y 1.9 PgC/año. Esta captura se da por medio de dos procesos principales. Uno que implica una mayor captura en regiones que son sumideros naturales de CO<sub>2</sub>, como aquellas en las que se exponen las aguas que han pasado muchos años en el interior del océano desde su último contacto con la atmósfera (conocidas como “aguas viejas”). El otro, que se da con la reducción en la liberación natural de CO<sub>2</sub> en las regiones de surgencias por su aumento de concentración en la atmósfera, y que provoca una mayor permanencia del CO<sub>2</sub> en el océano (ver el capítulo *Clima oceánico: los mares mexicanos ante el cambio climático global*, de A. Gallegos, en esta sección)

El flujo entre la superficie terrestre y la atmósfera representa un balance entre el flujo debido al cambio de uso del suelo, que es actualmente positivo, y un componente residual, que es por inferencia negativo o un sumidero de carbono. Se observa que para la década de 1980, la biosfera terrestre fue prácticamente neutral respecto al intercambio neto de carbono. La información disponible permite cuantificar para esta década, con altos grados de incertidumbre, las emisiones debidas al cambio de uso del suelo en el orden de 1.7 PgC/año. Estas emisiones se debieron fundamentalmente a los procesos de deforestación en los trópicos (Houghton, 1999). La captura de carbono se identifica con la existencia de sumideros en Norte América, Europa y Eurasia, asociada al recrecimiento de la vegetación en áreas agrícolas abandonadas, a la prevención de fuegos, además de a las respuestas de las plantas a temporadas más largas de crecimiento y al efecto de fertilización por el propio aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico y por la deposición de nitrógeno (Schimel *et al.* 2001). Los resultados recientes con análisis de modelación inversa (*i.e.* que utilizan las variaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico para hacer los cálculos de los flujos) sugieren la existencia de un sumidero de carbono en los trópicos que balancea las emisiones por deforestación en esa región. Existe, sin embargo, gran incertidumbre respecto a los procesos involucrados en ello. El balance para la década de 1990 indica la presencia de un sumidero terrestre aún mayor. Sin embargo, se considera que se debió más a una respuesta a la variabilidad climática en los primeros años de la década que a una tendencia sistemática. Con la información disponible aún no ha sido posible cuantificar por separado las emisiones por el cambio de uso del suelo y la captura de carbono por los ecosistemas terrestres para la década de 1990 tal y como se realizó para la década anterior.

La capacidad de los ecosistemas terrestres para funcionar como sumideros de carbono depende, de manera importante, del “efecto de fertilización” debido al aumento en la concentración del bióxido de carbono en la atmósfera y a la deposición del nitrógeno atmosférico, que se ha emitido en exceso por diversas actividades humanas. El efecto de fertilización por el CO<sub>2</sub> es posible ya que su concentración atmosférica actual limita la capacidad productiva de las plantas. Existe evidencia de que dicho efecto de fertilización aumenta el crecimiento de las plantas en condiciones naturales, aunque no en las magnitudes en las que los estudios fisiológicos con plantas individuales y en condiciones controladas sugerían (Mooney *et al.* 1999). El efecto de la fertilización por nitrógeno se debe a que la disponibilidad de este elemento limita la productividad primaria de muchos ecosistemas terrestres (Schlesinger 1997).

Es importante considerar que las magnitudes que se calculan actualmente para los sumideros de C no operarán de manera constante en el futuro, ya que todos los procesos claves disminuirán. Por ejemplo, la captura de C por los bosques jóvenes que crecen en las tierras agrícolas disminuirá conforme éstos lleguen a la madurez. Igualmente, las respuestas a la fertilización por el CO<sub>2</sub> atmosférico y por la deposición de nitrógeno mostrarán una saturación fisiológica, al tiempo que también otros recursos se volverán limitantes. Más aún, se espera que los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas reduzcan la capacidad de los sumideros a una escala global (Schimel *et al.* 2001). Es fundamental tomar en cuenta estas limitaciones de los sistemas biológicos de la Tierra al hacer consideraciones sobre el balance global de carbono en el futuro.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Biól. Raúl Ahedo en la elaboración de la figura y el cuadro.

## BIBLIOGRAFÍA

- Houghton, R.A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus 51B*:298-313.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report*

- of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. U.K.: WMO-UNEP. Cambridge University Press.*
- Lovelock, J. E. 1988. *The Ages of Gaia*. New York: W.W. Norton and Co.
- Mooney, H. A., J. Canadell, F. S. Chapin III, J. R. Ehleringer, Ch. Körner, R. E. McMurtrie, W. J. Parton, L. F. Pitelka y E. -D.Schulze. 1999. Ecosystem physiology responses to global change. Pp. 141-189. En: B. Walker, W. Steffen, J. Canadell, & J. Ingram (eds.) *The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schimel, D. S. *et al.* 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*. 414: 169-172.
- Schlesinger, W. H. 1997. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. New York: National Academic Press.
- Silver, C. S. y R. S. DeFries. 1990. *One Earth, One Future*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Vitousek, P.M., P. R. Ehrlich, A. H. Ehrlich y P. A. Matson. 1986. Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience* 36: 368-373.
- 1992. Global environmental change: An introduction. *Annual Review of Ecology and Systematics* 23: 1-14.

## Notas

---

\* Instituto de Ecología, UNAM.



# Los gases regulados por la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático

*Dick Homero Cuatecontzi y Jorge Gasca\**

EN 1988 SE ESTABLECIÓ el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, PICC, cuya función es evaluar la información científica disponible sobre el mismo, valorar los impactos ambientales y socioeconómicos del cambio climático, y formular estrategias de respuesta (ver el capítulo *El Panel Intergubernamental de Cambio Climático*, PICC, de M. Ávalos, en la sección II).

En el Grupo de Trabajo I del PICC, cerca de 140 científicos y expertos de más de 30 países colaboraron en el desarrollo de la Guía Revisada 1996 del PICC, para la elaboración de los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, con el fin de asegurar que los que se sometan a la consideración de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), sean consistentes y comparables.

El objetivo del artículo 2 de la CMNUCC es lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera—entendiéndose por “gases de efecto invernadero” aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y reemiten radiación infrarroja a la Tierra— en un nivel tal que no se generen interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel deberá lograrse en un periodo que sea suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten de manera natural al cambio climático y asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada, mientras el desarrollo económico continua su avance de una manera sustentable (PNUMA 1999).

Los gases de efecto invernadero cubren una amplia gama de gases de origen tanto natural como antropogénico. En 1997 se aprobó el texto del Protocolo de Kioto (PK) de la CMNUCC, mediante el cual se controlarán las emisiones de seis gases de efecto invernadero: bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>),

óxido nitroso ( $N_2O$ ), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre ( $SF_6$ ). En el PK se establece el compromiso de 39 países desarrollados y en proceso de transición a economía de mercado que integran el Anexo I del Protocolo, de reducir sus emisiones de GEI en no menos de 5%, con respecto a sus emisiones 1990. Cabe mencionar que a la fecha (octubre de 2004) no ha entrado en vigor el Protocolo.

Se deben tener en cuenta dos características importantes para estimar el efecto invernadero de los gases:

a) El forzamiento radiativo

Se entiende como aquel cambio en el balance entre la radiación solar que entra y la radiación infrarroja que sale de la Tierra (se expresa en Watts por metro cuadrado,  $Wm^{-2}$ ), debido, por ejemplo, a una alteración en la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera o a cambios en la energía solar que incide en el planeta. Se estima que en el periodo comprendido entre 1750 y 2000, este forzamiento atribuido al aumento de los gases de efecto invernadero en su conjunto, ha alcanzado el valor de  $2.43 Wm^{-2}$ :  $1.46 Wm^{-2}$  debido al  $CO_2$ ;  $0.48 Wm^{-2}$  debido al  $CH_4$ ;  $0.34 Wm^{-2}$  debido a los halocarbonos, y  $0.15 Wm^{-2}$  debido al  $N_2O$  (IPCC 2001).

El Grupo de Trabajo I del IPCC estableció que el agotamiento observado en la capa de ozono estratosférico de 1750 al 2000, ha causado un forzamiento radiativo negativo ( $-0.15 Wm^{-2}$ ). Al suponer que se cumple con toda la reglamentación actual sobre los halocarbonos, su forzamiento positivo se verá reducido en la misma proporción que el forzamiento radiativo negativo causado por el agotamiento del ozono estratosférico, cuando la capa de ozono se recupere en el siglo XXI.

Se calcula que la cantidad total de ozono en la troposfera ha aumentado en 36% desde el periodo previo a la industrialización a causa particularmente de las emisiones antropogénicas de diversos gases que forman ozono. El forzamiento radiativo del ozono varía de manera considerable entre regiones y responde mucho más rápidamente a los cambios en las emisiones que aquellos gases de efecto invernadero con un tiempo de vida grande en la atmósfera.

b) Potencial de calentamiento global (PCG)

Este factor está considerado como representativo de la medida cuantitativa de los impactos relativos promediados globalmente del forzamiento radiativo

de un gas particular. Se define como: «el forzamiento radiativo acumulado de las emisiones de una masa unitaria de gas en relación con un gas de referencia ( $\text{CO}_2$ ), considerando tanto los efectos directos como de los indirectos, en un horizonte de tiempo especificado» (IPCC 1996). Los efectos directos se presentan cuando el gas en sí es un gas de efecto invernadero; el forzamiento radiativo indirecto se presenta cuando las transformaciones químicas que involucran al gas original, producen un gas o gases que son de efecto invernadero, o cuando un gas afecta los tiempos de vida de otros gases en la atmósfera.

El gas de referencia es el bióxido de carbono, por lo que las emisiones son ponderadas por el potencial de calentamiento global (PCG); se miden en teragramos de equivalentes de bióxido de carbono. La expresión utilizada para este cálculo es la siguiente:

$$\text{Tg CO}_2 \text{ Equiv} = \text{Gg de gas} * \text{PCG} / 1000$$

Donde:

Tg  $\text{CO}_2$  Equiv, se refiere a los teragramos de equivalentes de bióxido de carbono.

Gg se refiere a los gigagramos (mil toneladas métricas) del gas estudiado.

PCG, siglas del Potencial de Calentamiento Global del gas estudiado.

1/1000 es el factor de conversión de gigagramos a teragramos.

Los valores del PCG permiten a los planificadores de políticas comparar los impactos de las emisiones y las reducciones de éstas de los diferentes gases. Según el IPCC, los PCG tienen típicamente una incertidumbre de  $\pm 35\%$ . Las Partes de la CMNUCC están de acuerdo también en usar los PCG basados en un horizonte de tiempo de 100 años (Albritton y Meira 2001).

Existen también otros gases que no tienen un efecto directo de forzamiento radiativo, pero influyen en la formación y destrucción del ozono, el cual tiene un efecto absorbente de la radiación terrestre. Estos gases son referidos como precursores del ozono e incluyen monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano (COVNM). Los aerosoles son partículas o gotas de líquido extremadamente pequeñas que con frecuencia se producen por las emisiones de bióxido de azufre y otros contaminantes; éstos también pueden afectar las características de absorción de la radiación infrarroja en la atmósfera. En los párrafos siguientes se dará una descripción de los gases de efecto invernadero directo e indirecto, sus fuentes y su papel en la atmósfera.

## BIÓXIDO DE CARBONO

En la naturaleza, billones de toneladas de carbono en forma de  $\text{CO}_2$  son emitidas a la atmósfera anualmente por medio de los procesos naturales (fuentes) y son absorbidas por los océanos y la biomasa viviente (sumideros). Los flujos continuos más grandes ocurren entre la atmósfera y la biota terrestre y entre la atmósfera y el agua de la superficie de los océanos. En la atmósfera, el carbono existe predominantemente en forma oxidada: el bióxido de carbono. Este gas forma parte del ciclo global del carbono, por lo que su destino es una función compleja de diversos procesos geoquímicos y biológicos. El tiempo de vida del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera es de 5 a 200 años.

Las concentraciones de bióxido de carbono en la atmósfera se incrementaron de 280 partes por millón en volumen (ppmv), en los tiempos previos a la industrialización (1750), a 367 ppm en 1999, es decir hubo un aumento de 31% (IPCC 2001). El IPCC ha establecido que no hay duda alguna en que este incremento se debe en gran medida a las actividades humanas, particularmente aquellas relacionadas con la combustión de los energéticos fósiles, la deforestación y otros procesos de quema de biomasa, así como a los que consumen energía, como es la producción de cemento, los cuales también emiten cantidades notables de bióxido de carbono.

En su valoración científica, el IPCC estableció que la cantidad en que se incrementó la presencia del bióxido de carbono en la atmósfera se debe predominantemente a la oxidación de carbono orgánico por la quema de combustibles de origen fósil y la deforestación. El aumento de la concentración de  $\text{CO}_2$  a partir de la industrialización es espectacular comparado con las concentraciones relativamente estables de  $\text{CO}_2$  ( $280 \pm 10$  ppm) de los milenios precedentes. El ritmo medio de aumento desde 1980 es de 0.4% anual. La mayoría de las emisiones durante los últimos 20 años se deben a la quema de combustibles de origen fósil; el resto (de 10 a 30%) proviene predominantemente de los cambios en el uso de la tierra, especialmente por la deforestación. El  $\text{CO}_2$  es el gas de efecto invernadero dominante (ver los capítulos *Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México*, de L. G. Ruíz y X. Cruz, y *Los principales países emisores, emisiones históricas*, de J. L. Arvizu, en esta sección), debido a las actividades humanas, con un forzamiento radiativo actual de  $1.46 \text{ W/m}^2$ , que representa 60% del total de los cambios en las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero, muy resistentes, mezclados de manera homogénea en todo el planeta (Albritton y Meira 2001). Para el año 2100, los modelos del ciclo del carbono proyectan concentraciones de  $\text{CO}_2$  en



la atmósfera entre 540 y 970 ppm; para los escenarios ilustrativos del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE), estas concentraciones son mayores en 90 y 250%, respectivamente, que la registrada en 1750 (IPCC 2001). El efecto neto de las interacciones climáticas terrestres y oceánicas, según indican los modelos, es un aumento aún mayor en las concentraciones proyectadas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, producto de una menor absorción de CO<sub>2</sub> por los océanos y los continentes.

## METANO

Este gas se produce fundamentalmente por la descomposición anaerobia de la materia orgánica en los sistemas biológicos. Los procesos agrícolas como el cultivo del arroz inundado en agua, la fermentación entérica en los animales y la descomposición de los desechos de éstos, emiten metano, al igual que lo hace la descomposición de los desechos municipales. El metano (CH<sub>4</sub>) también se emite durante la producción y distribución del gas natural y del petróleo, y es liberado como subproducto en la extracción del carbón y en la combustión incompleta de los energéticos fósiles.

La concentración media global de metano en la atmósfera en 1994 fue de 1,720 partes por mil millones en volumen (ppmm), mostrando un incremento de 145% en relación con la concentración existente en el periodo previo a la industrialización (700 ppmm. IPCC 1996). En 1998, la concentración atmosférica era de 1,745 ppmm, con una tasa de cambio en la concentración de 7.0 partes por billón anual. El CH<sub>4</sub> tiene un tiempo de vida de 12 años y es eliminado de la atmósfera por reacciones químicas. El forzamiento radiativo directo actual del metano es de 0.48 W/m<sup>2</sup>, y representa 20% del total de los GEI (Albritton y Meira 2001). Se estima que de 60 a 80% de las emisiones actuales de metano provienen de las actividades antropogénicas. Los modelos proyectan cambios en la concentración de metano en la atmósfera entre los años 1998 y 2100, que oscilan entre -90 y +1970 partes por billón en volumen; es decir, una variación de entre -11% y +112% de la concentración registrada en el periodo previo a la industrialización (IPCC 2001).

## ÓXIDO NITROSO

Los suelos agrícolas, especialmente aquellos que utilizan fertilizantes sintéticos y abonos; la combustión de energéticos fósiles, especialmente en vehí-

culos; la producción de ácidos adípico y nítrico, el tratamiento de aguas residuales, la combustión de desechos y el quemado de biomasa, son las fuentes antropogénicas emisoras del óxido nitroso ( $N_2O$ ).

La concentración en la atmósfera de  $N_2O$  en el periodo previo a la industrialización era de 270 ppmm. Para 1994, la cifra fue de 312 partes; es decir, un incremento de 13% atribuido a las actividades antropogénicas (IPCC 1996), y en 1998 la concentración atmosférica era de 314 ppmm. El tiempo de vida del  $N_2O$  en la atmósfera es de 114 años y una tasa de cambio en la concentración de 0.8 partes por billón en volumen. Su remoción de la atmósfera se realiza fundamentalmente por medio de la acción fotolítica de la luz solar en la estratosfera. El forzamiento radiativo se estima en  $0.15 \text{ W/m}^2$ , equivalente a 6% del total de todos los gases de efecto invernadero (Albritton y Meira 2001).

El  $N_2O$  es un buen ejemplo de la interacción que existe entre las medidas de control que se instrumentan para reducir la contaminación local y su impacto en el cambio climático. La introducción de convertidores catalíticos en los vehículos motorizados, por una parte ayuda a reducir las emisiones de los precursores de ozono; por otra parte, sin embargo, causa un aumento en las emisiones de óxido nitroso. Los modelos proyectan cambios en la concentración de  $N_2O$  en la atmósfera entre los años de 1998 y 2100, que oscilan entre +38 y +144 ppmm; es decir, una variación de entre +12% y +46% de la concentración registrada en el periodo previo a la industrialización (IPCC 2001).

## HALOCARBONOS Y COMPUESTOS RELACIONADOS

Los halocarbonos son compuestos de carbono que contienen flúor, cloro, bromo o yodo. En su mayor parte son sustancias químicas producidas por el hombre y que tienen efectos directos e indirectos en el forzamiento radiativo. Los halocarbonos que contienen cloro (por ejemplo los clorofluorocarbonos [CFCs], metilcloroformo, y tetracloruro de carbono) y bromo (como los halones, bromuro de metilo y hidrobromofluorocarbonos [HBFCs]) son sustancias que agotan el ozono de la estratosfera, y están controlados por el Protocolo de Montreal bajo el concepto de «sustancias que agotan la capa de ozono».

Los halocarbonos controlados por el Protocolo de Kioto son los hidrofluorocarbonos (HFCs) y los perfluorocarbonos (PFCs). Los HFCs son gases

utilizados para reemplazar las sustancias agotadoras de la capa de ozono y los PFCs se utilizan como productos intermedios en la fundición de aluminio que constituye la principal fuente, seguida de la fabricación de semiconductores. La concentración del hidrofluorocarbono HFC-23 ha aumentado más de tres veces entre 1978 y 1995; el tiempo de vida de este compuesto es de 260 años. Su concentración en 1998 fue de 14 partes por billón en volumen, y tiene una tasa de cambio de concentración de 0.55 partes por billón por año. Debido a que las concentraciones actuales son relativamente bajas, la contribución de los HFCs al forzamiento radiativo es relativamente modesta, al igual que la de los hidroclorofluorocarbonos (HCFCs) (IPCC 2001).

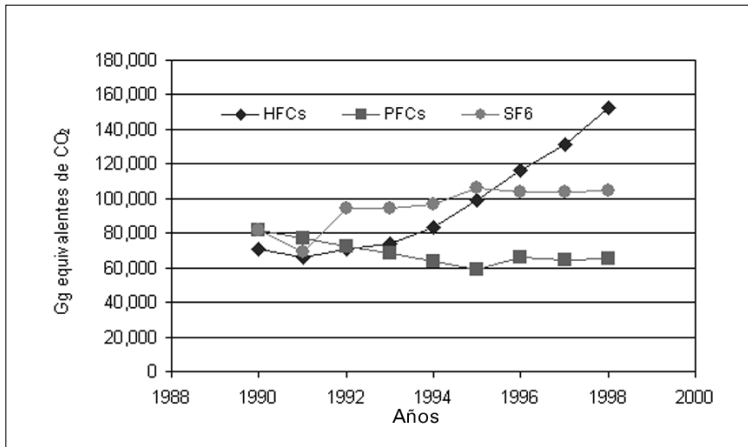
Los perfluorocarbonos (PFCs) como el perfluorometano ( $\text{CF}_4$ ) y el perfluoroetileno ( $\text{C}_2\text{F}_6$ ), tienen tiempos de residencia atmosférica extremadamente largos y absorben gran cantidad de radiación infrarroja, por lo tanto, estos compuestos, aun en cantidades relativamente reducidas, tienen la posibilidad de influir sobre el clima hasta un futuro muy lejano. El  $\text{CF}_4$ , por ejemplo, permanece en la atmósfera 50,000 años como mínimo; su concentración en el periodo previo a la industrialización fue de 40 partes por billón en volumen (ppb), en 1998 ascendió a 80 ppb, y tiene una tasa de cambio en concentración de 1 ppb por año. Las emisiones antropogénicas actuales superan a las naturales por un factor de mil o más, y son responsables del aumento observado. Se proyecta que el  $\text{CF}_4$  aumentará su concentración en la atmósfera entre los años 1998 y 2100 hasta 200 y 400 ppb (IPCC 2001).

### Hexafluoruro de azufre

El hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) es un gas de efecto invernadero 22,200 veces más eficaz que el  $\text{CO}_2$  por unidad de masa (kg). Este gas se utiliza como aislante en interruptores y equipos eléctricos. Es generado también por fugas en procesos de fabricación de algunos semiconductores y manufacturación de magnesio. Las concentraciones actuales en la atmósfera son muy bajas (del orden de 4.2 ppb); sin embargo, tienen una tasa de cambio de concentración importante de 0.24 ppb por año. Se proyecta que el  $\text{SF}_6$  alcanzará concentraciones atmosféricas en el periodo de 1998 a 2100 de entre 35 y 65 ppb (IPCC 2001).

En el año 2000, la suma de las emisiones de HFCs, PFCs, y  $\text{SF}_6$ , en Estados Unidos, fue de 121.3 Tg de  $\text{CO}_2$  equivalente; es decir, un incremento de 29.6% respecto a la cifra de 1990 (93.6 Tg de  $\text{CO}_2$  equivalente) (EPA 2002).

GRÁFICA 1. TENDENCIAS DE LAS EMISIONES DE HFC, PFC Y SF<sub>6</sub> DE LOS PAÍSES DEL ANEXO I ENTRE 1990 Y 1998 (Gg EN EQUIVALENTE DE CO<sub>2</sub>)

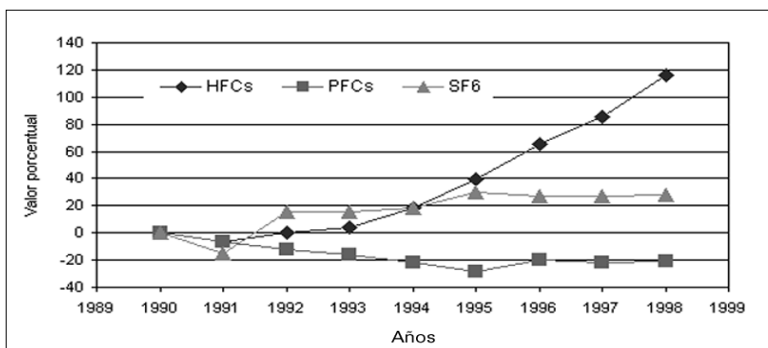


Fuente: [unfccc.int/resource/docs/2000/sbi/inf13.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/2000/sbi/inf13.pdf).

En la siguiente gráfica se muestran las tendencias de las emisiones de HFC, PFC, y SF<sub>6</sub> como Gg de CO<sub>2</sub> equivalente de los países del Anexo I para el periodo 1990-1998.

En la gráfica 2 se muestra la variación porcentual de las emisiones de HFCs, PFCs y SF<sub>6</sub> respecto al valor en 1990 para los países del Anexo I.

GRÁFICA 2. CAMBIO PORCENTUAL DE LAS EMISIONES DE HFCs, PFCs Y SF<sub>6</sub> CON RELACIÓN AL VALOR DE 1990 PARA LOS PAÍSES DEL ANEXO I



Fuente: [unfccc.int/resource/docs/2000/sbi/inf13.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/2000/sbi/inf13.pdf).

En el cuadro 1 se presenta la información resumida de los gases de efecto invernadero discutidos anteriormente.

CUADRO 1. LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO Y ALGUNAS DE SUS CARACTERÍSTICAS

VARIABLE	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFC-23	CF <sub>4</sub>	SF <sub>6</sub>
Concentración periodo previo a la industrialización (1750)	280 ppm	700 ppmm	270	0 ppb	40	0
Concentración en 1998	365 ppm	1745 ppmm	314 ppmm	14 ppb	80 ppb	4.2 ppb
Tasa cambio en concentración	1.5 ppm/año	7.0 ppmm/año	0.8 ppmm/año	0.55 ppb/año	1 ppb/año	0.24 ppb/año
Tiempo de vida en la atmósfera (años)	5 – 200	12	114	260	> 50,000	3,600
Forzamiento radiativo (W/m <sup>2</sup> )	1.46	0.48	0.15	0.002	0.003	0.002
Potencial de Calentamiento Global, PCG	1	23	296	12,000	5,700	22,200

Nota: La abundancia de gases traza en la atmósfera se indica aquí como la fracción molar (proporción de mezcla molar) del gas en relación con el aire seco (ppm, partes por millón= 10<sup>-6</sup>; ppmm, partes por mil millones= 10<sup>-9</sup>; ppb, partes por billón= 10<sup>-12</sup>).

Fuente: IPCC 2001.

## GASES IMPORTANTES POR SU FORZAMIENTO RADIATIVO INDIRECTO

El ozono (O<sub>3</sub>) se crea naturalmente en la troposfera y también como consecuencia de reacciones fotoquímicas en las que intervienen gases resultantes de actividades humanas (“smog”). El ozono troposférico se comporta como un gas de efecto invernadero indirecto (ver el capítulo *¿Qué es el efecto invernadero?*, de R. Garduño en esta sección). En la estratosfera se produce por efecto de la interacción entre la radiación solar ultravioleta y el oxígeno molecular (O<sub>2</sub>). El ozono estratosférico desempeña un papel fundamental en el balance radiativo de la estratosfera. Su concentración alcanza su valor máximo en la capa de ozono. Se ha observado que la pérdida de O<sub>3</sub> en la

estratosfera en las dos décadas pasadas ha causado un forzamiento negativo de  $0.15 + 0.1 \text{ Wm}^{-2}$  (tendencia hacia el enfriamiento) del sistema troposfera-superficie. Con base en observaciones limitadas y estudios de modelación, se estima que la concentración del ozono troposférico aumentó en 35% desde el periodo pre-industrial; sin embargo, a partir de mediados de los años ochenta, se observaron incrementos bajos (IPCC 2001). El forzamiento radiativo del ozono varía de manera considerable por región y responde mucho más rápidamente a los cambios en las emisiones que aquellos gases de efecto invernadero con un tiempo de vida largo.

El monóxido de carbono (CO) tiene un efecto indirecto en el forzamiento radiativo, debido a que reacciona con otros compuestos presentes en la atmósfera, como es el radical hidroxilo; de no hacerlo así contribuiría a la destrucción del metano y del ozono en la troposfera. El monóxido de carbono se produce cuando los combustibles que contienen carbono son quemados de manera incompleta. Como ya se mencionó, eventualmente se oxida a bióxido de carbono, mediante algunos procesos naturales en la atmósfera. Su tiempo de permanencia en la atmósfera es corto, por lo que su concentración es variable en el espacio. Estudios de modelación indican que la emisión de 100 millones de toneladas de CO es equivalente en términos de perturbaciones de gases de efecto invernadero a la emisión de casi 5 millones de toneladas de  $\text{CH}_4$  (IPCC 2001).

Los Compuestos Orgánicos Volátiles no Metano (COVNM) son sustancias que se evaporan a la temperatura ambiente. En esta clasificación se incluyen varios hidrocarburos, así como algunos compuestos que contengan en sus estructuras moleculares átomos de oxígeno y de azufre. Los COVNM como el etano, propano y butano contribuyen a la formación de ozono y de oxidantes mediante una reacción fotoquímica con los óxidos de nitrógeno en la troposfera. Desde luego, el ozono es el producto que interesa desde el punto de vista del efecto invernadero por su efecto directo en el forzamiento radiativo.

Los compuestos orgánicos volátiles son emitidos fundamentalmente en los procesos industriales, en el sector transporte, en el quemado de la biomasa y en el consumo no industrial de solventes orgánicos, pero la vegetación también contribuye de manera natural a sus emisiones. Su permanencia en la atmósfera es corta y su concentración varía espacialmente.

El término “óxidos de nitrógeno” se representa como  $\text{NO}_x$ , y son el óxido nítrico (NO) y el bióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). Por regla general, todos

los óxidos de nitrógeno se transforman en  $\text{NO}_2$  en el aire, por eso la observación se centra en este gas. Los  $\text{NO}_x$  son generados por la quema de biomasa, la combustión de combustibles fósiles, y en la estratosfera por la fotodegradación del óxido nitroso. Los efectos fundamentales en el cambio climático de estos gases son indirectos y resultan de su papel en la promoción de la formación del ozono en la troposfera y en menor grado en la baja estratosfera, donde tienen efectos positivos en el forzamiento radiativo.

Los aerosoles presentes en la troposfera son el resultado fundamentalmente de las emisiones de bióxido de azufre resultantes de la quema de los combustibles fósiles y de biomasa. En las partículas de aerosoles hay sulfatos, iones amonio, nitratos, sodio, cloruros, metales, carbón, silicatos y agua. El carbón presente en los aerosoles puede ser carbón elemental o carbón orgánico. El carbón elemental, también llamado carbón negro o grafito, es emitido principalmente por los procesos de combustión, en tanto que el carbón orgánico puede formarse por condensación de compuestos orgánicos de baja volatilidad.

Los aerosoles influyen en el clima de manera directa absorbiendo la radiación solar, y de manera indirecta como núcleos de condensación en la formación de nubes. La magnitud de su efecto directo en el forzamiento radiativo, en una localidad y tiempo determinados, depende de la radiación dispersada al espacio exterior. Ésta, a su vez, depende del tamaño y propiedades ópticas de los aerosoles, de su abundancia y del ángulo del sol con el cenit. Por su parte, el efecto indirecto es consecuencia de que los núcleos de condensación de nubes aumentan en número con el incremento en la concentración de los aerosoles. Esto hace que se afecte la habilidad de la Tierra para reflejar la fracción de la radiación solar total que incide en su superficie (Seinfeld y Pandis 1998).

Un porcentaje alto de los aerosoles antropogénicos en la troposfera es el resultado fundamentalmente de las emisiones de bióxido de azufre que se generan en la quema de combustibles fósiles y de biomasa. El efecto neto de los aerosoles es negativo en lo que respecta al forzamiento radiativo (es decir, un efecto neto de enfriamiento en el clima). Aunque debido a sus vidas cortas en la atmósfera sus concentraciones responden rápidamente a cambios en las emisiones, desde el punto de vista regional los efectos negativos en el forzamiento radiativo de los aerosoles pueden balancear el forzamiento positivo de los gases de efecto invernadero. Aunque el bióxido de azufre no está controlado por la CMNUCC, los países signatarios del Protocolo de Kioto deberán informar de las emisiones de este gas.

Las investigaciones actuales indican que el carbono elemental puede tener un forzamiento radiativo positivo, sólo inferior al bióxido de carbono en toda la atmósfera (Jacobson 2000). De esta forma es posible que el forzamiento radiativo neto de los aerosoles sea ligeramente positivo, pero esto es todavía altamente incierto.

Las mayores incertidumbres en la estimación del forzamiento radiativo se tienen en la contribución del carbón elemental y del carbón orgánico, de la quema de biomasa, del polvo mineral, del efecto indirecto de los aerosoles, del efecto de la aviación, del cambio de uso de suelo y de los cambios en el Sol (IPCC 2001).

## BIBLIOGRAFÍA

- Albritton, D. L. y L. G. Meira. 2001. *Technical Summary: A report accepted by Working Group I of the IPCC*.
- EPA (Environmental Protection Agency). 2002. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2000*. Washington, D.C.: Office of Atmospheric Programs.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. *Climate Change 1995: The Scientific Basis. Group I, 2<sup>nd</sup> Assessment Report*. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical Summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.
- Jacobson, M. Z. 2000. A physically-based treatment of elemental carbon optics: Implications for global direct forcing of aerosols. *Geophys. Res. Lett.* 27: 217-220.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente). 1999. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, CMNUCC. Bonn, Alemania.
- Seinfeld, J. H. y S. Pandis. 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics From Air Pollution to Climate Change*. New York: John Wiley and Sons.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). Disponible en: <http://www.unfccc.int/resource/docs/2000/sbi/inf13.pdf>.

## Notas

---

\* Instituto Mexicano del Petróleo.



# Registro histórico de los principales países emisores

*José Luis Arvizu Fernández\**

## ANTECEDENTES

Con el inicio de la Revolución Industrial, la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI) de la atmósfera mostró los siguientes incrementos: bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), 31%; metano ( $\text{CH}_4$ ), 151%, y óxidos de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ), 17%. Los científicos consideran que estas adiciones son resultado de la quema de los combustibles fósiles y, en menor proporción, de la contribución de otras actividades humanas (IPCC 2001).

La temperatura del planeta aumentó en aproximadamente  $0.6^\circ\text{C}$  durante el siglo xx. Desde 1861, la década más caliente ha sido la de los años noventa, y el año más caluroso fue 1998 (Depledge 2002). Esta tendencia se ha atribuido a la acumulación de  $\text{CO}_2$  y de otros gases en la atmósfera, derivados de la actividad humana (ver los capítulos *¿Qué es el efecto invernadero?*, de R. Garduño, y *Los gases regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de D. H. Cuatecontzi y J. Gasca, en esta sección).

El objetivo fundamental de este capítulo es el de presentar la información sobre los principales países emisores de GEI, su contribución a las emisiones totales y su índice de emisión por habitante, así como establecer el papel de nuestro país en el contexto mundial.

En este capítulo también se analiza la información del tema durante la última centuria, iniciándose con una visión global de las aportaciones al efecto invernadero de las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ , y posteriormente se clasifica a las *emisiones en: históricas por región y país, y emisiones actuales por región y por país.*

## IMPORTANCIA Y CONTRIBUCIÓN DE LOS GEI

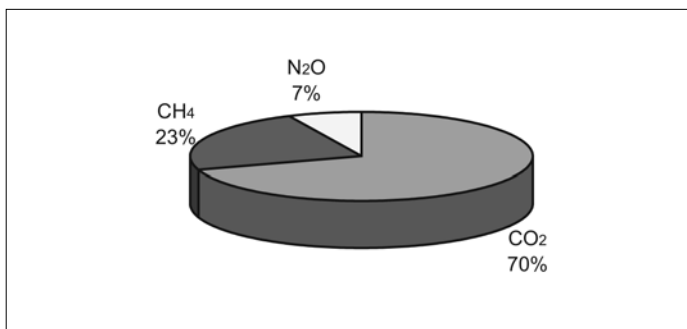
En la gráfica 1 se muestra la contribución de las emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  al efecto invernadero en el siglo pasado.

En la gráfica 2 se presentan las emisiones históricas de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . Se observa que la tasa de crecimiento de las emisiones de  $\text{CO}_2$  ha sido mayor que la de  $\text{CH}_4$ . Las fuentes emisoras de bióxido de carbono consideradas para elaborar la gráfica fueron: la quema de combustibles fósiles sólidos, líquidos y gaseosos, y la producción de cemento. En tanto que las fuentes productoras de metano consideradas fueron: las emisiones fugitivas derivadas de la producción y suministro de combustibles, las minas de carbón, la quema de biomasa, la crianza de ganado (fermentación entérica y desechos), el cultivo de arroz y los rellenos sanitarios de basura.

En la gráfica 3 se presentan las emisiones de  $\text{CH}_4$  de acuerdo con sus fuentes emisoras, destacando la contribución de la crianza de ganado y el cultivo de arroz, y siguiendo en importancia la quema de biomasa, los rellenos sanitarios y las minas productoras de carbón, y, finalmente, las emisiones fugitivas resultantes del manejo y almacenamiento de combustibles.

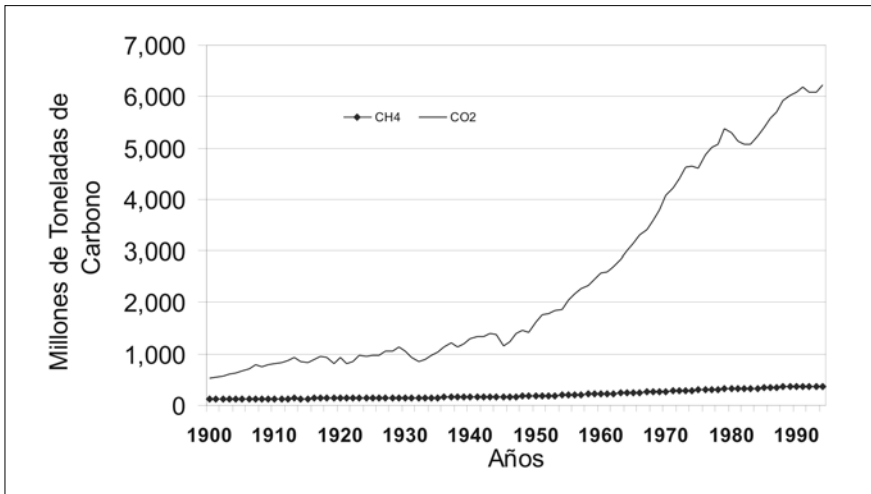
En la gráfica 4 se presentan las diferentes fuentes de emisiones de metano y su contribución en el año de 1994. Como puede observarse, la mayor contribución proviene de la crianza de ganado y de los cultivos de arroz. En los últimos 50 años ésta no ha variado significativamente.

GRÁFICA 1. CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO EN EL SIGLO XX



Fuente: McKenzie 2001.

GRÁFICA 2. EMISIONES HISTÓRICAS DE CO<sub>2</sub> Y CH<sub>4</sub>, EXPRESADAS COMO CARBONO<sup>A</sup>

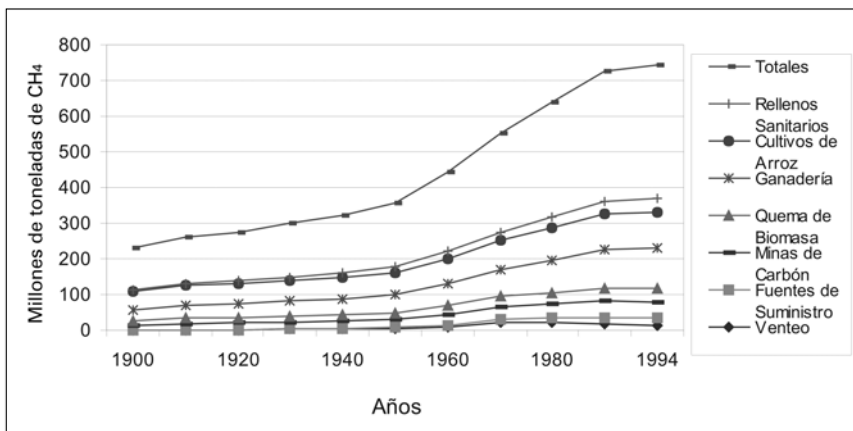


<sup>A</sup> toneladas de CO<sub>2</sub> = toneladas de carbono \* (44/12).

toneladas de CH<sub>4</sub> = toneladas de carbono \* (16/12).

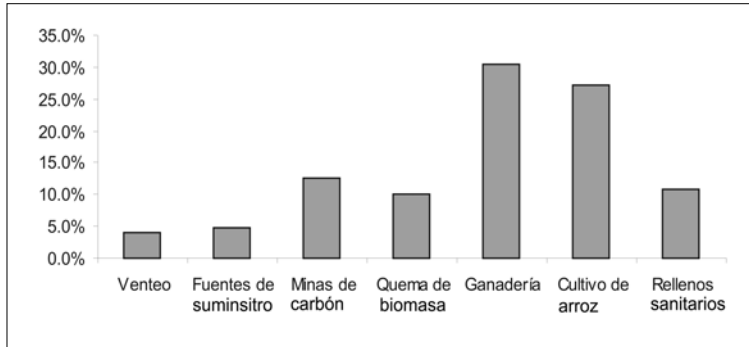
Fuente: Marlan *et al.* 2003.

GRÁFICA 3. EMISIONES HISTÓRICAS DE METANO Y SUS FUENTES



Fuente: Marlan *et al.* 2003.

GRÁFICA 4. CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LAS EMISIONES DE METANO POR FUENTE, 1994

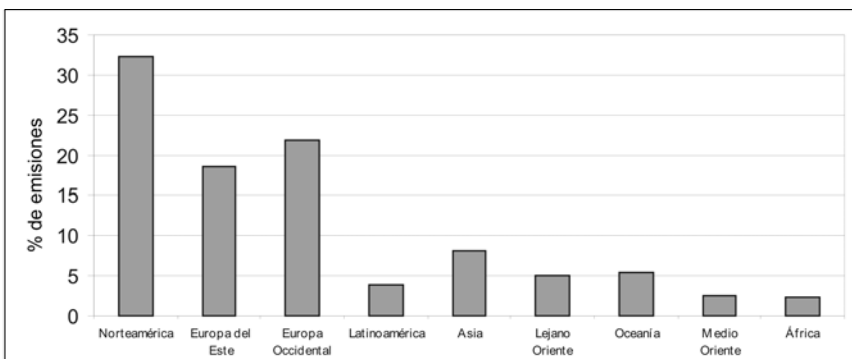


Fuente: Marlan *et al.*, 2003.

## EMISIONES HISTÓRICAS DE CARBONO POR REGIÓN

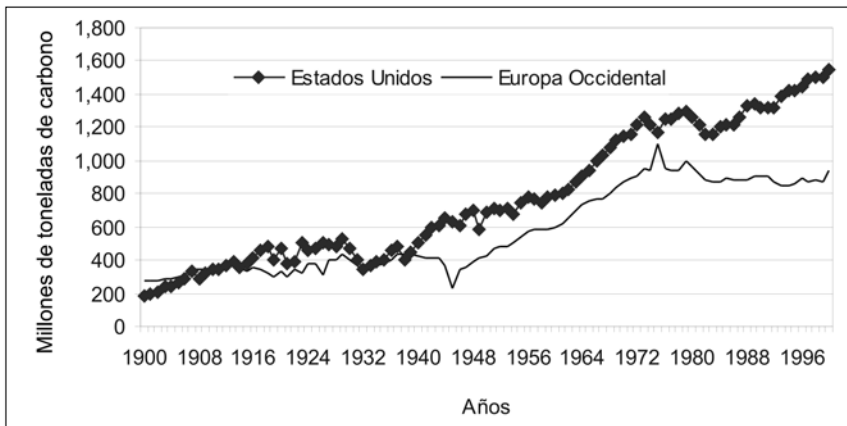
Las emisiones históricas de carbono producto de la quema de combustibles fósiles en el periodo de 1900 a 2000, fueron de 261,233 millones de toneladas. Las emitidas por Norteamérica representaron 32.2%, siguen Europa Occidental con 21.9%, Europa del Este con 18.5%, Asia con 8.2%, Oceanía con 5.4%, Lejano Oriente con 5.0%, Latinoamérica con 3.9%, Medio Oriente con 2.5%, y África con 2.4% (gráfica 5).

GRÁFICA 5. CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LAS EMISIONES HISTÓRICAS POR REGIÓN



Fuente: Marlan *et al.* 2003.

GRÁFICA 6. EMISIONES HISTÓRICAS TOTALES DE CARBONO

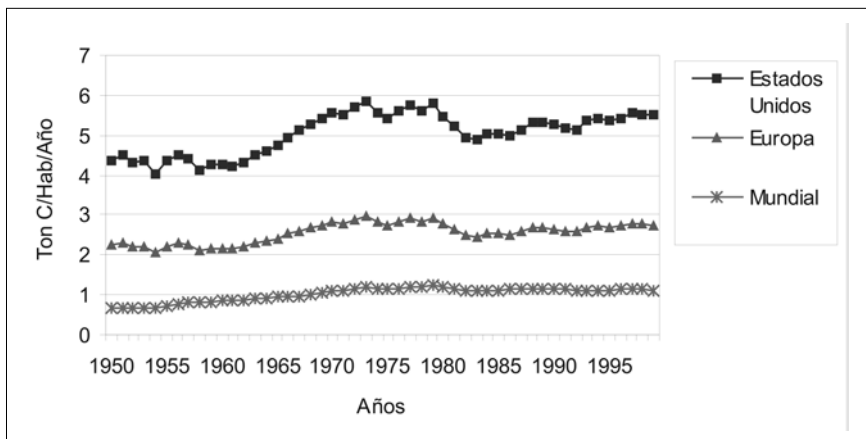


Fuente: Marlan *et al.* 2003.

Estados Unidos y Europa Occidental han contribuido de manera similar a las emisiones totales durante el último siglo. En la gráfica 6 se presentan las emisiones de ambas regiones y su comportamiento a partir de 1900.

Por otro lado, los índices de emisión per cápita han sido más altos históricamente para Estados Unidos que para Europa Occidental (gráfica 7). En el primer caso se han mantenido en valores de 5 toneladas de carbono por habitante por año, en promedio, y en el caso de Europa Occidental estos

GRÁFICA 7. ÍNDICES ANUALES DE EMISIONES HISTÓRICAS DE CARBONO PER CÁPITA



Fuente: Marlan *et al.* 2003.

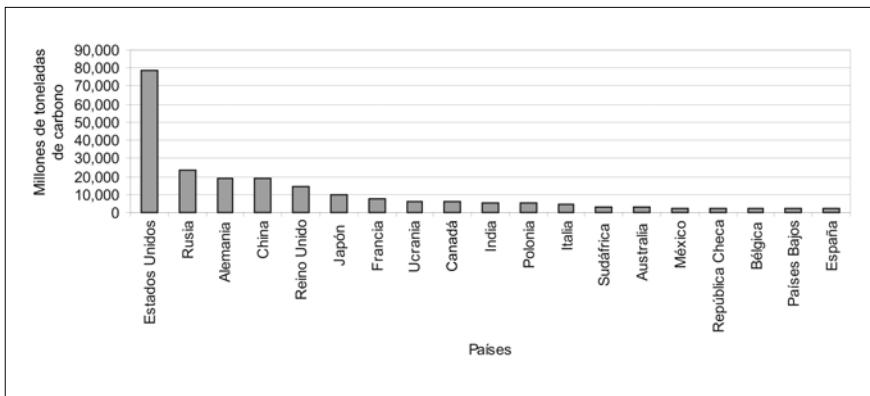
valores han oscilado entre 2 y 3. En ambos casos, estos valores están por encima del promedio mundial, que es ligeramente superior a una tonelada de carbono por habitante por año.

## EMISIONES HISTÓRICAS POR PAÍS

El total de carbono emitido en el siglo pasado a partir de la quema de combustibles fósiles fue de 261,233 millones de toneladas, en las que 19 países contribuyeron con 82.8% de las emisiones, y el resto del mundo contribuyó con el 17.2%.

México emitió 2,627 millones de toneladas de carbono que corresponden al 1% de las emisiones totales durante el período considerado (1900-2000), ubicándose en la posición número 15, junto con la ahora República Checa y Bélgica cuyas emisiones fueron similares (ver el capítulo *Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México*, de L. G. Ruiz y X. Cruz, en esta sección).

GRÁFICA 8. EMISIONES HISTÓRICAS DE CARBONO POR PAÍS, 1900-2000

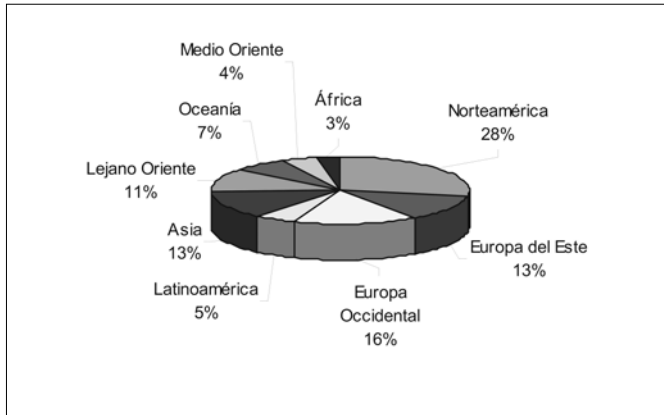


Fuentes: Marlan *et al.* 2003; IEA-OECD 2002.

## EMISIONES ACTUALES POR REGIÓN

Para observar la contribución de los países a las emisiones en el año 2000, expresadas en términos de carbono, se ha tomado la distribución regional

GRÁFICA 9. CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE LAS EMISIONES DE CARBONO POR REGIÓN EN EL AÑO 2000



Fuente: IEA-OECD 2002.

de los países, como se muestra en la gráfica 9. Esta distribución clasifica a los países en nueve regiones, las cuales en su conjunto emitieron 6,388 millones de toneladas de carbono.

En las nueve regiones consideradas existen ciertos países que tienen mayor contribución; tal es el caso de Estados Unidos, que aporta 92.6% de la región de *Norteamérica*. En *Asia*, China aporta 92.6% de las emisiones de esta región y es el principal productor de carbón y cemento en el mundo. En *Europa del Este* influyen Rusia y Ucrania. En el *Lejano Oriente* 56.5% de las emisiones de la región son aportadas por la India y Corea del Sur, en tanto que Indonesia, Taiwán, Tailandia, Pakistán, Malasia, Singapur y Filipinas contribuyen con 40% (Marlan *et.al.* 2003).

En *Europa Occidental* dominan Alemania, Reino Unido, Italia, Francia y España, los cuales contribuyen con 74% de las emisiones de la región. Alemania es el segundo país importador de gas natural y el cuarto de crudo. En *Oceanía*, Japón y Australia contribuyen con 97% de las emisiones. Japón es el principal país importador de carbón y gas licuado en el mundo, el segundo de crudo y el tercero de gas natural. En la región de *Centro y Sudamérica*, México y Brasil contribuyen con 51.6% de las emisiones; México contribuye con 98 de las 359 millones de toneladas de carbono que se emiten en la región. Otros países que emiten más de 10 millones de toneladas de carbono son: Venezuela (34.3), Argentina (37.6), Colombia (17.4) y Chile (17.1).

El índice de emisión promedio de la región es inferior a 0.75 toneladas de carbono por habitante por año, y de 1.1 toneladas por habitante por año para México y Chile, de 1.0 para Argentina, en tanto que para Brasil es de 0.5 toneladas de carbono por habitante por año (Marlan *et al.*, 2003).

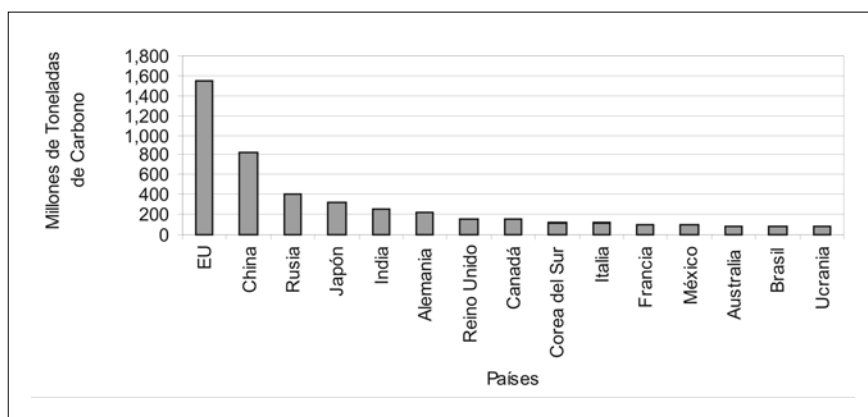
En Medio Oriente Arabia Saudita, Irán y Turquía, aportan el 62% de las 339 millones de toneladas de emisiones de carbono estimadas. En tanto que África está dominada por Sudáfrica, que contribuye con 42% de las emisiones, y otro 37% de las mismas es aportado por Egipto, Nigeria, Libia y Algeria. El índice de emisión promedio tiene un valor menor a 0.1 toneladas de carbono por habitante por año para 31 de las 54 naciones africanas, siendo superior en Libia con 2.26, Sudáfrica con 2.12, y Santa Elena con 1.17 (Marlan *et al.* 2003).

### EMISIONES ACTUALES POR PAÍS

En la gráfica 10 se presentan los 15 países con mayores emisiones de carbono provenientes del uso de combustibles fósiles durante el año 2000. Como puede observarse, el orden de los países cambia en relación con su registro histórico, a excepción de Estados Unidos, que ocupa el primer lugar con 24.19% de las emisiones, seguido por China con 12.79%, Rusia con 6.43%, y Japón con 4.93% (IEA-OECD 2002).

También se puede observar que países como República Checa, Países Bajos y Bélgica ya no aparecen en esta segunda clasificación, como sucede

GRÁFICA 10. EMISIONES DE CARBONO POR PAÍS EN 2000



Fuente: IEA-OECD 2002.



en las emisiones históricas debido a que existen países como Corea del Sur y Brasil; cuyas emisiones actuales están por arriba de las emisiones de los tres primeros países mencionados (Marlan *et al.* 2003, IEA-OECD 2002).

## CONCLUSIONES

Las emisiones históricas mundiales por quema de combustibles fósiles fueron de 261,233 millones de toneladas de carbono para la última centuria, y de 6,388 millones de toneladas para el año 2000. Se observa una tendencia en las regiones y países industrializados, a excepción de Estados Unidos, de reducir las emisiones en la última década.

El desarrollo industrial ha ubicado históricamente a Estados Unidos como el principal país emisor de CO<sub>2</sub>, al contribuir con 30.3% de las emisiones históricas y con 24.19% de las emisiones en el año 2000.

Existen 15 países que contribuyen con 71.4% de las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales por quema de combustibles fósiles; entre ellos se encuentra México en la posición 12, con 98 millones de toneladas de carbono, que representa 1.54%. Al considerar a México en el contexto de América Latina y El Caribe, nuestro país contribuye con 27.3% de las emisiones, con un índice de 1.1 toneladas de carbono por habitante por año.

En lo que respecta al CH<sub>4</sub>, este gas ha contribuido históricamente con 23% de las emisiones mundiales de GEI, siendo sus fuentes principales la crianza de ganado y el cultivo de arroz, y en menor proporción la quema de biomasa, los rellenos sanitarios y las minas de carbón.

## BIBLIOGRAFÍA

- Depledge, J. 2002. *Climate Change in Focus: The IPCC Third Assessment Report*. The Royal Institute of International Affairs. Briefing Paper new series No. 29.
- EPA (Environmental Protection Agency). *Global Warming; Climate*. Disponible en: <http://www.epa.gov/globalwarming/climate/index.htm>.
- IEA-OECD (International Energy Agency y Organization for Economic Co-operation and Development). 2002. *CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion 1971-2000*. París, Francia.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report*

- of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary.* Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.
- MacKenzie, J. 2001. *Thinking long term: Confronting global climate change.* World Resources Institute. Disponible en: <http://www.wri.org/climate/longterm/index.html>.
- Marlan G., Boden T. y B. Andres. 2003. *Global, Regional and National CO<sub>2</sub> Emissions.* Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). Oak Ridge National Laboratory, U. S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn. Disponible en: <http://cdiac.esd.ornl.gov/>
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). *Greenhouse Gas Inventory Database (GHG).* Disponible en: <http://www.unfccc.de/resources/index.html>.
- WRI (World Resources Institute). 2002. *Contributions to Global Warming Map.* Washington D.C. Disponible en: <http://www.wri.org/climate>.

## Notas

---

\* Instituto de Investigaciones Eléctricas.

# Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México

*Luis Gerardo Ruiz Suárez  
y Xóchitl Cruz Núñez\**

LAS EMISIONES DE GASES de efecto invernadero por actividades antropógenicas en México se han estimado en tres ocasiones: Primera y Segunda Comunicaciones de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (ver el capítulo *Las comunicaciones nacionales ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de A. Fernández y J. Martínez, en la sección v). Éstas comprenden prácticamente toda actividad humana. Por ejemplo, la producción de alimentos y otras mercancías, el transporte de éstas y de personas, la generación de energía para realizar esas actividades, la disposición de los desechos urbanos e industriales, etc.

La más reciente estimación de las emisiones es el Segundo Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, 1994-1998 (INE, 2002). Este esfuerzo ha incluido a especialistas de diferentes dependencias, entre las que se encuentran: el Centro de Ciencias de la Atmósfera, el Instituto de Ingeniería y el Instituto de Ecología de la UNAM; el Instituto Mexicano del Petróleo y el Instituto de Investigaciones Eléctricas, coordinados todos por el Instituto Nacional de Ecología de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Este inventario incluye las emisiones de 1994, 1996 y 1998. De ellos, solamente el inventario de 1996 (cuadro 1) incluye las emisiones generadas por el cambio en el uso del suelo y la silvicultura. A fines del año 2000, cuando se desarrolló este trabajo, el Inventario Nacional Forestal 2000 no se había publicado aún, por lo que los datos de la tasa de deforestación actualizada no estaban disponibles. Para algunos sectores, como el de energía (combustión fija), se dispone de estimados anuales de 1990 a 1998.



<i>4 Agricultura</i>					
A Fermentación entérica	2170.644	32.549	12.715	223.870	
B Manejo de abono	2,080.67				
C Cultivo de arroz	65.780	0.021			
D Suelos agrícolas	13.534	32.197			
E Quema de sabanas					
F Quema <i>in situ</i> de residuos agrícolas	10.660	0.352	12.715	223.870	
<i>5 Cambio de uso de suelo y forestación</i>	157302.216				
A Incorporación de bosques	184.290	0.806	45.793	1612.535	
B Incorporación de tierras abandonadas	-11784.385				
C Emisiones directas por despalme	52139.573				
D Emisiones retrasadas por despalme	57932.859				
E Emisiones de suelos	89221.000				
<i>6 Residuos</i>	2938.573				
A Tiraderos y rellenos sanitarios	1677.605				
B Plantas de tratamiento (urbanas)	1260.969				
C Incineración de residuos					

Para realizar una comparación de la contribución de cada sector de la economía al total de las emisiones del país, es necesario estandarizarlas con un indicador común. El concepto que permite hacer esto es el de “Potencial de Calentamiento Global (PCG)”. Se denomina gases de efecto invernadero a aquellos capaces de atrapar la radiación infrarroja que escapa de la superficie de la Tierra hacia el espacio y transferirla, en forma de calor, al resto de los gases que forman la atmósfera (ver los capítulos *¿Qué es el efecto invernadero?*, de R. Garduño, y *Los gases regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de D. H. Cuatecontzi y J. Gasca, esta sección). Esta capacidad depende de su estructura molecular y su tiempo de residencia en la atmósfera, antes de ser transformado en otro compuesto. Por ejemplo, el metano es oxidado a bióxido de carbono, y éste es absorbido por los océanos o las plantas. Entre más compleja es su estructura y más grande su tiempo de residencia en la atmósfera, mayor es su PCG.

Los gases de efecto invernadero se dividen en gases de efecto directo e indirecto. Los de efecto indirecto son aquellos que tienen capacidad para influir en la concentración atmosférica de otros gases de efecto invernadero; por ejemplo, el ozono, el cual además de su carácter oxidante en la atmósfera baja, también puede atrapar radiación infrarroja y filtrar la radiación ultravioleta.

Los gases de efecto invernadero directo son el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los halocarbonos. Entre los halocarbonos se encuentran los clorofluorocarbonos, como el freón ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ), que es uno de los gases controlados por el Protocolo de Montreal por sus efectos en la capa estratosférica de ozono; y los compuestos diseñados para sustituirlos (ver el capítulo *Los gases regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de D. H. Cuatecontzi y J. Gasca, esta sección), los hidroclorofluorocarbonos como el HCFC-21. Los compuestos de efecto invernadero indirecto son los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), el monóxido de carbono (CO), el bióxido de azufre y los compuestos orgánicos volátiles no metánicos (COVNM). Estos últimos compuestos son precursores de ozono y se deben regular en las zonas urbanas para controlar la formación de ozono y partículas suspendidas.

Sólo a los gases de efecto invernadero directo se les puede asignar un PCG. La formación de ozono a partir de sus precursores no guarda una relación lineal y por ello no se puede asignar un factor de conversión. El PCG cambia dependiendo del escenario de tiempo que se desea comparar. El

CUADRO 2. POTENCIALES DE CALENTAMIENTO GLOBAL (EN UNA BASE MÁSCA) EN RELACIÓN CON EL BIÓXIDO DE CARBONO PARA ALGUNOS GASES CUYAS VIDAS MEDIAS HAN SIDO BIEN CARACTERIZADAS

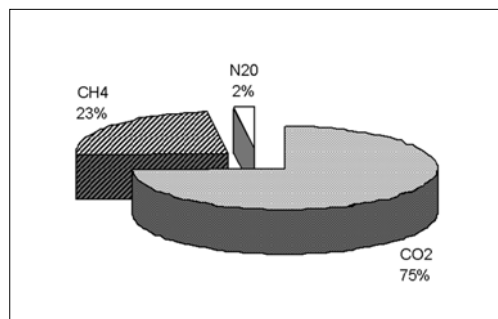
GAS	VIDA MEDIA (AÑOS)	POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL HORIZONTE TEMPORAL		
		20 AÑOS	100 AÑOS	500 AÑOS
Bióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1	1	1
Metano	CH <sub>4</sub>	12	62	23
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	114	275	296
CFC-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	100	10,200	10,600
HCFC-21	CHCl <sub>2</sub> F	2	700	210

Fuente: IPCC 2001.

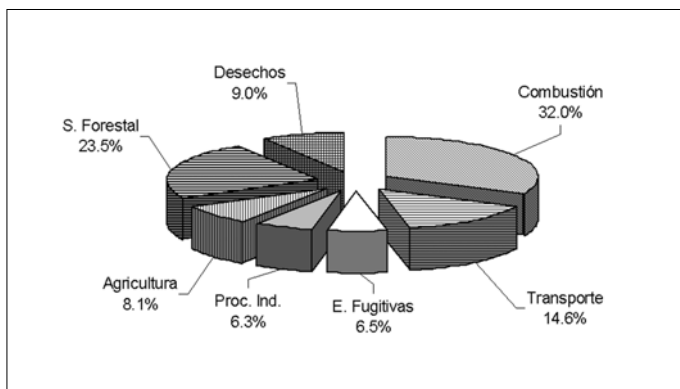
acuerdo internacional es usar un escenario a 100 años. El compuesto de referencia es el CO<sub>2</sub>, y el PCG establece a cuántos gramos de CO<sub>2</sub> equivale un gramo de otro compuesto (cuadro 2).

Una vez realizada la conversión de las emisiones de los diferentes gases de todos los sectores a emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>, utilizando los PCG (cuadro 2), es posible comparar la contribución relativa de cada gas y sector (figuras 1 y 2). Esta comparación es útil, pues al determinar la contribución por sector permite establecer grados de responsabilidad, y también es el primer paso para identificar opciones de reducción de emisiones. Otra apli-

FIGURA 1. EMISIONES POR GASES EN EQUIVALENTES DE CO<sub>2</sub>



Fuente: INE 2002.

FIGURA 2. EMISIONES POR SECTOR EN EQUIVALENTES DE CO<sub>2</sub>

Fuente: INE 2002.

cación de la comparación es identificar las fuentes en las que más esfuerzo se debe realizar para calcular correctamente las emisiones.

En el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC), al servicio de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático, y con la contribución de especialistas de muchos países interesados, incluyendo mexicanos, se han elaborado metodologías y guías de buenas prácticas para la elaboración de los inventarios de emisiones (IPCC 1997, IPCC 2000) (ver el capítulo *El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*, IPCC, de M. Ávalos, en la sección II). Los inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero en México se realizan aplicando esas metodologías. Entre las recomendaciones que se proponen está la de estimar la contribución porcentual de cada fuente, dentro de cada sector, para cada gas al total nacional. Esta estimación debe realizarse en términos de emisiones equivalentes de CO<sub>2</sub>. Luego, aplicar un ordenamiento jerárquico de estas emisiones y acumularlas de mayor a menor hasta completar 95%. Esa información identifica las fuentes y los gases para los cuales cada país, principalmente los desarrollados, debe luchar por estimarlos mejor y poner esfuerzos y recursos para disminuir las emisiones. Esta comparación debe realizarse con un grado de detalle como el del propio inventario. En este caso se realiza hasta el segundo nivel de desagregación del inventario nacional.

Los resultados para México son interesantes y preocupantes (cuadro 3). El rubro *Cambio del uso del suelo y silvicultura* comprende tres de las quince fuentes clave de la metodología mencionada. El sector de Energía compren-



CUADRO 3. ORDENAMIENTO JERÁRQUICO DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EQUIVALENTE  
POR SECTOR

NIVEL	FUENTES CLAVE		PORCENTAJE DEL TOTAL	ACUMULADO PORCENTUAL
1	Cambio del uso del suelo otras			
	c. Emisiones de suelos	CO <sub>2</sub>	12.30	12.30
2	Transporte b. Autotransporte	CO <sub>2</sub>	12.21	24.51
3	Energía otros a. Generación de electricidad	CO <sub>2</sub>	11.43	35.94
4	Industria (ISIC)	CO <sub>2</sub>	8.56	44.50
5	Cambio del uso del suelo otras	CO <sub>2</sub>	7.99	52.49
	b. Emisiones tardías por desmonte			
6	Cambio del uso del suelo otras	CO <sub>2</sub>	7.19	59.68
	a. Emisiones directas por desmonte			
7	Energía fugitivas 2 Petróleo y gas natural	CH <sub>4</sub>	6.15	65.83
8	Agricultura A Fermentación entérica	CH <sub>4</sub>	6.03	71.85
9	Industrias de la Energía	CO <sub>2</sub>	5.37	77.23
10	Desechos A Desechos sólidos en suelos	CH <sub>4</sub>	4.86	82.09
11	Desechos B Tratamiento de aguas de desecho	CH <sub>4</sub>	3.65	85.74
12	Energía otros b. Residencial	CO <sub>2</sub>	3.08	88.82
13	Procesos industriales C Producción de metales	CO <sub>2</sub>	2.97	91.79
14	Procesos industriales C Producción de metales	CO <sub>2</sub>	2.30	94.09
15	Agricultura D Suelos agrícolas	N <sub>2</sub> O	1.38	95.47

de seis, el de Procesos industriales comprende dos fuentes clave, el sector de Agricultura otras dos, y el de Residuos también.

La contribución porcentual de las emisiones de diferentes rubros refleja la estructura económica de los países. Así, el análisis de las fuentes clave de países desarrollados contendrá un componente importante de las actividades industriales y del sector energético, mientras que los países en desarrollo, con actividades de deforestación y conversión de bosques a tierras de cultivo, presentarán emisiones de este rubro con mayor proporción. Debe señalarse que ningún país de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) presenta una estructura de emisiones como la nuestra. Desglosado al segundo nivel de agregación (cuadro 1), el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero tiene como la primera fuente de importancia las emisiones de CO<sub>2</sub> por transporte, incluyendo todos los modos de transporte. Le siguen las emisiones de CO<sub>2</sub> por suelos (nivel 2 de importancia); las emisiones tardías por suelos de bosques convertidos a cultivos y pastizales (nivel 5) son aún más importantes que las emisiones directas debido a la conversión directa de bosques a otros usos (nivel 6). Si

el sector transporte se desagrega al siguiente nivel (autotransporte, marítimo, aviación civil y ferrocarriles), el autotransporte representa algo más de 90% de esa fuente. En ese caso, las emisiones de CO<sub>2</sub> superan al autotransporte, tal como se presenta en el cuadro 3. El objeto de este desglose adicional para esa fuente particular es destacar la importancia del autotransporte como el modo dominante de transporte. A su vez, también se destaca cómo la fuente de carbón por suelos compite con la anterior. Esto significa que muchos años después de haber destruido un bosque o selva, el material orgánico almacenado en el suelo en forma de raíces y restos de plantas continuará descomponiéndose a CO<sub>2</sub> y contribuyendo al calentamiento global y al inventario nacional.

Las emisiones o sumideros (mecanismos que retiran gases de la atmósfera) de CO<sub>2</sub> por suelos incluyen: 1) cambios en el carbón almacenado en el suelo y restos orgánicos en suelos minerales debido a cambios en el uso del suelo; 2) emisiones de CO<sub>2</sub> a partir de suelos orgánicos convertidos a la agricultura o plantaciones silvícolas, y 3) emisiones de CO<sub>2</sub> a partir de la aplicación de cal a suelos agrícolas. Las emisiones tardías de CO<sub>2</sub> corresponden a la degradación paulatina de restos de biomasa aérea que no fueron quemados durante la conversión de bosques o matorrales a pastizales o cultivos. Este material se degrada paulatinamente en aproximadamente diez años. Las emisiones de CO<sub>2</sub> por conversión directa de bosques o selvas corresponden a la quema en el sitio o como leña de parte de la biomasa aérea existente en el área siendo convertida a pastizales o cultivos.

El sector de energía presenta seis de las dieciséis fuentes más importantes. Primero están las emisiones del transporte y la generación de electricidad (niveles 2 y 3); le sigue la producción y consumo de energía por la industria (nivel 4); las emisiones fugitivas de gas natural ocupan el séptimo lugar; las de la industria energética, el décimo lugar, y el consumo doméstico, el décimo segundo lugar. Una revisión con mayor detalle del subsector transporte muestra que el autotransporte aporta 91.11% de las emisiones de CO<sub>2</sub>; otras formas más eficientes energéticamente, como son la navegación y el ferrocarril, aportan sólo 3.58% de las emisiones del subsector. Esta diferencia se explica no tanto por la eficiencia como por su reducida participación en el mercado del transporte.

El sector industrial comprende las emisiones de GEI como subproducto de algún proceso de transformación. Entre éstos, la producción de metales y minerales se reporta como fuente clave, en los lugares 13 y 14, respectivamente.

El sector de agricultura presenta como fuentes clave las emisiones de metano por fermentación entérica en el noveno nivel, y las emisiones de óxido nitroso por suelos agrícolas en último lugar.

En el sector de desechos, las emisiones de metano por disposición de desechos sólidos en rellenos sanitarios ocupa el décimo lugar entre las fuentes clave, y el manejo de aguas residuales ocupa el onceavo lugar. Este sector es de acelerado crecimiento en sus emisiones debido a la creciente aplicación de la normatividad ambiental sobre disposición de desechos sólidos urbanos y tratamiento de aguas residuales. El ritmo de crecimiento de las emisiones de este sector, y los todavía muy notables retrasos en el manejo de desechos sólidos y tratamiento de aguas residuales, hacen esperar una mayor participación en inventarios futuros. A su vez, también señala oportunidades de mitigación que podrían ser costo-eficientes.

La comparación entre sectores al interior del país es útil para determinar la importancia relativa de los sectores; otra comparación interesante podría ser con otros países, por ejemplo con socios comerciales, con países competidores o con países de desarrollo similar al nuestro (ver cuadro 4). El lector notará que la forma como se agrupan los sectores no es la misma que en los cuadros 1 y 3; esto se debe a la necesidad de agrupar las emisiones en forma tal que permita la comparación con los otros países (ver el capítulo *Los principales países emisores, emisiones históricas*, de J. L. Arvizu, en esta sección).

En el cuadro 4 se observa que el subsector de transporte presenta la misma importancia relativa en México que en Argentina (SNRSD 1999), Tailandia (MTET 2000) y Corea (GROK 1998), y es significativamente más alta su participación en el promedio de la Unión Europea (CEC 2001). Además, las emisiones por procesos industriales tienen una muy parecida participación en la Unión Europea, Corea, México y Tailandia. Las emisiones del sector agrícola tienen un peso muy reducido en Indonesia (MERI 1994), parecido a México, y en el promedio de la Unión Europea, en subsectores diferentes, ya que en México casi toda su importancia radica en la fermentación entérica y para Tailandia y Argentina es notablemente mayor. Ningún país de la OCDE o del Anexo 1 de la CMNUCC presenta como fuente individual más importante las emisiones de CO<sub>2</sub> por suelos, incluyendo los países con economías en transición. En el cuadro 4, sólo en Indonesia y Tailandia que el sector de Cambio del uso del suelo tiene una participación parecida a la nacional. México presenta la más alta participación de emisiones por el manejo de desechos; la Argentina tiene una participación similar, pero menor.

CUADRO 4.  
EMISIONES NACIONALES DE GEI: CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL (REFERENCIAS A LOS INVENTARIOS NACIONALES EN EL TEXTO)

	UNIÓN EUROPEA 1994	ARGENTINA 1994	INDONESIA 1994	COREA 1990	Tailandia 1994	México 1996
1A Combustión 1. Industrias energía	25.7%	12%	2%	15.1%	14.0%	5%
1A Combustión 2. Industrias de manufactura y construcción	14.4%	6%	2%	34.5%	9.5%	9%
1A Combustión 3. Transporte	18.2%	13%	2%	16.9%	12.3%	14%
1A Combustión 4. Otros sectores	15.4%	9%	1%	15.1%	1.4%	16%
1A Combustión 5. Otros	0.3%	1%			1.5%	
1B. Emisiones fugitivas de combustibles	2.1%	7%		2.0%	1.3%	6%
2. Procesos industriales	5.7%	2%	16%	6.9%	4.9%	6%
3. Solventes y uso de otros productos	0.2%					
4. Agricultura A. Fermentación entérica	3.2%	22%	1%	1.2%	4.1%	6%
4. Agricultura B. Manejo de abono	1.6%	1%		0.3%	2.7%	
4. Agricultura C. Cultivo de arroz	0.1%		2%	3.4%	13.6%	
4. Agricultura D. Suelos agrícolas	4.3%	20%	1%	0.0%	3.4%	1%
4. Agricultura E. Quema de sabana						
4. Agricultura F. Quema <i>in situ</i> de residuos agrícolas						
4. Agricultura G. Otros						
5. Cambio de uso de suelo y forestación A. Cambios en bosques y otros almacenes de biomasa forestal		-1797%	8%		12.4%	
5. Cambio de uso de suelo y forestación B. Conversión de bosques y pastizales	0.3%		13%		18.7%	
5. Cambio de uso de suelo y forestación C. Abandono de tierras de labor		-3381%	3%			

5. Cambio de uso de suelo y forestación D. Emisiones y remoción de CO <sub>2</sub> del suelo	0.7%				
5. Cambio de uso de suelo y forestación E. Otros	0.3%	48%			28%
6. Residuos A. Tiraderos y rellenos sanitarios	2.7%		1.6%	0.1%	5%
6. Residuos B. Tratamiento de aguas residuales	0.3%			0.1%	4%
6. Residuos C. Incineración de residuos	0.2%				
6. Residuos D. Otros	0.1%				
7. <i>Bunkers</i> Internacionales	4.3%	1%	2.8%		

Los inventarios de los países en el cuadro pueden encontrarse también en: <http://unfccc.int/resource/natcom/nctable.html>

En esta comparación podemos ver cómo el análisis de las emisiones refleja parcialmente los problemas del desarrollo nacional, cómo compartimos problemas con países desarrollados y en desarrollo. La comparación al interior y con otros países nos permite ver qué sectores adquirirán mayor importancia, respecto a su crecimiento, en el futuro, dependiendo del éxito de nuestro desarrollo económico y social. Esta comparación nos presenta algunos de los retos al desarrollo sustentable del país.

## BIBLIOGRAFÍA

- CEC (Commission of the European Communities). 2001. *Third communication from the European Community under the UN framework convention on climate change*. Brussels.
- GROK. 1998. *National Communication of the Republic of Korea*. Submission of the ROK Under the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- INE-SEMARNAP (Instituto Nacional de Ecología-Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1995. *Preliminary National Inventory of Greenhouse Gas: Mexico*. México.
- . 1997. *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México.
- . 2001. México 2a *Comunicación Nacional* ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio, Climático. México.
- . 1997. *Updated National Inventory of Greenhouse Gas in Mexico*. México.
- . 2002. *Segundo Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1994-1998*. México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1997. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC. Geneva.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. *Good Practice Guidance an Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC. Geneva.
- . 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical Summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.
- MERI (Ministry for the Environment Republic of Indonesia). 1994. *The First National Communication on Climate Change Convention*. Yakarta, Indonesia.
- MTET (Ministry of Science, Technology and Environment of Thailand). 2000. *Thailand's Initial National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Bangkok, Thailand.

SNRSD (Secretariat for Natural Resources and Sustainable Development). 1999.  
*Revision of the First National Communication Argentine Republic.* Buenos Aires,  
Argentina.

## Notas

---

\* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.





Sección II  
Reacción del mundo ante el problema:  
la colaboración internacional



# Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, PICC

*Montserrat Avalos Gómez\**

## ANTECEDENTES

LA ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM en español o WMO en inglés), organismo especializado de las Naciones Unidas, ha realizado estudios desde 1951 sobre la influencia que tiene el CO<sub>2</sub> en la atmósfera; no fue sino hasta principios de los años setenta, que este tema cobró importancia ante la comunidad internacional, al hacerse evidente que las concentraciones de CO<sub>2</sub> estaban aumentando a pasos constantes y que la temperatura de la baja atmósfera también. Como consecuencia de la difusión de esta información científica, en 1979 se llevó a cabo la primera Conferencia del Clima Mundial, con el objetivo de revisar los conocimientos existentes sobre el cambio y la variabilidad climática debido a causas naturales y antropogénicas, y para evaluar las posibles modificaciones futuras y sus implicaciones en las actividades humanas.

A la década de 1980 se le conoce como la “década del invernadero”, debido a las altas temperaturas globales promedio registradas y a la serie de condiciones climáticas inusuales presentadas en varias partes del mundo, como sequías, inundaciones, ciclones, huracanes y tifones (Figueres y Gowan 2002). Estos eventos provocaron que el calentamiento global se volviera un tema candente en la agenda política internacional. Fue así que en 1988, después del Congreso Mundial sobre Clima y Desarrollo, el Consejo Gobernante del Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (PNUMA en español, o UNEP por sus siglas en inglés) se reunió en Kenya y estableció, de manera conjunta con la OMM, un organismo intergubernamental para realizar estudios sobre calentamiento global. Este

organismo se convirtió en lo que actualmente se conoce como el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC en español, o IPCC en inglés) o Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

## EL PICC

La amenaza de un cambio climático mundial presenta un gran desafío a todos los responsables de políticas públicas. El cambio climático es un problema con enormes complicaciones debido a: las considerables incertidumbres propias de una cuestión tan compleja; la posibilidad de daños y costos irreversibles; que son periodos muy largos entre las emisiones y los posibles efectos; que se tienen que considerar varios gases de efecto invernadero (GEIS); que las causas y los efectos varían extensamente entre regiones, y que los resultados de acciones para mitigarlo son a muy largo plazo. La creación de políticas para proteger eficazmente los sistemas humanos y naturales del cambio climático se complica aún más si se considera que se requiere de la cooperación internacional.

Para que los tomadores de decisiones puedan decidir el rumbo a seguir, requieren de información científica, técnica y socioeconómica, objetiva y ampliamente aceptada sobre el cambio climático. Es necesario conocer sus repercusiones en varios ámbitos, así como posibles opciones de respuesta para poder evaluar los costos y beneficios, y los riesgos de tomar una posición activa o pasiva frente al problema.

Por todo lo anterior se hizo necesaria la existencia de un organismo que evaluara de manera objetiva, abierta y transparente la información relevante sobre el cambio climático. El PNUMA y la OMM establecieron el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Este grupo de expertos no realiza investigaciones ni monitoreos de datos climáticos u otros parámetros relevantes. Su tarea es evaluar exhaustivamente la información disponible, a nivel mundial, sobre todo lo relacionado con el cambio climático. También proporciona asesoramiento científico, técnico y socioeconómico a la Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).

## ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL DEL PICC

El PICC es un órgano científico-técnico intergubernamental. Todos los Estados miembros de las Naciones Unidas y de la Organización Meteorológica Mundial son miembros de éste y de sus grupos de trabajo. Para atender el mandato de evaluar la información científica y técnica existente sobre el clima y el cambio climático, identificar y evaluar los impactos económicos y sociales del desarrollo de estrategias potenciales de respuesta a estos impactos, el Panel está dividido en tres grupos de trabajo para considerar cada uno de esos aspectos, más un equipo especial sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

- i) *Grupo de trabajo I*, el grupo científico: lleva a cabo la evaluación de la información científica mundial disponible sobre cambio climático.
- ii) *Grupo de trabajo II*, el grupo de vulnerabilidad, impactos y adaptación: evalúa la vulnerabilidad de los sistemas naturales y socioeconómicos al cambio climático, y las consecuencias negativas y positivas del cambio. Asimismo, identifica los impactos a estos sistemas y propone medidas de adaptación.
- iii) *Grupo de trabajo III*, el grupo de respuesta o mitigación: evalúa opciones para limitar las emisiones de GEIS o estrategias de mitigación del cambio climático.
- iv) *Equipo especial sobre inventarios*: establecido por el PICC en 1998, lleva a cabo el Programa sobre el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.

El PICC está conformado por un presidente, una mesa directiva o consejo, y una secretaría de apoyo; además de los grupos de trabajo y el equipo especial sobre inventarios que cuentan, cada uno, con una unidad de apoyo técnico.

Las actividades del PICC son financiadas por un fideicomiso, manejado por la secretaría de apoyo, que recibe contribuciones de los gobiernos, de la OMM y del PNUMA.

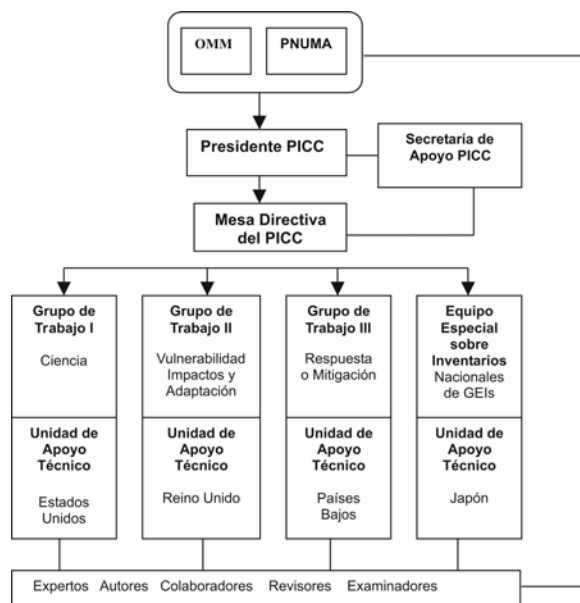
El grupo de expertos se reúne en sesiones plenarias aproximadamente una vez al año y participan representantes de gobierno. Las organizaciones no-gubernamentales e intergubernamentales son bienvenidas en calidad de observadores. Durante esas reuniones se establece la estructura del PICC y sus principios y procedimientos, el programa de trabajo, la estructura y con-

tenidos de los informes y el presupuesto. En las reuniones plenarias también se elige al presidente, a la mesa directiva y al consejo del equipo especial sobre inventarios; se aprueban los mandatos y planes de trabajo de los grupos, y se adoptan los informes. La mesa directiva del PICC se reúne dos o tres veces por año, y ayuda al presidente a planificar, coordinar y monitorear la evolución de las actividades de trabajo del organismo (<http://ipcc.ch/about/bspanish.pdf>).

La secretaría de apoyo planea, supervisa y administra todas las actividades del PICC, incluyendo la organización de sesiones, la propuesta del presupuesto, el manejo de los recursos del fideicomiso, el monitoreo del progreso, la publicación, traducción y difusión de informes, etc.

Las actividades del PICC, incluidos los gastos de viaje de muchos expertos procedentes de países en desarrollo y de economías en transición, se financian con contribuciones voluntarias de los gobiernos y, en menor grado, de la CMNUCC. Respecto al PNUMA y a la OMM, las dos organizaciones fundadoras del PICC, éstas proporcionan personal y apoyo financiero.

A continuación se presenta el organigrama actual del PICC.



Fuente: Introducción al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). <http://www.ipcc.ch/about/chart.htm>.

## ACTIVIDADES Y PRODUCTOS PRINCIPALES DEL PICC

Como ya se mencionó, el PICC tiene como actividad principal evaluar el conocimiento mundial actual sobre cambio climático. Con el objetivo de proveer una opinión científica, autorizada e internacional, el PICC produce informes de evaluación de manera periódica, sobre las causas, impactos y posibles estrategias de respuesta ante el cambio climático. También prepara informes especiales sobre temas concretos y documentos técnicos a petición de la CMNUCC. Por último, el PICC lleva a cabo las tareas de elaborar metodologías y prácticas relacionadas con los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

Los autores de estos documentos e informes provienen de universidades, centros de investigación y asociaciones de protección ambiental procedentes de 120 países. Con el objetivo de tener una extensa representación mundial y obtener una amplia variedad de opiniones y puntos de vista actuales, los autores son designados por los gobiernos y por organizaciones internacionales, tanto de países desarrollados como de países en desarrollo y con economías de transición ([www.ucsus.org/global\\_environment/global\\_warming](http://www.ucsus.org/global_environment/global_warming)).

### A) Informes de evaluación

Cabe aclarar que el trabajo del PICC es evaluar las publicaciones técnicas, no formular recomendaciones sobre cuestiones políticas; sin embargo, estos informes sirven de estándar de referencia normalizada para todo aquel interesado en el tema del cambio climático. Los responsables de políticas, los científicos, la academia, la industria en el ámbito mundial y otros expertos hacen gran uso de éstos. En ellos también se señalan los aspectos en los que subsiste incertidumbre respecto a la información científica y técnica.

El PICC ha preparado tres Informes de Evaluación, publicados en 1990, 1995 y 2001. Cada informe contiene tres volúmenes (uno de cada grupo de trabajo) y un resumen para responsables de políticas. Estos informes se publican en los seis idiomas oficiales de las Naciones Unidas (árabe, chino, español, francés, inglés y ruso). El cuarto informe está programado para ser publicado en 2007.

## B) Informes especiales

Estos informes se preparan, con la participación de uno o más de los grupos de trabajo, sobre la base de las prioridades del Panel de Expertos y en respuesta a peticiones de la CMNUCC. Se han publicado los siguientes informes: Uso del suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura (2000); Escenarios de emisiones (2000); Cuestiones metodológicas y tecnológicas de la transferencia de tecnología (2000); La aviación y la atmósfera global (1999); Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad (1997); y el Informe Especial de 1994, que incluyó: Forzamiento radiativo del cambio climático y una evaluación de los escenarios de emisiones del PICC IS92; Guías técnicas para la evaluación de los impactos y la adaptación al cambio climático con resumen para responsables de políticas y también un resumen técnico; Guías del PICC para inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero; y Resúmenes para responsables de políticas y otros resúmenes Informe especial del PICC 1994.

El PICC decidió, en su vigésima reunión (febrero 2003), preparar dos informes especiales titulados: Salvaguardando la capa de ozono y el sistema climático global: cuestiones relacionadas con hidrofluorocarbonos y perfluorocarbonos (a publicarse en el segundo trimestre de 2005), y Captura y almacenamiento de bióxido de carbono (para el primer semestre de 2005) (Activities IPCC <http://www.ipcc.ch>).

## C) Documentos técnicos

Los documentos técnicos se elaboran en respuesta a peticiones de la CMNUCC u otras convenciones ambientales, cuando se requiere de información científica específica. Éstos proporcionan a las Partes de la CMNUCC una perspectiva internacional, científica y técnica, sobre un tema específico. Estos documentos se basan en la información que contienen los informes de evaluación y los informes especiales. A la fecha se han publicado cinco documentos técnicos: El cambio climático y la diversidad biológica (2002); Implicaciones de las propuestas de limitación de emisiones de CO<sub>2</sub> (1997); Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas (1997); Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de evaluación del PICC (1997); y Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático (1996).



#### D) Guías metodológicas

La mayoría de estas guías se han centrado en metodologías y prácticas relacionadas con los inventarios nacionales de GEIS. Tienen el objetivo de establecer procedimientos comparables al calcular las emisiones y eliminación de los GEIS, así como las buenas prácticas y gestión de la incertidumbre en los inventarios. También se han preparado algunas guías sobre la evaluación de impactos del cambio climático y guías técnicas para el análisis de adaptación: Buenas prácticas y gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero (2000); Directrices revisadas del PICC para realizar los inventarios (1996); Programas de cómputo para el cuaderno de trabajo (1996); y Directrices técnicas del PICC para el análisis de impactos y adaptación al cambio climático, con un resumen para responsables de políticas y un resumen técnico (1994).

Todos los informes y documentos publicados por el PICC deben pasar por un riguroso proceso de revisión, para garantizar su credibilidad, transparencia y objetividad. Los borradores, preparados por los autores principales y los colaboradores, son revisados por especialistas, por técnicos de los gobiernos y por autores y revisores expertos. Una vez obtenidos los comentarios, las versiones preliminares finales se envían de nuevo a los grupos de trabajo correspondientes, para la aprobación final de su contenido.

Algunos de los informes del PICC se publican con fines comerciales y pueden obtenerse en casas editoras; otros se pueden conseguir de manera gratuita en el sitio de Internet del IPCC (<http://www.ipcc.ch>), en forma impresa o en CD-ROM.

### INFORMES DE EVALUACIÓN DEL PICC

#### A) Primer Informe de Evaluación

Este primer informe se publicó en 1990, dos años después de la creación del PICC, y fue presentado en la Segunda Conferencia Mundial del Clima. El informe causó conmoción entre los responsables de políticas y el público en general, al confirmar la existencia científica del cambio climático y sus posibles impactos. El informe llevó a los gobiernos a crear el Comité Intergubernamental de Negociación y ayudó a establecer los acuerdos de la CMNUCC, que entró en vigor en 1994.

## B) Segundo informe de evaluación

El PICC continuó actuando como organización de apoyo, para proporcionar información científica, técnica y socioeconómica a la comunidad mundial, en especial a las Partes de la CMNUCC; y en 1995 publicó su segundo informe, conocido como SAR, por sus siglas en inglés. El SAR, enriquecido de manera significativa y con material adicional sobre las implicaciones de emisiones y consecuencias regionales, proporcionó los insumos clave para la negociación de la adopción del Protocolo de Kioto por parte de la CMNUCC en 1997.

## C) Tercer informe de evaluación

El tercer informe, conocido como TAR por sus siglas en inglés, tardó tres años en su elaboración, y finalmente fue publicado en 2001. Contó con la participación de aproximadamente 450 autores principales, más de 800 colaboradores y la revisión de alrededor de mil expertos de los países. EL TAR indicó que los informes anteriores habían sido muy conservadores en cuanto a la predicción del calentamiento global y reveló nueva evidencia científica respecto a la participación humana en el calentamiento global reciente. Este informe se centra en los resultados de los últimos estudios realizados desde 1995, ya que presenta especial atención al ámbito regional y no sólo al mundial.

Este tercer informe comprende tres documentos:

### Cambio climático 2001:

1. La base científica (Grupo I).
2. Impactos, adaptación y vulnerabilidad (Grupo II).
3. Mitigación (Grupo III).

Además se elaboró un informe de síntesis para responsables de políticas, el cual aborda nueve preguntas clave de importancia política pero sin carácter preceptivo, basadas en contribuciones de los gobiernos y que fueron aprobadas por el PICC en su XV sesión. Las preguntas son las siguientes:

1. ¿Cómo puede contribuir el análisis científico, técnico y socioeconómico a la determinación de los factores que constituyen una interferencia antropogénica peligrosa con el sistema climático, tal y como hace referencia el artículo 2 de la CMNUCC?

Las ciencias naturales, sociales y tecnológicas pueden proporcionar la información esencial y las pruebas necesarias para decidir qué constituye una “interferencia antropogénica peligrosa en el sistema climático”. Al mismo tiempo, dicha decisión constituye un juicio de valor determinado mediante procesos sociopolíticos, teniendo en cuenta factores como el desarrollo, la equidad y la sustentabilidad, además de la incertidumbre y el riesgo. El cambio climático es parte de un reto aun más grande, el del desarrollo sustentable.

2. (a) ¿Cuáles son las pruebas, causas y consecuencias de los cambios en el clima terrestre desde la época preindustrial? ¿Ha cambiado el clima de la Tierra desde entonces a escala regional y/o mundial? Si ha sido así, ¿qué parte puede atribuirse a la actividad humana y cuál a los fenómenos naturales? ¿En qué nos basamos para definir esta atribución de responsabilidades?

(b) ¿Qué se conoce sobre las consecuencias ambientales, sociales y económicas de los cambios climáticos desde la época preindustrial y especialmente en los últimos 50 años?

El sistema climático del planeta ha cambiado de manera importante a escala nacional y mundial desde la época preindustrial, y algunos de estos cambios son atribuibles a ciertas actividades humanas. Actualmente existen nuevas pruebas y más convincentes de que la mayor parte del calentamiento observado durante los últimos 50 años se puede atribuir a actividades humanas. Es muy probable que a escala mundial, el decenio de 1990 fuera el periodo más cálido, y 1998, el año más caluroso, según los registros instrumentales (1861-2000).

Los cambios en el nivel del mar, las zonas cubiertas por las nieves, la extensión de las capas de hielo y la precipitación guardan relación con un clima cada vez más caliente cerca de la superficie terrestre.

Los cambios observados en los climas regionales han afectado a muchos sistemas biológicos y físicos, y existen indicios preliminares que sugieren que los sistemas sociales y económicos también se han visto afectados.

Los impactos del cambio climático recaerán de forma desproporcionada en los países en desarrollo y las poblaciones más desfavorecidas de todos los países, y por lo tanto exacerbará aún más las desigualdades en materia de salud y acceso a alimentos adecuados, agua limpia y otros recursos.

3.- ¿Qué se conoce sobre las consecuencias climáticas, ambientales y socioeconómicas durante los próximos 25, 50 y 100 años?

Tanto a escala mundial como a escala regional, los recientes cambios en el clima, particularmente los aumentos de temperatura, han afectado ya a los sistemas hidrológicos, así como a los ecosistemas terrestre y marino en muchas partes del mundo. El incremento de los costos socioeconómicos relacionados con los daños ocasionados por fenómenos meteorológicos y variaciones regionales del clima, indica que somos cada vez más vulnerables a los cambios climáticos.

Las proyecciones que utilizan los escenarios de emisiones, que están asociadas con la gama de emisiones de gases de efecto invernadero que se proyectan en los escenarios descritos en el Tercer informe de evaluación (en caso de que no hubiera intervenciones de política climática), en todos los escenarios de emisiones proyectados por el PICC se prevé que tanto las concentraciones de bióxido de carbono como la temperatura media de la superficie del planeta y el nivel del mar aumenten durante el siglo XXI.

Las proyecciones que utilizan los escenarios de emisiones en una gama de simulaciones climáticas dan como resultado un aumento de la temperatura media de la superficie del planeta de entre 1.4 y 5.8 grados Celsius en el periodo 1990-2100; cantidad dos a 10 veces superior al valor observado durante el siglo xx.

4. ¿Qué se sabe sobre la influencia regional y mundial de la creciente concentración atmosférica de gases de efecto invernadero y aerosoles y del proyectado cambio del clima inducido por el hombre en:

- a. La frecuencia y magnitud de las fluctuaciones climáticas incluyendo la variabilidad diaria, estacional, interanual y a los largo de los decenios de fenómenos como El Niño/Oscilación meridional y otros?
- b. La duración, localización, frecuencia e intensidad de fenómenos extremos, tales como olas de calor, sequías, inundaciones, fuertes precipitaciones, avalanchas, tormentas, tornados y ciclones tropicales?
- c. El riesgo de cambio repentino/no lineal, por ejemplo, en las fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero, la circulación de los océanos y la extensión de las capas de hielo y del *permafrost*? En caso afirmativo, ¿se puede cuantificar el riesgo?

Se proyecta un incremento en la variabilidad climática y algunos fenómenos extremos. Las simulaciones proyectan cambios en la frecuencia, intensidad y duración de fenómenos extremos, tales como un aumento de los días calurosos, ondas de calor y eventos de precipitación extrema; y menor número de días fríos.

El forzamiento de los GEIS en el siglo XXI, podría poner en marcha cambios posiblemente abruptos a gran escala, de alto impacto y no lineales en los sistemas físicos y biológicos en las próximas décadas, como a lo largo de los milenios, con una amplia gama de probabilidades asociadas.

5. ¿Qué se sabe sobre la inercia y las escalas temporales asociadas con los cambios en los sistemas climáticos y ecológicos, y los sectores socioeconómicos y sus interacciones?

La inercia es una característica inherente y bien extendida de la interacción de los sistemas climáticos, ecológicos y socioeconómicos, por lo que algunos impactos del cambio climático antropogénico pueden hacerse presentes de manera lenta y algunos pueden ser irreversibles si el cambio climático no está limitado en velocidad y magnitud antes de que se sobrepasen ciertos valores de umbral, de los que se tienen pocos conocimientos.

La inercia en los sistemas climáticos, ecológicos y socioeconómicos hace que la adaptación sea inevitable y necesaria en algunos casos, y la inercia afecta la combinación óptima de estrategias de mitigación y adaptación. La omnipresencia de la inercia y la posibilidad de la irreversibilidad en la interacción de los sistemas climáticos, ecológicos y socioeconómicos son la principal explicación de los beneficios de adoptar medidas preventivas para la mitigación y la adaptación al cambio.

6. ¿De qué manera la magnitud y oportunidad de introducir una gama de medidas para reducir emisiones determinan y afectan la velocidad, la magnitud y los impactos del cambio climático, y que repercuten en la economía regional y mundial, teniendo en cuenta las emisiones presentes y pasadas?

Entre mayores sean las reducciones de las emisiones y cuanto antes se introduzcan, menor y más lento serán el calentamiento y la elevación del nivel del mar. Se estima que la temperatura media de la superficie del planeta puede aumentar de 1.2 a 3.5 grados Celsius hasta el año 2100, para los perfiles en que las concentraciones de CO<sub>2</sub> se estabilicen a niveles de 450 a 1000 ppm. El aumento de la temperatura del equilibrio final podría tardar

muchos siglos, y ésta estaría comprendida en el rango de 1.5 a 3.9°C por encima de los niveles de 1990, considerando una estabilización a 450 ppm; y entre 3.5 y 8.7°C por encima de los niveles de 1990, considerando una estabilización a 1000 ppm. El nivel del mar y las capas de hielo continuarían respondiendo al calentamiento durante muchos siglos después de que se estabilizaran las concentraciones de GEIS.

Las simulaciones del ciclo de carbono indican que para estabilizar las concentraciones de CO<sub>2</sub> a 450, 650 y 1000 ppm se requeriría que las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> mundiales disminuyeran más allá de los niveles de 1990 en una cuantas décadas (para 450 ppm), en alrededor de un siglo (para 650 ppm); y en alrededor de dos siglos (para 1000 ppm); y que siguieran decreciendo constantemente en adelante.

7. ¿Qué se conoce sobre las posibilidades, los costos y beneficios y del marco temporal para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero?

Existen muchas oportunidades, incluidas opciones tecnológicas, para reducir las emisiones a muy corto plazo, pero también existen obstáculos a su instrumentación.

Algunos estudios indican que existen importantes oportunidades para la reducción de los costos de la mitigación, ya que se podrían lograr reducciones de las emisiones mundiales anuales de 1,9 -2,6 GT de equivalentes de C<sub>eq</sub>, y de 3,6-5,0 Gt C<sub>eq</sub> en los años 2010 y 2030, respectivamente. La mitad de esa reducción potencial de emisiones se podría lograr para el año 2020, con beneficios directos (energía ahorrada) que sobrepasan los costos directos (capital neto, costos de explotación y mantenimiento); la otra mitad se lograría a un costo neto directo de hasta USD 100 por tonelada de C<sub>eq</sub> (a precios de 1998), con tipos de descuento de 5 a 12%.

Según los escenarios de emisiones, esto podría permitir reducir las emisiones mundiales por debajo de los niveles del año 2000 en el periodo 2010-2020, con los costos directos netos estimados.

Los bosques, las tierras agrícolas y otros ecosistemas terrestres ofrecen muchas posibilidades de mitigación del carbono (ver los capítulos *Opciones de captura de carbono en el sector forestal*, de B. de Jong, O. Masera-Cerutti y T. Hernández, y *Proyecto Scolel Té: la participación de comunidades rurales en el mercado internacional de venta de carbono*, de B. de Jong, R. Tipper y L. Soto-Pinto, en la sección IV). La conservación y el secuestro de carbono, aunque no necesariamente con carácter permanente, pueden dar tiempo para que se desarrollen y pongan en práctica otras medidas.

**El desarrollo y la difusión de tecnología son componentes importantes para una estabilización económica.**

8. ¿Qué se sabe entre las interacciones de los cambios climáticos proyectados inducidos por el hombre y otros problemas ambientales (como la contaminación del aire en las ciudades, el depósito de ácidos en algunas zonas, la pérdida de diversidad biológica, el agotamiento del ozono estratosférico y la desertificación y la degradación de tierras)? ¿Qué se sabe sobre los costos y beneficios ambientales, sociales y económicos, así como las implicaciones de estas interacciones para integrar las estrategias de respuesta al cambio climático de manera equitativa con las más generales de desarrollo sustentable a nivel mundial, regional y local?

Existen oportunidades sinérgicas para desarrollar opciones eficaces de respuesta a problemas ambientales, que permitan mejorar los beneficios, reducir los costos y atender las necesidades humanas de una manera más sustentable. La capacidad de los países para adaptarse al cambio y mitigar sus efectos se puede mejorar si se integran las políticas climáticas con las políticas de desarrollo nacional, incluidos los aspectos económicos, sociales y ambientales.

Existe una gran interacción entre los problemas ambientales abordados por los acuerdos ambientales multilaterales, y es posible aprovechar las sinergias que surjan cuando se aplican. Por ejemplo, aunque son diferentes el Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono y la CMNUCC, están relacionados desde el punto de vista científico, porque muchos de los compuestos que causan el agotamiento de la capa de ozono también son gases de efecto invernadero importantes y porque algunos de los sustitutos de las sustancias ahora prohibidas, por el agotamiento que causan, son también potentes gases de efecto invernadero.

9. ¿Cuáles son las conclusiones más sólidas y las principales incertidumbres en relación con la atribución del cambio climático y con las proyecciones basadas en las simulaciones sobre:

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero y aerosoles?

Las concentraciones futuras de gases de efecto invernadero y aerosoles?

Los cambios futuros en el clima mundial y regional?

Los efectos mundiales y regionales del cambio climático?  
Los costos y beneficios de las opciones de mitigación y adaptación?

El documento menciona conclusiones sólidas e incertidumbres clave para cada uno de los rubros de esta pregunta, en cambio climático y atribución:

*Cambio climático, atribuciones:*

Se concluye que las concentraciones atmosféricas de los GEIS antropogénicos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{O}_3$ ) han aumentado considerablemente desde 1750, calentando la superficie de la Tierra, especialmente durante los últimos 50 años.

*Emisiones futuras y concentraciones de los GEIS y aerosoles, basadas en simulaciones, proyecciones y escenarios de estabilización:*

Se concluye que el aumento de las concentraciones de  $\text{CO}_2$  en el siglo XXI se debe principalmente al consumo de combustibles fósiles. Un descenso de estas concentraciones, por debajo de los niveles de 1990, llevaría unos decenios para estabilizarse en 450 ppm, un siglo para 650 ppm, y dos siglos para 1000 ppm. Las emisiones alcanzarían su punto máximo dentro de uno o dos decenios (450 ppm) y dentro de un siglo (1000 ppm), a partir de ahora. Respecto a las emisiones de  $\text{SO}_2$  (precursores de los aerosoles de sulfatos), los escenarios señalan que éstas serán menores en el año 2100 comparadas con las del año 2000. Sin embargo, existen incertidumbres clave en los escenarios de emisiones de GEIS y aerosoles debido al crecimiento económico, al adelanto de la tecnología, al crecimiento de población y a las estructuras de gobierno. Algunos de los escenarios de emisiones son inadecuados para el ozono y los precursores de aerosoles.

*Cambios futuros en clima regional y mundial basados en simulaciones:*

Se concluye que la temperatura media mundial en la superficie aumente considerablemente durante el siglo XXI, presentándose más días calurosos y olas de calor y menos días fríos y olas de frío. También se espera que el nivel del mar siga elevándose y persista durante varios siglos más; que se vea modificado el ciclo hidrológico, aumentando las precipitaciones medias mundiales y los episodios de precipitación intensa; y que aumente el clima seco estival causando sequías en la mayor parte de las latitudes medias del interior continental. Sin embargo, debido a que estas hipótesis están asociadas con una amplia gama de escenarios, y a que las proyecciones están basadas en simu-



laciones que consideran la sensibilidad climática, el forzamiento climático y los procesos de respuesta (vapor de agua, nubes y aerosoles), se tiene incertidumbre. Otras incertidumbres clave incluyen la no linealidad de los cambios, así como la prontitud y gran escala en la que surgen, y la capacidad de las simulaciones para lograr una cuantificación a escala regional y local.

*Impactos regionales y mundiales de los cambios en el clima medio y los extremos:*

Se concluye que el cambio climático tendrá efectos tanto adversos como beneficiosos en los sistemas ambientales y socioeconómicos; sin embargo, cuanto mayores sean los cambios y la velocidad a la que se dan, más predominarán los impactos adversos. Se prevé que estos impactos adversos afectarán desproporcionadamente a los países en desarrollo y a las personas más pobres de todo el mundo. Algunos de los daños a ecosistemas y especies vulnerables serán irreversibles o devastadores. Se han identificado muchos sistemas físicos como vulnerables al cambio climático (por ejemplo, glaciares, nivel del mar). Por otro lado, en algunas latitudes medias y altas, la productividad de las plantas aumentaría con un pequeño incremento de la temperatura; sin embargo, pasando cierto umbral de temperatura, su productividad descendería en la mayor parte del mundo.

*Costos y beneficios de las opciones de mitigación y adaptación:*

Se concluye que las medidas de mitigación de GEIS sí atenuarían las presiones sobre los sistemas debidas al cambio climático y que sus costos variarían entre las diferentes regiones y sectores. Los costos se podrían reducir con un comercio eficiente de los derechos de emisiones, así como con oportunidades tecnológicas existentes. Las respuestas nacionales para la mitigación podrían ser más eficaces si se adoptara una cartera de políticas para limitar o reducir las emisiones netas de GEIS. La mitigación debe ser complementada con estrategias de adaptación para reducir los impactos adversos del cambio climático e inclusive obtener algunos beneficios. La mitigación y la adaptación deben llevarse a cabo de manera simultánea para alcanzar los objetivos de desarrollo sustentable.

D) Cuarto informe de evaluación del PICC

En la decimoctava sesión del IPCC, celebrada en septiembre de 2001, el Panel acordó seguir preparando informes de evaluación y se convino en comple-

tar el cuarto informe de evaluación (AR4, por sus siglas en inglés) en el año 2007. Se sugirió desarrollar un mecanismo para facilitar y asegurar una mejor consideración de temas transversales, incluyendo el desarrollo sustentable. Se habló de la importancia de tener una representación apropiada de expertos de países en desarrollo y con economías en transición; aumentar el uso de literatura en otros idiomas aparte del inglés, e intensificar compromisos con la industria y las ONG (Activities IPCC, <http://www.ipcc.ch>).

En la Vigésima Sesión del IPCC, en febrero de 2003, se acordó el plan de trabajo para definir el alcance del AR4. Ya se tuvieron dos reuniones más, en abril y en septiembre, para desarrollar el contenido de las contribuciones de los Grupos I, II y III, así como una propuesta para la elaboración del Resumen para Responsables de Políticas. Se tiene una lista preliminar de los temas transversales a tratar en este informe, e incluyen: incertidumbre y riesgo, integración de adaptación y mitigación, temas clave de vulnerabilidad relacionados con el artículo 2 de la CMNUCC, desarrollo sustentable, integración regional, agua y tecnología (Activities IPCC, <http://www.ipcc.ch>).

El Panel aprobó el contenido del AR4 en la Vigésima Primera Sesión, celebrada en Viena, Austria, en noviembre de 2003.

## CONCLUSIONES

El PICC tiene muy claro que debe seguir preparando informes de evaluación que permitan proporcionar información política relevante para encarar los cambios a los que nos estamos enfrentando y los que agravarán a las generaciones futuras. Reconoce la importancia de tener una representación apropiada de científicos y expertos, y de incrementar la difusión de los conocimientos mundiales actuales.

Las organizaciones mundiales reconocen que el éxito del PICC se basa en la cooperación de numerosos científicos y expertos del mundo, en la participación de países desarrollados, en desarrollo y con economías de transición, en el apoyo de los gobiernos y otras organizaciones, así como en su estricta adherencia a los ideales de imparcialidad, transparencia, autoridad científica e integridad.

El PICC espera que la diseminación de estos informes y documentos sea un incentivo para los científicos de los países en desarrollo para involucrarse en la investigación en este campo, y para los gobiernos para hacer de la investigación en este campo una prioridad. Esto permitirá al PICC incluir a más científicos de alto nivel de países en desarrollo en sus futuras activida-

des de evaluación, y seguir apoyando en el proceso de avance de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

## BIBLIOGRAFÍA

- Figueres, C. y M. Gowan. 2002. The operation of the CDM. Pp. 1-11. En: C. Figueres (ed.) *Establishing National Authorities for the CDM. A guide for developing countries. International Institute for Sustainable Development and the Center for Sustainable Development in the Americas*, Canada. Disponible en: [http://www.cckn.net/pdf/cdm\\_national\\_authorities.pdf](http://www.cckn.net/pdf/cdm_national_authorities.pdf).
- Global Environment. 2003. *Backgrounder, The Intergovernmental Panel on Climate Change*. [http://www.ucsusa.org/global\\_environment/global\\_warming](http://www.ucsusa.org/global_environment/global_warming). [fecha de consulta: agosto de 2003].
- . 2003. *Briefing, The IPCC Assessment Process. Union of Concerned Scientists*. [http://www.ucsusa.org/global\\_environment/global\\_warming](http://www.ucsusa.org/global_environment/global_warming) [fecha de consulta: agosto 2003].
- PICC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). *Introducción al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)*. <http://www.ipcc.ch/about/bspanish.pdf>.
- . 2003. *About IPCC, Activities, Publications, Press releases & Speeches, Official Documents*. <http://www.ipcc.ch> [fecha de consulta: agosto de 2003].
- . 1995. *Cambio Climático 1995: Segunda evaluación. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Geneva: IPCC.
- . 2001. *Cambio Climático 2001: Informe de Síntesis. Resumen para Responsables de Políticas. Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- Obasi, G. O. P. 2003. *Statement at the Twentieth Session of The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. 19-21 February, 2003. Paris, France. Disponible en: <http://www.ipcc.ch>.
- Pachauri, R. K. 2002. Address by Dr. R.K. Pachauri, Chairman, IPCC. *Delivered at the Eighth Conference of the Parties to the Framework Convention on Climate Change*, October 30, 2002, New Delhi, India. Disponible en: <http://www.ipcc.ch>.
- Watson, R. 2001. Statement on behalf of the Chairman of IPCC, Dr. Robert Watson. *Delivered by Dr. Bert Metz, Co-chair, IPCC Working Group III on Mitigation at the Seventh Conference of Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, November 7, 2001, Morocco, Marrakech.

## Notas

---

\* Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT.



# La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

*Edmundo de Alba\**

## ANTECEDENTES

A MEDIADOS DE LA DÉCADA de los ochenta, la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente empezaron a reunir inquietante información científica sobre la creciente acumulación de gases termoactivos en la atmósfera terrestre, cuestión que movilizó a la opinión pública mundial e indujo a ambos organismos a formar un grupo internacional sobre cambio climático, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC).

Este grupo internacional, formado por destacados científicos especialistas en la materia provenientes de diversos países del mundo, presentó su primer informe en 1990 (ver el capítulo *El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*, de M. Ávalos, en esta sección), en él hizo evidente un incremento acelerado de la concentración atmosférica global de gases de efecto invernadero (principalmente bióxido de carbono [CO<sub>2</sub>], metano [CH<sub>4</sub>] y óxido nitroso [N<sub>2</sub>O]) desde la época de la revolución industrial: se pasó de una concentración de 280 a 356 partes por millón por volumen (ppmv) en el caso del CO<sub>2</sub>, de 0.7 a 1.7 ppmv para el CH<sub>4</sub>, y de 275 a 310 partes por mil millones por volumen para el N<sub>2</sub>O.

El PICC, en su reporte, separó la evidencia dura de aquella que hace una década presentaba incertidumbre, al señalar que:

- Existe firme evidencia de que ha existido en el último par de siglos una creciente concentración de gases termoactivos en la atmósfera planetaria.

- Es factible que dicha acumulación se deba a actividades antropogénicas, especialmente las vinculadas con el uso de combustibles fósiles.
- Para estabilizar las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>, sus emisiones tendrían que reducirse entre 60 y 80%.
- Se apreció en esa época, que era posible y probable que dicha acumulación acarree un incremento en la temperatura media global de 0.3°C por década.
- Otra consecuencia probable es que en este nuevo siglo el nivel medio del mar se podría incrementar seis centímetros por década, tanto por efecto de expansión térmica, cuanto por el posible deshielo de polos y glaciares.
- De presentarse dicho cambio, los efectos sobre la actividad humana y los ecosistemas, aunque aún no totalmente definidos, probablemente serían diferentes de una región a otra.
- El problema sólo se podrá enfrentar exitosamente con la cooperación internacional.

## NEGOCIACIÓN INICIAL

Ante los anuncios del PICC, la opinión mundial, la prensa y los gobiernos decidieron tomar cartas en el asunto e impulsar la negociación de una Convención internacional, bajo la égida de las Naciones Unidas, para lograr acuerdos en relación con el problema.

Los resultados del primer reporte del PICC fueron sujetos de gran controversia internacional, en donde notables grupos, tanto de científicos como de gobiernos y de industrias vinculadas con la energía, presentaban argumentos en favor y en contra. Es de resaltar la decidida participación de la entonces Comunidad Europea en la gestación del proceso de negociación de la Convención. En dicho grupo, los países nórdicos y Francia tuvieron un papel protagónico al llevarse el asunto a la Asamblea General de las Naciones Unidas.

A fines de 1990 se acordó iniciar los trabajos de negociación para generar los consensos necesarios para la elaboración de una Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Se debe recordar que en los mismos días en los que se inició la organización de las negociaciones internacionales, cerca de la ciudad de Washington estaba en su apogeo la denominada “Guerra del Golfo”, con la consiguiente drástica elevación de los precios internacionales de los hidrocarburos.

Se decidió nombrar como presidente de la reunión al embajador Francés y dividir las negociaciones en dos grupos: el que fijaría los mecanismos para la instrumentación de la Convención, que resultó copresidido por la representante canadiense y el embajador de Vanuatu, y el grupo de compromisos, donde asumieron la presidencia el embajador de Japón y el representante mexicano, el autor de este capítulo.

Dadas las incertidumbres asociadas al fenómeno, y particularmente a sus implicaciones económicas y ambientales, la negociación fue guiada por los principios de “precaución” y de “responsabilidad común pero diferenciada” en búsqueda de la equidad en la participación internacional.

## EL PROCESO DE NEGOCIACIÓN

Desde el principio de las negociaciones se diferenciaron las posiciones de los diversos grupos de países. Se apreció una división de opiniones tanto al interior del grupo de los países desarrollados, como en el de los países en desarrollo. Notable también fue que en el curso de la negociación se produjo la disolución de la entonces Unión Soviética, quedando los países ex socialistas en un heterogéneo grupo que se denominó “países con economías en transición”, obviamente haciéndose referencia al retorno de dichas naciones hacia regímenes esencialmente de libre mercado.

La posición europea favorecía el cumplimiento colectivo entre sus miembros, lo que introdujo un elemento de flexibilidad de orden regional en los compromisos posteriormente asumidos por dichos países. Debe resaltarse que la Comunidad Europea estaba dando pasos acelerados hacia su transformación monetaria y social con vistas a la Unión, por lo que por primera vez, un representante del Secretariado de la Comunidad asumió la responsabilidad de ser el portavoz y negociador del conjunto del grupo europeo. Es de notarse que el interés de este grupo de países por la Convención tenía también un amplio sabor de búsqueda del encarecimiento de los precios internacionales de los hidrocarburos (establecer un “carbon tax”) para acelerar la diversificación energética, la disminución de la participación de hidrocarburos y carbón en los balances energéticos nacionales y fortalecer la seguridad energética de sus integrantes.

Por otro lado, Estados Unidos, acompañado principalmente por países como Canadá y Australia, si bien participaban en el objetivo común de aba-

tir las emisiones de gases termoactivos en sus economías, insistían en la necesidad de que los compromisos pudieran llevarse a cabo mediante actividades cuyo costo económico y social fuese el mínimo posible, favoreciendo de hecho mecanismos bajo la hipótesis de medidas “sin arrepentimiento” (“*no regrets*” en inglés). Es claro que los mayores emisores mundiales de gases de efecto invernadero eran y siguen siendo con mucho los Estados Unidos (ver el capítulo *Los principales países emisores, emisiones históricas*, de J. L. Arvizu, en la sección 1).

La comunidad científica mundial, entre ella la estadounidense, se encontraba dividida en relación con la importancia, certidumbre y consecuencias del fenómeno; así como los mejores medios para prevenirlo o controlarlo. Fue ello lo que condujo a un énfasis en las cuestiones relacionadas con la certidumbre (interrogantes que de alguna manera persisten hasta ahora) y en la necesidad de una mucho mayor investigación y observación del fenómeno del cambio climático.

Asimismo, los intereses de los grupos industriales norteamericanos del carbón y de los hidrocarburos se hicieron sentir desde el inicio de las negociaciones.

Los países en desarrollo, por su parte, fueron encabezados en las negociaciones por los grandes emisores: China, India y Brasil, quienes vieron en la Convención una amenaza a sus programas nacionales de desarrollo económico. En el caso de China, por la alta participación del carbón mineral en su balance energético, mientras que Brasil veía como una amenaza la incorporación de la protección e incremento de los sumideros de gases de efecto invernadero en los bosques, en relación con sus decisiones soberanas sobre el uso de la gran floresta de la Amazonia.

En virtud del bajo nivel per cápita de las emisiones chinas e hindúes, se acuñó una frase: “Si todo ser humano se comportara como un chino o un hindú, no existiría el problema de cambio climático”. Dicha frase se asocia al principio de que todo ser humano tiene igual derecho al bien común (la atmósfera terrestre) y establecieron como prioridad suprema el desarrollo socioeconómico de sus comunidades.

Las emisiones de los países desarrollados fueron consideradas como una deuda histórica, no sólo las actuales, por lo que la frase más utilizada durante la negociación fue que “los países en desarrollo no son los culpables, sino las víctimas del intenso uso de la atmósfera común por parte de los



países desarrollados”, cuestión que planteo la necesidad de un apoyo especial de estos últimos a los países en desarrollo. Sólo mediante ese apoyo se aseguraría la participación de los en desarrollo, sin costo para sus economías y con la condición de que esos apoyos se realizaran con recursos nuevos y adicionales. Europa promovió la creación del Fondo Ambiental Global (GEF) con objeto de promover la participación de los países en desarrollo en la solución de los problemas ambientales globales, entre ellos el de cambio climático.

Se configuró un nuevo grupo de pequeños países isleños en desarrollo (AOSIS, por sus siglas en inglés) cuya aparición fue una novedad en el sistema de negociación de las Naciones Unidas. Este nuevo grupo defendía la necesidad de acciones inmediatas para enfrentar el problema y de eventuales reparaciones económicas a sus países, en virtud de la amenaza que el cambio climático representa para sus débiles economías y territorios. Otro grupo con destacada participación fue el de los miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), que calcularon que la Convención podía abatir en seis millones de barriles de petróleo diarios su total de exportaciones, con las implicaciones económicas consecuentes. El grupo argumentaba equidad y su condición de países en desarrollo; reclamaban medidas que los protegieran, no tanto de los impactos causados por la variación climática, como de los impactos económicos de las medidas que pudiesen ser tomadas internacionalmente.

Para el inicio de la negociación, ya era claro que México era de los países vulnerables ante el fenómeno, por lo que siempre buscó apoyar la aprobación de la Convención. De hecho, conocíamos que nuestras emisiones se localizaban en el promedio mundial, lo que significa que somos parte del problema mundial (ver el capítulo *Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México*, de L. G. Ruiz y X. Cruz, en la sección 1).

Por otra parte, la posición mexicana estuvo permeada por los dos nuevos acontecimientos de la época de la negociación de la Convención en los años 1991 y 1992, pues por una parte estábamos en plena negociación del Tratado de Libre Comercio de Norteamérica, y por otra se gestionaba nuestro ingreso en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), cuestiones ambas que se veían como un alejamiento de nuestro país del tradicional grupo de los países en desarrollo (Grupo de los 77).

Sin embargo, como se manifestó en el curso de la negociación, en nuestra condición de país en desarrollo los compromisos a ser asumidos eran com-

pletamente consistentes con nuestras políticas nacionales y nos permitían hacer lo que de cualquier manera queríamos hacer con o sin Convención; esto es, intensificar nuestras políticas de ahorro y uso eficiente de la energía; promover la diversificación energética y ampliar los programas de reforestación y de disminución de la deforestación, así como profundizar los estudios e investigaciones sobre el fenómeno climático en nuestro país. La delegación mexicana tuvo gran cuidado de que el país no fuese incorporado a las obligaciones que estaban adquiriendo los países desarrollados por su profunda consecuencia sobre nuestras oportunidades de desarrollo (cuestión que actualmente se encuentra en revisión). Fue particularmente notable la participación y acuerdo sobre la posición mexicana que existía entre los diversos interesados nacionales, la entonces SEDUE y la SRE como cabezas de delegación, y la entusiasta participación de los sectores energético y forestal, así como las importantes contribuciones de los sectores privado y social.

Los países desarrollados fueron agrupados en el Anexo I de la Convención, que incorpora a todos los miembros de la OCDE y al nuevo grupo de países con economías en transición (los ex socialistas), y asumieron la obligación de disminuir sus crecientes emisiones de forma tal que para el año 2000 sólo alcanzaran el nivel existente alrededor de 1990, al tiempo que México quedó en el grupo de países “no-Anexo”, que podía recibir los recursos nuevos y adicionales que estaban siendo negociados para promover su participación en la respuesta al problema. Los proveedores de dichos recursos quedaron incluidos en el denominado Anexo II de la Convención, que a la sazón eran todos aquellos miembros de la OCDE, sin extenderse la obligación a México y Corea del Sur, pues nos encontrábamos en proceso de negociaciones para el ingreso a dicho club.

Las difíciles negociaciones, que implicaban enormes costos económicos para países con obligaciones explícitas y también, por los impactos provocados por el fenómeno, para países con economías más débiles, fueron guiadas fundamentalmente por la reciente y exitosa experiencia de la firma del Protocolo de Montreal para la protección de la capa superior de ozono de la atmósfera terrestre. Esta estrategia implicó un énfasis en las acciones individuales de cada uno de los países, a costa de una aproximación cooperativa en donde colectivamente se hiciesen esfuerzos para el abatimiento del problema global, mediante acciones con costos mínimos y beneficios máximos sobre el clima mundial. Poco fue aceptado en términos que no significasen acciones concretas de cada país.

México participó en los esfuerzos de algunos países, especialmente los de Noruega (en busca de mayor equidad), para experimentar esquemas cooperativos de mutuo beneficio para el cumplimiento de las obligaciones, el abatimiento de sus costos y el impulso al desarrollo de los países en desarrollo, al incorporarse como elemento de flexibilidad el mecanismo de instrumentación conjunta (*joint implementation*, en inglés). En particular, el sector eléctrico mexicano tuvo una notable participación durante la fase piloto de este mecanismo con el proyecto ILUMEX (ver el capítulo *ILUMEX: desarrollo y lecciones del primer proyecto mayor de ahorro de energía en México*, de O. De Buen, en la sección IV). Dicho proyecto, sin embargo, fue objeto de una activa oposición política en los grupos de negociación por parte de aquellos países que no querían la incorporación de medidas de cooperación, sino estrictamente las individuales de cada país. Finalmente quedó como un mecanismo abierto sólo a países del Anexo I.

Las organizaciones no gubernamentales mundiales y regionales hicieron una intensa presencia y presión en favor de sus intereses o ideologías; fue un grupo notablemente heterogéneo, pues incorporaba organizaciones ecologistas, otras formadas por grupos de interés industriales ligados al carbón o al petróleo, organizaciones no gubernamentales auspiciadas por gobiernos y agrupaciones con toda clase de ideologías, generalmente opositoras a los combustibles fósiles. Si bien su presencia influyó en parte para evitar las posiciones radicales o inflexibles de algunos países, los resultados de la negociación fueron, por supuesto una responsabilidad de los representantes gubernamentales (ver el capítulo *El papel de las organizaciones de la sociedad civil ante el cambio climático global*, de M. Delgado, en la sección V).

Una influencia muy importante sobre la negociación y su relativo éxito fue el clima que vivía el mundo de cara a la preparación de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (Cumbre de Río), pues todos los gobiernos y sus comunidades estaban influidos por un estado muy favorable a la protección ambiental, lo que facilitaba el alcance de consensos en la negociación sobre cambio climático. Paralelamente a la negociación sobre este tema, se inició la negociación sobre biodiversidad y, con menor suerte, sobre bosques y desertificación. De hecho, durante la Cumbre de Río hubo dos productos que representaban voluntades políticas colectivas, la Declaración de Río y la Agenda XXI. Mientras que como productos jurídicamente vinculantes se firmaron las convenciones sobre cambio climático y sobre biodiversidad.

Paralelamente se establecieron mecanismos multilaterales y bilaterales para apoyar a los países en desarrollo en sus acciones en favor del clima mundial. Destacaron la creación del Fondo Mundial Ambiental (GEF) con la participación del Banco Mundial, el PNUD y el PNUMA, así como fondos especiales establecidos por los países desarrollados para influir bilateralmente en las acciones de países en desarrollo. Fue objeto de gran controversia la forma de gobierno del Fondo Mundial, llegándose incluso a elaborar una innovadora forma mixta de gobierno entre lo que se acostumbraba en los mecanismos financieros internacionales de Baton Rouge (un dólar, un voto) con el de la generalidad de los órganos de las Naciones Unidas (un país, un voto).

## PRINCIPALES CUESTIONES

Una de las cuestiones que ocupó una importante parte del tiempo disponible para la negociación fue el establecimiento de los principios que guiarían las actividades durante la Convención. Destacan, entre ellos, el de “responsabilidades comunes pero diferenciadas”, reconociéndose el diferente grado de responsabilidad que podría ser atribuido a los países del concierto mundial. De acuerdo con este principio se crearon las listas de países correspondientes al Anexo I (países desarrollados y en transición) y al Anexo II (países de la OCDE de la época), a quienes correspondió el financiamiento del apoyo a países en desarrollo. Sin embargo, no fue sino posteriormente que se establecieron diferencias al interior del grupo de países del Anexo I.

Otro principio que causó gran controversia fue el relacionado con la certidumbre del fenómeno, aceptándose finalmente el principio de precaución que alienta la actividad colectiva e individual en favor de las generaciones presentes y futuras, a pesar de la falta de una certeza científica absoluta.

Considerable atención fue prestada al balance que para una adecuada equidad tendría que haber entre la flexibilidad y la obligatoriedad de los resultados. Los países en desarrollo asumieron compromisos que están en concordancia con sus requerimientos socioeconómicos y que tienen que ser financiados por los mayores responsables. Mientras que los países desarrollados adquirieron compromisos (generalmente no cumplidos hasta ahora) respecto a la reducción de sus emisiones.

Si bien la mayoría de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero están asociadas a los sectores energético y forestal (ver los capítulos *Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México*, de L. G. Ruiz y X.

Cruz, y *Los principales países emisores, emisiones históricas*, de J. L. Arvizu, en la sección I), los compromisos sectoriales fueron generalmente débiles y ambiguos.

## LA CONVENCION

El mayor éxito de la Convención fue sin duda la amplia participación de los países miembros de las organizaciones internacionales del sistema de Naciones Unidas, tanto aquellos que podrían resultar perjudicados, como los que pudiesen resultar beneficiados por los acuerdos alcanzados (a la fecha, 186 países son parte). El objetivo mismo de la Convención de no interferencia con el clima mundial es un objetivo perdurable y que tiene que ser alcanzado en algún plazo. Se establecieron los criterios y mecanismos básicos para la instrumentación de la Convención, incluidas la Conferencia de las Partes, la Secretaría y los órganos técnicos principales.

Aunque sujeta a posteriores revisiones y algunos cambios menores, han quedado firmes los países en los Anexos I y II, lo que implica para los primeros la aceptación del compromiso de disminuir emisiones (que en la Convención se estableció equivalente a la reducción a los niveles de 1990 para el año 2000), mientras que los países del Anexo II han asumido compromisos de financiamiento hacia países en desarrollo.

Todos los países adquirieron compromisos para hacer reportes sobre la situación de emisiones y sumideros de carbono, así como sobre las medidas que han tomado para evitar el fenómeno del cambio. Los países en desarrollo mediante apoyos externos, y los desarrollados, sujetos a un detallado proceso de gestación y revisión de sus reportes.

Se establecieron asimismo compromisos para el intercambio de información y para promover la investigación sobre el fenómeno.

Para diversos grupos de países, y también para algunas organizaciones ambientalistas no gubernamentales, existen objetivos adicionales a los establecidos por la Convención, pues ven en ella una oportunidad para abatir el consumo de combustibles fósiles, argumentando que es el único verdadero mecanismo para el cumplimiento del objetivo de la misma, independientemente de los costos económicos que ello pudiese implicar. Enfatizan, además, que el cumplimiento de los compromisos asumidos debe lograrse en el interior de cada país, a pesar de que pudieran darse mejores condiciones económicas en acciones internacionales de carácter cooperativo.

Por otro lado, diversos países del mundo consideran a la Convención como una importante fuente adicional de recursos para su desarrollo, que al mismo tiempo les permite mejorar su grado tecnológico y fortalecer las actividades para preservación e incremento de los recursos naturales que poseen.

La Convención alcanzó su acuerdo en el seno de las Naciones Unidas y se firmó durante la “Cumbre de Río” en junio de 1992. Si bien su objetivo es el de estabilizar las concentraciones de gases termoactivos en la atmósfera a un nivel que impida una interferencia humana peligrosa en el sistema climático, fue reconocido que el abatimiento de las emisiones de los países desarrollados al nivel de 1990, es insuficiente para garantizar la estabilidad climática. Fue diversa la aceptación de los resultados en la Convención: para algunos era más que suficiente y para otros carecía de verdaderos compromisos (le faltaron dientes), mientras que otros lo consideraron el máximo accesible en el momento, o un buen inicio.

Una buena parte de los países miembros (incluido México) firmó la Convención durante la Cumbre de Río, y el proceso de ratificación fue relativamente rápido.

Con posterioridad, y en virtud de la creciente evidencia sobre la realidad y posibles consecuencias del cambio climático a ser recopilada y presentada posteriormente en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC (1995), en la primera Conferencia de las Partes de la Convención (1994) se decidió entrar en un nuevo proceso de negociación internacional que fijase más claramente las obligaciones explícitas y cuantificadas de los países del Anexo I para la reducción de sus emisiones netas (Mandato de Berlín).

## LA POSICIÓN MEXICANA

Nuestro país está siendo y será objeto de crecientes presiones internacionales para aceptar compromisos voluntarios de limitación de emisiones debido a sus crecientes emisiones producto de su desarrollo. Como hemos dicho, los países en desarrollo objeto de presiones somos principalmente México, China, India y Brasil, en virtud de los niveles absolutos de nuestras emisiones, así como de las tendencias históricas de las mismas (ver el capítulo *México y la participación de países en desarrollo en el régimen climático*, de F. Tudela, en esta sección).

Ante esta situación, y tomando en consideración las circunstancias nacionales, el autor de este capítulo sugiere de que los objetivos mexicanos en las negociaciones deberían ser:

- Favorecer los acuerdos relativos al cumplimiento de los objetivos de la Convención, pues al ser vulnerables ante los impactos del cambio climático, nos interesa particularmente que este problema se afronte cuanto antes, incluyendo las cuestiones de adaptación, prevención, complementariedad, integralidad y cumplimiento.
- Rechazar cualquier compromiso que ponga en riesgo el desarrollo del país o que vaya contra el principio de las responsabilidades comunes pero diferenciadas, pero asumiendo los compromisos que le corresponden a México como un importante país emisor de gases termoactivos y por nuestra alta vulnerabilidad. Esta cuestión merece un detallado estudio estratégico, con visión de largo plazo, sobre las posibilidades y conveniencias de alternativas de una mayor y más responsable participación mexicana.
- Continuar y reforzar las políticas energéticas y forestales nacionales que representan la mayor contribución mexicana a la solución del problema global; posiblemente el mayor efecto lo dará la continuidad y profundización de las políticas de ahorro energético, diversificación y gasificación actualmente en instrumentación; ésta última ha sido nuestra mayor contribución al control de las emisiones nacionales cuestión que demanda una mayor visibilidad y reconocimiento internacional.
- Continuar y ampliar los estudios e investigaciones con los que el País contribuye al entendimiento y al incremento de la certidumbre asociada al fenómeno, a sus consecuencias y a la pertinencia de las medidas adoptadas, así como al diseño de medidas de mitigación, prevención y adaptación en la región y en el País.
- Por último, promover que se den condiciones favorables, con los mecanismos de la Convención, para contar con apoyos adicionales para favorecer y apoyar, en alguna medida complementaria, las políticas nacionales, tanto en el área energética como en las de investigación y de los recursos naturales.

## Notas

---

\* Consultor Académico, UNAM.





# México y la participación de países en desarrollo en el régimen climático

*Fernando Tudela\**

EN MAYO DE 1994, México se integró a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Entre las condiciones negociadas para esta integración figuraba la aceptación por parte de la OCDE de la no-inclusión de México en el Anexo 1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), adoptada en 1992<sup>1</sup> (ver el capítulo *La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de E. de Alba, en esta sección). En ese mismo contexto, México aceptó salir de inmediato del Grupo de los 77 y China, a efectos de cualquier negociación internacional. Estas circunstancias determinaron el relativo aislamiento inicial de nuestro país en algunas negociaciones multilaterales, como la relativa al cambio climático global. En el marco de los acuerdos ambientales multilaterales, no se incorporaba al listado de los países desarrollados, al tiempo que se desvinculaba de la agrupación negociadora por medio de la cual había defendido tradicionalmente sus intereses como país en desarrollo.

Una vez que entró en vigor la UNFCCC, se celebró en Berlín, en marzo de 1995, la Primera Conferencia de las Partes (COP-1). En ella se adoptó el *Mandato de Berlín*, por medio del cual se estableció un proceso para revisar los compromisos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por parte de los países inscritos en el Anexo 1, compromisos que se consideraron «no adecuados». Este proceso, que desembocó en la adopción del Protocolo de Kioto en la COP-3 (1997), mantuvo sin cambios las obligaciones generales, contraídas por todas las Partes, incluidas aquellas no enlistadas en el Anexo 1.

## PRESIONES INTERNACIONALES PARA LA ADOPCIÓN DE COMPROMISOS CUANTITATIVOS

En el plano internacional, en el periodo en el que se negoció el Protocolo de Kioto México se vio sometido a presiones por parte de países desarrollados para incorporarse al Anexo I de la UNFCCC, con base en su adscripción a la OCDE. En los meses siguientes a la adopción del mencionado Protocolo, las presiones apuntaron sobre todo hacia la posibilidad de que México asumiera compromisos “voluntarios” de índole cuantitativa, en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero regulados por ese instrumento.

En el plano nacional, en los meses que antecedieron a la reunión de Kioto algunos funcionarios mexicanos, dentro y fuera de la entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), expresaron puntos de vista diversos respecto a los compromisos que debería asumir nuestro país en el marco del naciente régimen climático global. Se experimentaron algunos problemas de coordinación entre cauces de diálogo promovidos por el Instituto Nacional de Ecología y por otras dependencias internas de la SEMARNAP. Para resolverlos, a partir de 1997 se unificó en una sola instancia el Comité Intersecretarial para el Cambio Climático,<sup>2</sup> el espacio para la concertación intersectorial con vistas a las negociaciones internacionales sobre el tema, la coordinación de la acción climática por parte del sector público, la interlocución con el Poder Legislativo y la promoción de un diálogo nacional. Se acordó que la posición de país se definiría por consenso en el marco del Comité de referencia.

Entre las principales decisiones estratégicas adoptadas en el seno del Comité en el periodo 1997- 2000, figuran las siguientes:

- Fomentar e intensificar la investigación relativa a las implicaciones del cambio climático para nuestro país, incluyendo el modelaje económico de medidas de mitigación.
- Organizar foros de discusión con distintas instancias, incluyendo a las Comisiones del Congreso y a diversas instituciones empresariales.
- Asentar y reforzar en el INE la capacidad institucional de gestión en el tema de cambio climático.
- Disminuir, mediante una acción intersectorial coordinada, la tasa de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero controladas por el Protocolo de Kioto.

- Intensificar las tareas correspondientes a las autoridades nacionales, en particular la elaboración de un Programa Nacional de Acción Climática, la actualización del Primer Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, y la preparación de la Segunda Comunicación Nacional ante la UNFCCC.
- Promover la ratificación del Protocolo de Kioto ante el Senado de la República.
- Promover la creación por decreto de una Comisión de Cambio Climático;
- Impulsar las oportunidades de desarrollo para el país que pudieran derivar de los mecanismos de flexibilidad considerados por el Protocolo de Kioto, en concreto del Mecanismo de Desarrollo Limpio.
- Enfatizar las opciones de mitigación centradas en los sumideros de carbono, estableciendo todas aquellas restricciones que permitieran garantizar la eficacia y la integridad ambiental de las acciones en el sector forestal.
- Rechazar, por el momento, la posibilidad de adoptar compromisos cuantitativos, jurídicamente vinculantes, de contención o reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, fundamentando este rechazo en consideraciones prácticas, jurídicas y de equidad.
- Fortalecer la capacidad técnica del equipo negociador, precisando las posiciones nacionales en relación con los múltiples temas objeto de negociación internacional.
- Abogar en las negociaciones por el logro de convergencias y sinergias entre Convenciones afines, especialmente las de cambio climático, biodiversidad y lucha contra la desertificación.
- Ampliar el margen de maniobra en la negociación, mediante asociación con otros países que sustentaran puntos de vista semejantes, saliendo así del aislacionismo que representaba nuestra auto-exclusión del G-77 y China y la condición de no-Anexo 1 en las instancias propias de los países desarrollados.

Aunque no todos los objetivos señalados pudieron cubrirse a tiempo o en forma satisfactoria, la estrategia mencionada, acordada con bastante laboriosidad en el Comité Intersecretarial, se llevó a cabo con razonable eficacia.

Con independencia de lo que resultara de una evaluación integral de sus logros y de sus limitaciones, cabe señalar aquí que dicha estrategia transfor-

mó de manera radical el trato que recibió México en los foros internacionales sobre cambio climático. De ocupar el banquillo de los acusados por no asumir responsabilidades que supuestamente le correspondían, México pasó a ser considerado como un socio responsable y constructivo, invitado a todos los foros de alto nivel y consultado con asiduidad y deferencia. Desaparecieron en la práctica las presiones internacionales para que nuestro país asumiera de inmediato compromisos ajenos a aquellos que especificaba la UNFCCC para el conjunto de sus Partes.

En la COP-6, celebrada en La Haya días antes de que concluyera la administración del presidente Zedillo, México recibió del presidente de la COP, el ministro holandés Jan Pronk, el encargo de desarrollar consultas y facilitar avances hacia algún consenso multilateral en lo que resultó uno de los temas de mayor conflictividad en la negociación: la consideración de los sumideros de carbono en el marco del Protocolo de Kyoto. Integrado por nuestro país, Corea del Sur (el otro miembro de la OCDE no inscrito en el Anexo 1) y Suiza (uno de los países del Anexo 1 cuyos representantes habían contribuido tiempo atrás a la presión internacional sobre México),<sup>3</sup> el grupo de negociación denominado *Environmental Integrity Group* (EIG) empezó a operar a partir de septiembre del año 2000, en la Reunión de órganos subsidiarios de la UNFCCC celebrada en Lyon, Francia, con pleno reconocimiento por parte de las instancias de la Convención. Impensable dos o tres años antes, el EIG se construyó sobre un entendimiento acumulado, permitió reforzar de manera notable la capacidad de sus integrantes para incidir en las negociaciones en curso, y demostró que países con profundas diferencias geográficas, económicas, sociales y culturales podían ponerse de acuerdo sobre la base de defender la viabilidad y la integridad ambiental del régimen climático. Por la dimensión de su territorio y de su población, México fue durante mucho tiempo el mayor país de cuantos habían ratificado el Protocolo de Kioto; fue también de los primeros países no-Anexo 1 en presentar su Primera Comunicación nacional y el primer país no-Anexo 1 en presentar una Segunda Comunicación nacional completa.<sup>4</sup>

El Acuerdo de Bonn (COP-6 bis) y los subsiguientes consensos de Marrakech (COP-7) precisaron y acotaron los compromisos de los países desarrollados en el marco del Protocolo de Kioto, y alimentaron la esperanza de que este instrumento pudiera entrar en vigor incluso sin la participación de los Estados Unidos.

La eliminación, trabajosamente lograda, de las presiones internacionales que se ejercían sobre México, no debe llamar a engaño a nadie. En cualquiera de los escenarios futuros de negociación multilateral sobre cambio climático, la cuestión de la evolución de los compromisos de México, así como de otros grandes países en desarrollo, como China y la India, aparecerá tarde o temprano como uno de los asuntos centrales en los debates. En el caso de que el Protocolo entre en vigor y se inicie una secuencia de reuniones de las Partes, esta discusión no podrá eludirse en la negociación de los compromisos correspondientes al segundo periodo de compromisos; si el Protocolo fracasara, tampoco podrá eludirse en el marco de una negociación sobre nuevas bases, que permitiera la reincorporación de los Estados Unidos a los esfuerzos internacionales de cooperación para enfrentar el cambio climático.

En México, gobierno y sociedad deben anticiparse a estos debates internacionales y discutir a fondo, desde ahora, la participación de nuestro país -y de otros en similares condiciones de desarrollo- en el régimen climático global. Es de interés nacional lograr un régimen climático global efectivo, en el que México desempeñe un papel activo y responsable. Las perspectivas evolutivas de los compromisos de nuestro país podrían determinar importantes implicaciones para las políticas de mediano y largo plazos en sectores como el ambiental, energético, forestal, agrícola y de transporte. En relación con el régimen climático, existe ya una abundante literatura sobre la evolución de los compromisos y las cuestiones de eficacia y de equidad. La eficacia se refiere al logro del objetivo general de la Convención y del Protocolo, plasmado en el Artículo 2º de la UNFCCC: estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera en un nivel que evite toda interferencia peligrosa con el sistema climático. La equidad se refiere, entre otras cosas, a la manera en que se deben distribuir los esfuerzos necesarios para lograr el objetivo anterior.

## CUESTIONES DE EQUIDAD

Las consideraciones de equidad son fundamentales para asegurar la viabilidad misma de la negociación, así como la legitimidad y efectividad de los acuerdos resultantes. Los dos primeros Reportes del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) apenas abordaron de manera tangencial el tema de la equidad. Para consolidar su credibilidad, el Tercer Reporte del IPCC dedicó bastante atención a este tema.

Al contrario de lo que sucede con el concepto, mucho más simple, de “igualdad ante la ley”, el concepto de equidad es ambiguo y presenta diversas dimensiones, casi todas ellas emparentadas con la idea de “justicia”.<sup>5</sup>

Mitigar el cambio climático o adaptarse al mismo requiere emprender esfuerzos y desarrollar acciones que involucran costos: monetarios, políticos y de otra índole. Muy posiblemente, el nivel de esfuerzos a desarrollar durante el presente siglo sería de tal magnitud que equivaldría a un progresivo cambio en el modelo civilizatorio. Se estima que la estabilización de la concentración de gases de efecto invernadero deberá basarse en un nivel global de emisiones por lo menos 70% inferior al actual. Las naciones, gobiernos y sociedades, tendrán dificultades para plantear las acciones correspondientes y asumir sus costos, si no los perciben como “justos”, como resultado de un reparto “equitativo” de cargas, compromisos y riesgos.

La capacidad reguladora del clima planetario figura entre las principales funciones ambientales de la atmósfera global, que constituye un recurso común de la humanidad. Si fuera infinita la capacidad de la atmósfera para absorber gases de efecto invernadero (GEI) sin comprometer el sistema climático, representaría una simple externalidad positiva para las actividades humanas, y no se plantearían problemas de equidad. Estos últimos surgen por el carácter finito del recurso común. Esta escasez relativa es la que determina la necesidad de discutir acerca de los derechos de apropiación de un recurso común limitado, en cierto sentido por analogía con la definición de derechos prácticos de propiedad o de exclusión de terceros.

Supongamos, por ejemplo, que un consenso político/científico permitiera precisar que la atmósfera global no podría incorporar GEI antropogénicos por un monto superior a las 6 Mt C/año sin arriesgar el equilibrio climático. La emisión anual de GEI por parte de cualquier país tendría que sustraerse de ese tope y, por exclusión, definiría la cantidad de emisiones que quedaría disponible para los demás países. El derecho de cada país a emitir tendría que estar limitado por el derecho de cada uno de los demás países a hacer lo propio. Se tendrían que definir los límites de ese derecho, o acotarlo en términos prácticos, por ejemplo mediante un acuerdo multilateral respecto a las cuotas temporales permisibles.

Además de los aspectos de equidad *intra-generacional*, ya sea entre países o al interior de un mismo país, debido a la muy larga permanencia en la atmósfera de los GEI emitidos (puede alcanzar 50 mil años en el caso del CF<sub>4</sub>) (ver el capítulo *Los gases regulados por la Convención Marco de las Naciones*

*Unidas sobre el Cambio Climático*, de F. Guzmán, en la sección 1), es necesario considerar también problemas de equidad *inter-generacional*. Moléculas de CO<sub>2</sub> hoy detectables pudieron ser producto de la quema de carbón en alguna de las máquinas de vapor que operaron al inicio de la Revolución Industrial. Las actuales concentraciones de ese gas, y de otros de larga permanencia, son un producto histórico, reflejo acumulado de procesos que se desarrollaron en épocas muy diferentes, en contextos geográficos y sociales dispersos, y en marcos políticos afectados por marcadas soluciones de continuidad. Lo que emitimos ahora en un país no sólo afecta la posibilidad de emitir de otros países; también limita la capacidad de las generaciones sucesivas para hacer lo propio, tanto en nuestro país como en otros. Por ello, la provocativa pregunta retórica: “¿a quién pertenece la atmósfera y su capacidad de regulación climática?”, no se puede abordar definiendo un derecho de propiedad colectiva, ni aproximadamente “equitativo” ni siquiera estrictamente igualitario. La única respuesta válida debería ser: “a nadie; pero todos tenemos la obligación de cuidarla”. Los bienes comunes ambientales no son «privatizables»; los derechos de acceso son irrenunciables, en la medida en que una hipotética renuncia afectaría los intereses de generaciones a las que no se podría consultar, por no haber nacido todavía.

En cierto sentido, el “principio de responsabilidad común pero diferenciada” y el “principio precautorio”, reconocidos como principios 7 y 15 en la Declaración de Río (1992) y retomados por la UNFCCC, podrían contribuir a guiar la búsqueda de equidad intra e intergeneracional. En relación con el primero, no se ha acordado criterio alguno para llevar a cabo la diferenciación. En relación con el segundo, no existe consenso alguno respecto a cómo debería interpretarse en el caso del cambio climático.

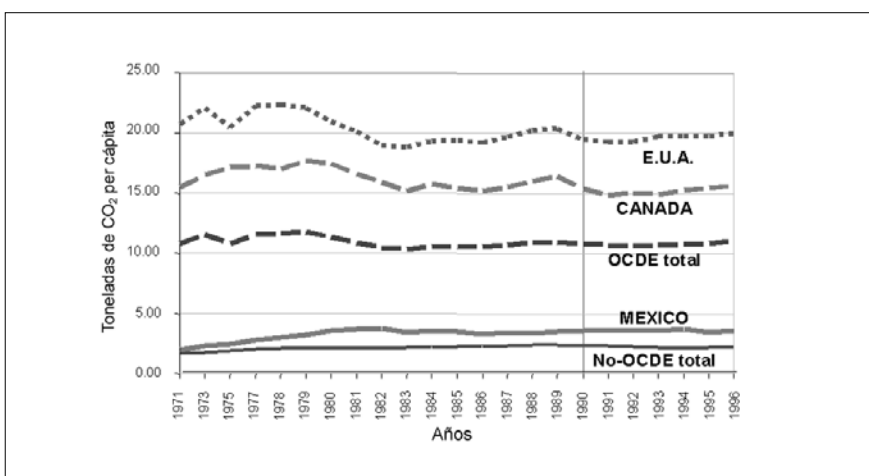
También podría resultar orientador el principio 16 de la Declaración de Río, que reconoce que quien contamina debe pagar o resarcir el daño ambiental infligido. Hasta ahora nadie ha pagado por sus emisiones de GEI ni ha resarcido el posible daño climático resultante. El principio del contaminador-pagador, aplicado a escala global, no puede ignorarse por el procedimiento semántico de declarar los GEI como “no contaminantes”, así como tampoco desaparecerá el cambio climático porque alguien lo declare “inexistente”.

La presión sobre la eficacia de la acción climática global se incrementará sobre todo por dos vías:

- Las sucesivas evaluaciones científicas, como las que ha venido desarrollando el IPCC, que perfilan un reconocimiento creciente de la realidad del cambio climático, el cual podría incluso asumir un carácter abrupto, no lineal.
- La intensificación de desastres asociados al clima.

En ese contexto se ha difundido en los últimos años la idea general de “contracción y convergencia”, promovida por instituciones como el Global Commons Institute. La “contracción”, o reducción de las emisiones antropogénicas globales, es indispensable para garantizar eficacia y sustentabilidad. El ritmo y la intensidad de la “contracción” deberían regirse por una interpretación negociada del Principio Precautorio, que conduzca a una cuantificación del objetivo general de la UNFCCC (Art. 2). La “convergencia”, o progresivo acercamiento de las emisiones per cápita, garantizaría niveles crecientes de equidad en el régimen climático. Los tiempos y las modalidades de esa “convergencia” serían los que resultaran de una negociación. Si bien la integración de los conceptos de contracción y de convergencia resulta atractiva, no se ha encontrado hasta ahora una manera concreta de llevarla a la práctica, y algunas de las modalidades sugeridas serían inaceptables, sobre todo por parte de los países industrializados.

GRÁFICA 1. EMISIONES CO<sub>2</sub> PER CÁPITA



FUENTE: OECD/IEA (1998) CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion, 1971-1996.



Por el momento, y a pesar de la entrada en vigor de la Convención, no se detecta en los últimos años convergencia alguna en las emisiones per cápita mundiales.

## UNA REALIDAD INEQUITATIVA

A escala mundial, las emisiones de CO<sub>2</sub> por quema de combustibles fósiles son las que se conocen con mejor precisión y oportunidad; por ello, las comparaciones internacionales se suelen ceñir a este indicador. Tan sólo los Estados Unidos, con apenas 4.5% de la población global, emite en la actualidad *cerca de la cuarta parte* de las emisiones mundiales de bióxido de carbono (24%). La India, con cerca de mil millones de habitantes (17% de la población del planeta), emite 4% del total mundial. China, cuya población representa 21% del total mundial, emite menos de 13% del total.<sup>6</sup> En otras palabras, las emisiones de India y China, naciones que suman 40% de la población global, apenas representan 60% de las de los Estados Unidos. Si se tomara en consideración el bióxido de carbono acumulado en la atmósfera, remanente de las emisiones históricas, las disparidades señaladas serían todavía mucho más marcadas (ver el capítulo *Registro histórico de los principales países emisores*, de J. L. Arvizu, en la sección 1).

De los 187 países que se constituyeron como Partes de la UNFCCC, 80 generan en la actualidad 98% de las emisiones globales de bióxido de carbono. En otras palabras, casi la mitad de los países podrían considerarse “fumadores pasivos”.

Mientras una tercera parte de la humanidad no tiene acceso a la energía eléctrica, tan sólo los 500 millones de toneladas de C/año que emiten las plantas generadoras de energía de los Estados Unidos representan una magnitud mayor que las emisiones conjuntas de tres cuartas partes de los países del mundo. El Programa Energético de ese país, actual tema de debate legislativo en dicho país, así como el débil programa de cambio climático recientemente expuesto, basado en compromisos voluntarios e indexación al crecimiento económico, podrían dar lugar a un crecimiento notable de las emisiones de GEI de nuestro vecino.

La suma de emisiones de ocho grandes países en desarrollo: Corea del Sur, Sudáfrica, Brasil, Indonesia, Tailandia, Venezuela, Argentina y México no sobrepasa 40% de las emisiones de los Estados Unidos. Para rebasar el volumen de emisiones de los Estados Unidos, tendrían que triplicarse las

emisiones conjuntas de toda la región de América Latina/El Caribe y África. Cuando el presidente Bush señala que el Protocolo de Kioto exime de obligaciones cuantitativas a 80% del mundo, refiriéndose a los países en desarrollo, omite recordar que el 20% restante es el responsable de más de 75% del problema acumulado.<sup>7</sup>

En términos per cápita, las emisiones de México representan 3.7 toneladas de CO<sub>2</sub> por habitante, magnitud cercana a las 3.86 toneladas/hab correspondientes al promedio mundial. El promedio de la OCDE alcanza 10.9 toneladas. Estados Unidos de Norteamérica emite 20.1 toneladas por habitante, más de cinco veces el nivel de las emisiones mexicanas. El indicador correspondiente a América Latina y el Caribe es notablemente bajo: 2.5 toneladas/hab. Con 8.5% de la población mundial, esta región emite sólo 5.4% del CO<sub>2</sub> liberado en todo el mundo por quema de combustibles fósiles.<sup>8</sup>

Si los países en desarrollo quemaran combustibles fósiles en la misma medida en que lo hacen los hoy desarrollados, el total de emisiones de bióxido de carbono por este concepto *se triplicaría*, con consecuencias catastróficas para el equilibrio climático mundial.

Por otra parte, las realidades demográficas son contundentes: un solo país (China) tiene una población mayor que la de todos los países industrializados juntos. *El noventa y seis por ciento de la población que se agregue a este planeta durante las próximas tres décadas vivirá en países actualmente en desarrollo.*

La dinámica de las emisiones de GEI provenientes de los países en desarrollo incidirá cada vez más en el curso del proceso climático. Algunas estimaciones señalan que las emisiones de GEI provenientes de países en desarrollo podrían rebasar aquellas de los países industrializados entre 2015 y 2020.

## LA INCORPORACIÓN DE PAÍSES EN DESARROLLO AL ANEXO I Y LOS “COMPROMISOS VOLUNTARIOS”

El Anexo I se definió en el periodo de negociación de la UNFCCC. Dos cambios en su integración se discutieron posteriormente: Turquía, en calidad de país observador, solicitó en varias ocasiones su exclusión, como condición para su ratificación de la UNFCCC.<sup>9</sup> Kazajstán solicitó su incorporación a dicho Anexo, posiblemente interesado en obtener beneficio de la drástica reducción de emisiones determinada por la disminución de su economía.

Ambas solicitudes se toparon con fuertes resistencias, que determinaron el permanente reenvío del asunto a COPs posteriores: muchas Partes consideraron que la salida de algún país adscrito al Anexo I sentaría un mal precedente, y países del G-77 y China se opusieron a la ampliación de dicho Anexo. En el periodo 1997-2000, México apoyó ambas solicitudes, expresando que se trataba de situaciones simétricas. En el caso de Turquía, país con un nivel muy bajo de emisiones per cápita, México expresó que lo que crearía un mal precedente era la imposición de obligaciones a un país en contra de su voluntad soberanamente expresada, y en ausencia de cualquier criterio objetivo de adscripción acordado en forma multilateral.<sup>10</sup> Por congruencia, México apoyó la solicitud de Kazajstán, país por otra parte con uno de los más elevados niveles de emisiones de GEI per cápita.

El Anexo I de la UNFCCC, que siguió siendo el referente jurídico para el Protocolo de Kioto, se expresó en este último instrumento en el Anexo B, en el cual se describen los compromisos de limitación o reducción cuantificada de emisiones que asumen los países desarrollados. Entre ambos Anexos existen escasas diferencias: países que cambiaron identidad como resultado de los procesos políticos en el Este, exclusión de Bielorusia y de Turquía, que seguía sin ratificar la Convención.

La especificación de los compromisos de limitación o reducción cuantificada de emisiones (QELRCS, por sus siglas en inglés) permitió llevar a cabo una diferenciación aceptada, aunque no satisfactoria, en el marco del Anexo I. Esta diferenciación se concretó a última hora en la negociación del Protocolo, de manera pragmática y en ausencia total de criterios pre-acordados.

La negociación de criterios para repartir cargas o beneficios ha sido históricamente mucho más difícil que el logro de un acuerdo sobre un reparto concreto.<sup>11</sup>

Ni la UNFCCC ni el Protocolo de Kioto abordaron siquiera el tema de la diferenciación de compromisos en el ámbito de países en desarrollo, no inscritos en el Anexo I. Países en desarrollo de nivel intermedio, con niveles apreciables de industrialización, aparecen en la UNFCCC con los mismos compromisos que países que figuran entre los menos desarrollados. Esta inequidad, real aunque posiblemente similar a la detectada en el interior del Anexo I/Anexo B, se encuentra en el origen de las presiones para que países como el nuestro asumieran QELRCS.

En la UNFCCC, la definición de los compromisos específicos que asumen los países de Anexo I no se acomoda en absoluto a las necesidades de países

en desarrollo. En el marco de dicho Anexo, la Convención sólo concede alguna flexibilidad a los países denominados “en transición a una economía de mercado” (ex socialistas), específicamente enumerados. Un país en desarrollo que se incorporara eventualmente al listado del Anexo 1 se encontraría en desventaja en relación con los países “de economías en transición”, aunque éstos últimos tengan niveles de emisiones mucho más elevados, así como una mayor capacidad para reducirlos.

Otro obstáculo que enfrentaría un país en desarrollo como el nuestro para incorporarse al régimen del Anexo 1 radica en las dificultades metodológicas que enfrenta el Protocolo para contabilizar las emisiones netas resultantes del sector forestal. En el actual Anexo 1, solamente Australia presenta emisiones netas por usos de suelo y cambios en el uso del suelo que resulten muy significativas en relación con las emisiones totales. De hecho, para acomodar esta situación se tuvo que incorporar la denominada “cláusula australiana” en el Protocolo. Lo que en el marco del Anexo 1/Anexo B es ahora excepción sería regla en muchos de los países en desarrollo candidatos a incorporarse al régimen ampliado y diferenciado de compromisos. En el caso de México, las emisiones netas por transformación de la cobertura vegetal han representado entre un tercio y un cuarto de las emisiones totales.

El Protocolo plantea una diferenciación profunda entre las emisiones netas reales y aquellas contabilizadas a efectos de evaluación del cumplimiento. Aclarar el trato metodológico que recibirían las emisiones forestales para la contabilidad nacional resultaría crucial para evaluar las posibilidades de ampliar el régimen de compromisos y poder asumir algún tipo de metas cuantitativas transectoriales. El valioso reporte del año 2000 del IPCC sobre “Usos del suelo y cambios en el uso del suelo” exploró con mucha seriedad la complejidad de este asunto y logró clarificar algunas de sus dimensiones, pero no pudo proponer un sistema metodológico único, aceptable para todos. Los acuerdos posteriores de Bonn y de Marrakech introdujeron restricciones de escala que permitieron acotar este problema, sin resolverlo. Algunos de los negociadores que en Kioto impulsamos la incorporación inicial de los llamados “sumideros” en el régimen de contabilidad de los compromisos, pensamos ahora que fue un error haberlo hecho en ausencia de un trabajo técnico de clarificación como el que empezó a realizar más tarde el IPCC. Hubiera resultado más realista y menos complejo lograr un acuerdo inicial relativo a las emisiones por quema de combustibles fósiles, para extenderlo posteriormente a sectores como el del uso del suelo

y sus cambios. La incorporación de los sumideros dio pie para que los países industrializados renegociaran a la baja en COP-6/ COP-7 la intensidad de sus compromisos, y su restringida aceptación en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) no permite un impulso que vincule la captura de carbono con la defensa de los servicios ambientales que prestan las áreas forestales en los países en desarrollo. Para completar el panorama negativo, el rechazo del Protocolo de Kioto por parte de los Estados Unidos plantea una reducción drástica de la demanda, que amenaza con dejar sin efecto el potencial del MDL (ver el capítulo *Los mecanismos flexibles del Protocolo de Kioto, de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de A. Guzmán *et al.*, en esta sección).

En el ámbito de las negociaciones formales, algunos países en desarrollo han formulado propuestas a sabiendas de su inviabilidad práctica inmediata. La delegación de la India, con gran ascendiente en el G77 y China, ha sugerido por ejemplo en varias ocasiones la adopción inmediata de un régimen igualitario de derechos de emisión, con un mercado global para transar certificados no utilizados por parte de países de menor desarrollo relativo.

Brasil, por su parte, propuso el establecimiento de una contabilidad que tome en cuenta las emisiones históricas, acumuladas, de todos los países, como factor principal de diferenciación de responsabilidades.

La primera propuesta equivale a una inmediata privatización igualitaria de la atmósfera, cuya equidad sólo podría defenderse desde un enfoque intra-generacional restringido. Tampoco asume la posible diferenciación de necesidades en función de los diversos niveles de desarrollo, a la que se hacía referencia con anterioridad.

A diferencia de la anterior, la propuesta brasileña se presentó formalmente, y ha tenido algún seguimiento en los órganos subsidiarios de la UNFCCC. Sin embargo, la reconstrucción de responsabilidades históricas tampoco ha podido avanzar, aunque a su desarrollo se han dedicado varios grupos de trabajo, en función de los factores siguientes:

- Escasea la información histórica confiable respecto a las emisiones mundiales de GEI.
- Es dudosa una responsabilidad derivada de acciones desarrolladas con anterioridad a la consolidación del conocimiento científico respecto a la realidad del cambio climático.

- No existe continuidad en la identidad jurídica e institucional de muchas naciones, por lo que es cuestionable la transmisión histórica de sus responsabilidades en los lapsos prolongados dictados por la permanencia en la atmósfera de GEI.

De cualquier forma, todos los negociadores percibimos con claridad que propuestas como las referidas eran sobre todo un recurso retórico para reforzar la posición negociadora del G77 y China, enfatizando las cuestiones de equidad y recordando la responsabilidad histórica de los países hoy industrializados en la generación del cambio climático.

El caso de Argentina, país anfitrión de la COP-4 (1998), resultó ser muy significativo para el análisis de la posible evolución de compromisos por parte de países en desarrollo. Prosiguiendo una política ya perfilada desde antes de la negociación final del Protocolo de Kioto,<sup>12</sup> el presidente de Argentina anunció en la COP-4 que su país se disponía a asumir un compromiso cuantitativo de carácter voluntario, cuya meta precisaría en la COP-5. El anuncio no dejó de suscitar perplejidad y algunas tensiones en el Grupo de los 77 y China, del cual Argentina forma parte. Por lo demás, la política de Argentina fue presentada por varios países industrializados como un ejemplo a seguir. Tras un intenso trabajo técnico que contó con una importante ayuda por parte del gobierno de los Estados Unidos, Argentina anunció en Bonn, en 1999, que su meta de reducción de emisiones para el periodo 2008-2012 sería:  $E = 151.5 \times \text{PIB}_{2008-12}$ .

En relación con este episodio cabe destacar lo siguiente:

- A pesar del énfasis en la ampliación de sus compromisos, Argentina nunca planteó su incorporación al Anexo I.
- No obstante una exploración analítica minuciosa, Argentina tuvo que descartar la adopción de cualquier meta fija, del tipo de los QELRCS del Anexo B del Protocolo, y sólo pudo fijar una meta *dinámica*.
- El gobierno argentino concretó y adoptó su meta dinámica de manera unilateral; ni siquiera existe algún mecanismo en el marco de la UNFCCC que pudiera evaluar en forma multilateral esta meta.<sup>13</sup>
- En ningún momento ha podido Argentina hacer valer la adopción de esta meta dinámica para acceder al mecanismo de cumplimiento conjunto o al comercio de emisiones, mecanismos de flexibilidad que el

Protocolo de Kioto reserva a los países desarrollados; la estructura jurídica actual del Protocolo no permite que un país en desarrollo tenga acceso a la totalidad de los mecanismos económicos sin incorporarse al Anexo 1.

- La adopción de su meta dinámica fue un acto cupular, acordado por el presidente en ausencia de un proceso amplio, participativo e intersectorial. Tampoco se sustentó en un aparato institucional especializado, con capacidad propia para impulsar las políticas de acción climática. Por ello, la decisión comentada no representa una posición que configure una política de Estado.
- La meta dinámica parece haber sido olvidada por los gobiernos sucesivos, y la debacle socio-económica reciente no facilitará su replanteamiento.

El “faux-pas” argentino parece haber debilitado más que consolidado la posibilidad de que países en desarrollo adopten compromisos voluntarios.

La posición defendida por el gobierno de México en el periodo 1997-2000 se basó en las siguientes consideraciones:

- 1) Ningún compromiso futuro debe representar una limitación para el desarrollo del país, y en particular para la reducción progresiva de la pobreza y la ampliación de la cobertura de los diversos servicios básicos.
- 2) La adopción por parte de nuestro país de un compromiso cuantitativo en el régimen climático debe constituir la etapa final de un proceso de construcción progresiva de capacidades, que incluya una institucionalidad reforzada (Instancia decisoria intersectorial de alto nivel, Oficina Técnica de Cambio Climático), elaboración y depuración de dos o más inventarios sucesivos, que permitan identificar con claridad tendencias, adecuación de leyes y reglamentos, análisis de las implicaciones climáticas de las estrategias de desarrollo vigentes, diseño de estrategias climáticas seleccionadas inicialmente por sus características de “no regrets”, acumulación de experiencia con base en proyectos de “Actividades de Cumplimiento Conjunto” y del Mecanismo de Desarrollo Limpio, fomento a mecanismos de participación social, redes de investigación, evaluaciones de costo-beneficio, valoración de los co-beneficios, y una estimación cuidadosa de los costos marginales de las opciones de mitigación disponibles.

- En otras palabras, defendimos la idea de que hay que fortalecerse, hacer gimnasia, constituir equipo y practicar, antes de entrar al terreno de juego.
- 3) La ampliación del régimen de compromisos con incorporación de un grupo de países en desarrollo debe resolver, mediante un proceso multilateral, el dilema entre una eficacia demasiado estricta, que representara una restricción inadmisibles para el proceso de desarrollo, y el relajamiento de la eficacia resultante de la incorporación de “aire caliente”<sup>14</sup> en el sistema.
  - 4) Consideraciones de equidad aparte. Por su vulnerabilidad socio-económica, la mayor parte de los países en desarrollo están sometidos a riesgos desproporcionados y no están en condiciones de asumir riesgos adicionales inmediatos, derivados de compromisos en el régimen de cambio climático.
  - 5) Cualquier nueva carga de mitigación debería tomar en cuenta la inequitativa y creciente carga de los riesgos derivados de desastres naturales asociados al clima, y la necesidad de enfrentar con decisión *la adaptación al cambio climático*. El actual fondo de adaptación derivado del Mecanismo de Desarrollo Limpio es por completo insuficiente para cubrir este objetivo.
  - 6) En ausencia de compromisos cuantitativos de reducción de tendencias de crecimiento de las emisiones de GEI, los países no industrializados de desarrollo intermedio deben cumplir de manera escrupulosa y con toda su capacidad los compromisos que la UNFCCC y el Protocolo establecen para la totalidad de las Partes.<sup>15</sup> Es preciso reconocer que muchos países en desarrollo parecen haber interpretado en forma muy laxa estas obligaciones.
  - 7) La perspectiva más viable de incorporación de países en desarrollo en un régimen climático ampliado, en el marco del Protocolo de Kyoto, parece pasar por las siguientes fases:
    - Entrada en vigor del Protocolo,
    - Análisis riguroso de diversas opciones, muchas de ellas ya identificadas, para la ampliación del régimen de compromisos: metas dinámicas vinculadas a un desempeño económico variable, metas sectoriales, compromisos no-vinculantes, opciones libres de riesgo, ampliación de los alcances del Mecanismo de Desarrollo Limpio, adopción de estándares industriales sectoriales asociados a bajas emisiones.



- Verificación en el año 2005 del “progreso demostrable” en el cumplimiento de las obligaciones de los países desarrollados, tal como lo estipula el Art. 3.2 del Protocolo.
- Negociación formal, multilateral, de la ampliación espacial y temporal del régimen diferenciado de compromisos. Esta negociación debería vincular la ampliación de compromisos por parte de un grupo de países en desarrollo, entre los que sin duda debería figurar nuestro país, a la profundización de los compromisos por parte de los países desarrollados, en el marco de la discusión de los esfuerzos globales correspondientes al Segundo Periodo de Compromiso (2013-2017).

La ampliación del régimen de compromisos ha permanecido hasta ahora fuera de la agenda de la negociación formal en el marco de la UNFCCC. Se ha tratado de manera incipiente en varios encuentros informales. El papel de los foros informales ha sido por cierto fundamental para los avances hacia un régimen climático aceptable para todas las Partes. En ellos se han abordado cuestiones técnicas y jurídicas inabordables en las COPS o en las Reuniones de los Órganos Subsidiarios de la UNFCCC; se han aprovechado para constituir muy valiosas relaciones personales entre negociadores, sin las cuales la negociación formal difícilmente hubiera podido seguir adelante en un tema cuya complejidad rebasa la de cualquier antecedente en la historia de las negociaciones ambientales multilaterales.

El World Business Council for Sustainable Development ha sido en los últimos años anfitrión organizador de los Diálogos de Glion, localidad suiza en la que se desarrollaron estos encuentros sobre la participación de países en desarrollo.

El tema de la evolución de compromisos se ha abordado también en forma extensa en los Foros de la OCDE, y en particular en el Grupo de Expertos del Anexo 1, en el que expertos mexicanos han intervenido ocasionalmente como observadores o como presentadores invitados. Algunos de los trabajos desarrollados por la OCDE y por la Agencia Internacional de Energía (de la que nuestro país no forma parte) constituyen los referentes técnicos más desarrollados hasta el momento para explorar opciones de evolución de compromisos.

Además del IPCC, que constituye la principal fuente de información y análisis técnico, organizaciones como World Resources Institute, Pew Center, World Wildlife Found, Resources for the Future, Center for Clean Air Policy,

con base en los Estados Unidos; otras como el Center for International Climate and Environmental Research (CICERO) de Noruega, el Royal Institute of International Affairs (Chatham House) del Reino Unido; el Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, de Alemania, así como innumerables centros de investigación y universidades, han desarrollado proyectos, organizado encuentros y seminarios, y difundido publicaciones, algunas de las cuales resulta imprescindible tomar en cuenta para discutir la evolución de los compromisos en el régimen climático global. En este mismo sentido apuntan algunos eventos, como la Reunión de Expertos sobre Cambio Climático y Desarrollo Sustentable [Seúl: 6-7 de septiembre del 2001], organizada por el Korea Environment Institute (KEI).

Incluso en el desastroso caso del descarrilamiento definitivo del Protocolo de Kioto, determinado por el abandono de este instrumento por parte de grandes países emisores, la discusión acerca de la índole, magnitud y evolución de los compromisos para mitigar el cambio climático y hacer frente a las tareas de adaptación deberá retomarse de inmediato. Cada año que pasa sin una acción global concertada cancela opciones de estabilización de las concentraciones de GEI, en perjuicio de las sociedades actuales y futuras. La acumulación de conocimientos adquiridos debería permitir que una nueva negociación, en el caso de que resultara inevitable, transcurriera por cauces más expeditos que aquellos que tan trabajosamente hemos recorrido durante los últimos diez años.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barnes, P. 2001. *Who Owns the Sky?: Our Common Assets and the Future of Capitalism*. Washington D.C.: Island Press.
- Baumert, K., R. Bhandari y N. Kete. 1999. *¿Cómo podría ser un compromiso de un país en desarrollo con respecto al clima?* Notas sobre el Clima. Programa sobre Clima, Energía y Contaminación. Washington D.C.: World Resources Institute.
- Berk, M. y M. Den Elzen. 1998. *The Brazilian proposal and other options for international burden sharing*. Bilthoven, Netherlands: Netherlands National Institute for Public Health and the Environment.
- Berk, M., J. van Minnen, B. Metz y W. Moomaw. 2001. *Climate Options for the Long-term (COOL) Global Dialogue synthesis report*. Bilthoven, Netherlands: RIVM.
- Claussen, E. y L. McNeilly. 1998. *Equity & Global Climate Change*. Arlington: Pew Center on Global Climate Change.

- Corfee-Morlot, Jan. 2002. *Climate change: long-term targets and short-term commitments*. Revised Draft Note. OECD/IEA.
- Estrada-Oyuela, Raúl A. 2000. Climate Change Mitigation and Equity. In: R. Pichs, R. Swart, N. Leary y F. Ormond (eds.) *Development, Equity and Sustainability in the Context of Climate Change, February 23-25, 2000, Havana, Cuba*. WMO, UNEP, Intergovernmental Panel on Climate Change. Proceedings of the Second IPCC Expert Meeting on Development, Equity and Sustainability.
- Gobierno de Brasil. 1997. *Proposed elements of a protocol to the UNFCCC*. Presented by Brazil in Response to the Berlin Mandate. FCCC/AGBM/1997/MISC.1/Add.3.
- Goldemberg, J. y W. Reid. 1998. Developing countries are combating climate change. *Energy Policy* 26 (3): 233-237.
- Hargrave, T. y N. Helme. 1998. *Growth Baselines: Reducing emissions and increasing investments in developing countries*. Washington D.C.: Center for Clean Air Policy.
- IEA (International Energy Agency). 2000. *Energy Policies: Local and Global Environmental Linkages in Developing Countries*. Note by the Secretariat. IEA/SLT(2000)53. Paris, France.
- IEA (International Energy Agency). 2000. *World Energy Outlook*. Paris: IEA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001a. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical Summary. WMO-UNEP. Cambridge: Cambridge University Press.
- . 2001b. *Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Munasinghe, M. 2000. Development, Equity and Sustainability (DES) in the context of Climate Change. IPCC Guidance Paper for Lead Authors of the Third Assessment Report. En: Ramón Pichs, R. Swart, N. Leary y F. Ormond (eds.). *Development, Equity and Sustainability in the Context of Climate Change, Febrero 23-25, 2000, La Habana, Cuba*. WMO-UNEP, Intergovernmental Panel on Climate Change. Proceedings of the Second IPCC Expert Meeting on Development, Equity and Sustainability.
- Philibert, C. 2000. How could emissions trading benefit developing countries. *Energy Policy* 28: 947-956.
- Philibert, C. 2002a. *Evolution of mitigation commitments: Fixed targets versus more flexible architectures*. Revised Draft Note. OECD/IEA.
- . 2002b. *Evolution of mitigation commitments: Certainty versus stringency*. Revised Draft Note. OECD/IEA.

- , y J. Pershing. 2001. Considering the options: climate targets for all countries. *Climate Policy 1*: 211-227.
- , J. Pershing, J. Corfee-Morlot y S. Willems. 2002. *In-House Seminar on Evolution of Mitigation Commitments: Summary of Previous Work and Key Issues*. Draft Note. OECD/IEA.

## Notas

---

- \* Profesor de El Colegio de México, Programa de Investigadores Asociados. Presidió el Comité Intersecretarial sobre Cambio Climático en el periodo 1997-2000 y participó en reuniones internacionales y negociaciones relativas al tema, con la representación de México. Actualmente es Subsecretario de Planeación y Política Ambiental, de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
1. El Anexo de referencia enlista a la mayor parte de los países industrializados. La identificación de estos países le permitía a la UNFCCC poner en práctica el principio de «responsabilidades comunes pero diferenciadas», incluido en la Declaración de Río y expresamente retomado en la UNFCCC.
  2. Participaban en el mencionado Comité: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, a la que correspondía presidirlo por su responsabilidad legal de coordinar la actuación del Gobierno Federal, Secretaría de Energía, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Secretaría de Relaciones Exteriores, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
  3. Liechtenstein se incorporó posteriormente al Grupo.
  4. Un primer borrador completo de esta Segunda Comunicación quedó concluido a fines de la administración del presidente Zedillo; la administración del presidente Fox revisó esta Comunicación y la publicó en forma de libro.
  5. La idea subyacente a la equidad se expresa en inglés mediante el concepto de *fairness*, con imperfecta traducción al español cuando se asimila al de “justicia”.
  6. Datos de la Agencia Internacional de Energía: *Key World Energy Statistics*, ed. 2000.
  7. Estos últimos datos corresponden al documento fechado el 12 de abril de 2001, suscrito por J. Lash, presidente del World Resources Institute, presentado a la atención del legislador J. Barton, presidente del Subcomité de Energía y Calidad del Aire, Comité de Energía y Comercio, de la Cámara de Representantes de los Estados Unidos de América.
  8. Agencia Internacional de Energía: “*Key World Energy Statistics*”, Ed. 2000. Los datos se refieren sólo a las emisiones por quema de combustibles fósiles. Esta publica-

ción no contabiliza a México como integrante de “América Latina”, al incluirlo en “OCDE”. A partir de los datos desagregados por país se puede corregir el indicador latinoamericano para incluir a nuestro país, lo cual hacemos en este trabajo.

9. Turquía aparece incluso en el listado del Anexo II, un subconjunto del Anexo I que asume compromisos adicionales de asistencia a países en desarrollo. La política turca en relación con la UNFCCC ha sido errática, en función de las perspectivas derivadas de su solicitud de incorporación a la Unión Europea.
10. Posteriormente, y muy probablemente en el contexto de sus prolongadas gestiones para ingresar en la Unión Europea, Turquía limitó su solicitud a la salida del Anexo II, subconjunto del Anexo I que asume compromisos adicionales de cooperación con países en desarrollo.
11. Ése fue el caso, por ejemplo, de la negociación para repartir los fondos del Plan Marshall para la reconstrucción de economías europeas, que se tradujo en un acuerdo específico ajeno a cualquier definición previa de criterios. Como dato curioso, el edificio que actualmente ocupa en Bonn el Secretariado de la UNFCCC (Haus Carstanjen), es aquel en el que se concretó la distribución de fondos del Plan Marshall.
12. Véase la Declaración de Bariloche, suscrita por Argentina y los Estados Unidos en octubre de 1997. Tras indicar que “la impresionante estabilidad económica y el crecimiento de Argentina son un indicador claro de que esta nación también cree en el poder del mercado”, la Declaración de Bariloche especifica: “Argentina concuerda con los Estados Unidos en que la única respuesta real a un problema global como el cambio climático debe ser una acción también global. Todos los países, desarrollados y en desarrollo, deben involucrarse significativamente.” “... Los países desarrollados deben cumplir sus obligaciones, y los países en desarrollo deben participar de manera significativa en este régimen global, incluyendo la consideración de limitación de emisiones para países en desarrollo.”
13. Si las negociaciones para acordar simples porcentajes de QELRCS en Kioto fueron tensas y complejas, cabe imaginar la complejidad de discusiones en torno a la fórmula  $E_{max} = k(PIB)X$ .
14. En la jerga de las negociaciones, el «aire caliente» se refiere a calidad ficticia de una reducción de emisiones lograda mediante una línea de base carente de realismo. Se aplica en el caso de países en transición cuyas reducciones en las emisiones de GEIS se deben al colapso de sus economías.
15. Compromisos establecidos en el Art. 4.1 de la UNFCCC y Art. 10 del Protocolo. Tomados en serio, estos compromisos permiten un avance considerable hacia la mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo.



# Los mecanismos flexibles del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

*Aquileo Guzmán, Israel Laguna  
y Julia Martínez\**

## INTRODUCCIÓN

EL PROTOCOLO DE KIOTO de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue adoptado durante la tercera reunión de la Conferencia de las Partes (CoP3), en Kioto, Japón, el 11 de diciembre de 1997. El Protocolo establece la obligación legal vinculante sobre las Partes Anexo I (países desarrollados y países con economías en transición a economías de mercado), para reducir sus emisiones de seis gases de efecto invernadero (GEIS), estipulados en el Anexo A, en conjunto, en aproximadamente 5.2% por debajo de los niveles de 1990 en el primer período de compromisos establecido (2008-2012). Los países en desarrollo (partes no Anexo I de la Convención no la comparten).

El compromiso cuantificado y diferenciado de reducción de emisiones de las Partes Anexo I se encuentra plasmado en el Anexo B del Protocolo; por ejemplo, Suiza, varios países de Europa Central y del Este y la Unión Europea en 8%; Estados Unidos en 7%; Canadá, Hungría, Japón y Polonia en 6%; mientras que nueva Zelanda y Ucrania deberán estabilizarlas al nivel de 1990. Algunos países tienen la oportunidad de aumentar sus emisiones, como Noruega con 1%, Australia en 8% e Islandia en 10%.

El Protocolo de Kioto entrará en vigor 90 días después de que lo hayan ratificado al menos 55 Partes de la Convención, entre las que se cuenten Partes Anexo I cuyas emisiones totales representen por lo menos 55% de las emisiones de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) correspondientes a 1990.

A finales de julio de 2004 lo habían ratificado 123 Partes (32 Anexo I y 91 no-Anexo I -países en desarrollo); la suma total de emisiones corresponde al 44.2%, lo cual significa que aún falta aproximadamente un 11% para cumplir con el requisito mencionado para su entrada en vigor.

Para que esto ocurra es indispensable que Rusia lo ratifique, ya que tiene el 17.4 % de las emisiones totales de 1990. Con base a un análisis reciente, se concluye que este país sería el principal beneficiado del mecanismo de comercio internacional de emisiones, posiblemente con una ganancia de US\$ 10 mil millones en el periodo 2008-2012 (Point Carbon 2003).

## LOS MECANISMOS DEL PROTOCOLO DE KIOTO

El Protocolo de Kioto incluye tres mecanismos (artículos 6, 12 y 17) diseñados para incrementar la costo-efectividad de la mitigación del cambio climático, al crear opciones para que las Partes Anexo I puedan reducir sus emisiones, o aumentar sus sumideros de carbono de manera más económica afuera de su país que adentro. Aunque el costo de limitar emisiones o expandir la captura varía mucho entre las regiones, el efecto en la atmósfera es el mismo, sin importar donde se lleven a cabo las acciones (UNFCCC 2003).

El artículo 17 establece el *comercio de emisiones*, mediante el cual las partes del Anexo B podrán participar en actividades de comercio de los derechos de emisión. También menciona que toda operación de este tipo será suplementaria a las medidas nacionales que se adopten para cumplir los compromisos cuantitativos de limitación y reducción de emisiones. Las Partes Anexo I adquieren Unidades de Cantidades Atribuidas (AAUs, *por sus siglas en inglés*) de otras partes Anexo I que pueden reducirlas de manera más económica.

Es importante destacar que las Partes deben conservar una cantidad definida de derechos de emisión, conocida como “reserva del período de compromiso”, que no pueden vender con el objeto de minimizar el peligro de no alcanzar sus propias metas de reducción.

El Artículo 6, *instrumentación conjunta*, señala que todas las Partes Anexo I podrán transferir a cualquier otra Parte incluida en el mismo Anexo, o adquirir de ella, las Unidades de Reducción de Emisiones (ERUs, *por sus siglas en Inglés*) resultantes de proyectos encaminados a reducir las emisiones antropogénicas de GEIS por las fuentes ó incrementar la absorción antropogénica por los sumideros. Las ERUs podrán ser utilizadas por las Partes que inviertan en dichos proyectos para cumplir sus metas de reducción.



Todo indica que muchas transacciones que se realicen dentro de estos dos mecanismos se llevarán a cabo entre miembros de la Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico (OCDE), que son Partes del Anexo 1, como compradores y los países con economías en transición a economía de mercado como vendedores, dado que las oportunidades de reducción son más baratas y abundantes en éstos últimos. A algunos países como Rusia y Ucrania se les asignó metas de reducción en el Protocolo de Kioto que algunos consideran como generosas. Lo anterior ha provocado preocupación de que una gran cantidad de créditos no resulten de acciones de mitigación (conocidos como aire caliente), los cuáles podrían debilitar el objetivo ambiental del Protocolo.

Entre las acciones que se han desarrollado para el impulso de estos mecanismos, tenemos que en julio de 2003, la Comisión Europea propuso al Parlamento y al Consejo de la Unión Europea un sistema interno de comercio de emisiones que dará inicio en 2005, el cual limitará las emisiones de CO<sub>2</sub> de algunos sectores industriales, así como en la generación de energía eléctrica. A los grandes emisores de CO<sub>2</sub> se les darán permisos anuales, las empresas que excedan sus permisos podrán invertir en tecnologías más limpias o comprar certificados en el mercado.

El Artículo 12, *Mecanismo de Desarrollo Limpio* (MDL), funciona de manera similar al de Instrumentación Conjunta, a diferencia que Partes no Anexo 1 serán los huéspedes de proyectos de mitigación. La estructura institucional del MDL es más compleja ya que incluye un Consejo Ejecutivo, creado en la COP7, que guiará y supervisará los arreglos prácticos del MDL. El Consejo opera bajo la autoridad de la Conferencia de las Partes.

Los procesos de monitoreo son más estrictos para garantizar que no se generen Certificados de Reducción de Emisiones (CERS, *por sus siglas en inglés*) ficticios, dado que algunos países en desarrollo carecen de la capacidad técnica necesaria para realizar un monitoreo preciso de sus emisiones. Las Unidades de Remoción (RMUS, *por sus siglas en inglés*), son las que se obtienen de las actividades de captura de carbono.

La Unión Europea pretende enlazar su sistema de comercio interno con la Instrumentación Conjunta y al MDL, lo que permitirá a las empresas europeas llevar a cabo proyectos de mitigación alrededor del mundo y convertir los créditos ganados en permisos de emisión en el marco del esquema de comercio de emisiones de ésta. La propuesta de la Comisión sugiere que no se permita la conversión de créditos provenientes de plantas nuclea-

res, grandes proyectos hidroeléctricos que no cumplan con la normatividad mundial sobre presas y de actividades de aforestación y reforestación dentro del MDL. Sin embargo, la propuesta reconoce que la Comisión considerará cuándo y cómo los créditos de las actividades de dichos proyectos forestales pudieran ser utilizados en el comercio de emisiones, a la luz de la aplicación de modalidades de proyectos de este tipo (Heller 2003).

Se espera que el MDL genere inversiones en países en desarrollo, especialmente del sector privado, y que se incremente la transferencia de tecnologías eficientes favorables al medio ambiente, con el fin de promover el desarrollo sustentable en general. Es importante destacar que el financiamiento y la transferencia de tecnología mencionados deben ser adicionales a los compromisos de las Partes Anexo II de la Convención y su Protocolo de Kioto; también el financiamiento público para el MDL no debe resultar en desviación fondos oficiales para la ayuda al desarrollo.

Los CERS resultantes podrán ser utilizados por Partes Anexo I para contribuir al cumplimiento de sus compromisos de reducción. El MDL puede considerarse como un mecanismo que ayuda a enfocar los problemas del cambio climático global a través de un concepto de mercado (AIE 1998), y también puede apoyar en conseguir fondos para proyectos certificados. Los CERS obtenidos del año 2000 al comienzo del primer período en 2008 podrán utilizarse para ayudar a alcanzar el cumplimiento de compromisos de reducción (acreditación temprana).

Aunque las reglas para el MDL se establecieron en los “Acuerdos de Marrakech”, durante la COP7, en 2001, todavía en junio del 2004 se elaboraban lineamientos para la inclusión de actividades de aforestación y reforestación, especialmente en proyectos de pequeña escala, para el primer período de compromisos. Las Partes Anexo I tendrán un límite en cuanto a la utilización de CERS provenientes de actividades de “captura”, para el cumplimiento de sus compromisos, hasta el 1% de las emisiones de los países en su año base, para cada uno de los cinco años del período de compromiso.

La reducción de emisiones tendrá que cumplir con el criterio de “adicionalidad”, los proyectos deben resultar en reducciones o captura que sean adicionales a cualquiera que hubiera ocurrido en ausencia del proyecto, con beneficios en el largo plazo para la mitigación del cambio climático y que además sean reales y cuantificables.

Estos proyectos deberán contar con la aprobación de todas las Partes involucradas, a través de las Autoridades Nacionales Designadas que tanto las Partes Anexo I, como No - Anexo I deberán establecer.

## EL CICLO DE PROYECTOS MDL

Los participantes deberán preparar un documento de diseño de proyecto, que incluya la metodología a utilizar para el cálculo de la línea base y el monitoreo, un análisis de los impactos ambientales, los comentarios recibidos de los involucrados en la localidad y una descripción de los beneficios ambientales nuevos y adicionales que el proyecto producirá.

Este documento será revisado por una Entidad Nacional Designada bajo el MDL, que puede ser nacional o una organización internacional acreditada y designada de manera provisional por el Consejo Ejecutivo, hasta que sean confirmadas por la primera sesión conjunta de la Conferencia de las Partes de la Convención y de la Reunión de las Partes del Protocolo (*COP/MOP, por sus siglas en inglés*). Después de dar oportunidad de recibir comentarios del público, decidirá si valida o no el proyecto. Otra función de la Entidad es verificar la reducción de emisiones de las actividades de los proyectos MDL registrados. Una vez que esté validado por completo lo enviará al Consejo Ejecutivo para su registro formal. A menos que una Parte participante o tres miembros del Consejo soliciten revisarlo, su registro se hará efectivo después de ocho semanas. Si procede, el Consejo elaborará los Certificados de Reducción de Emisiones correspondientes. Hasta julio de 2004, el Consejo Ejecutivo del MDL había acreditado y designado provisionalmente a cuatro entidades operacionales (UNFCCC-CDM 2004).

Los participantes prepararán un informe de monitoreo una vez que el proyecto esté en operación que incluirá una estimación de los CERS generados; la cual será verificada por una entidad operacional diferente a la que validó el proyecto, con el fin de evitar conflicto de intereses. Para la elaboración de un informe de verificación, la Entidad revisará a detalle el proyecto incluyendo inspección de campo. La certificación de reducción de emisiones reales se dará si todo el análisis resulta positivo. El Consejo producirá los CERS y los entregará a los participantes a menos que una Parte involucrada ó tres miembros del Consejo soliciten una revisión, en un plazo de 15 días.

Los CERS generados por proyectos MDL serán gravados con un 2%, cantidad que apoyará al Fondo de Adaptación para ayudar a los países en desarrollo que son particularmente vulnerables al cambio climático. Sólo los países considerados como menos desarrollados quedan exentos de dicho gravamen. Otro porcentaje, aún no determinado, será utilizado para cubrir

los costos administrativos del MDL. Mientras tanto se han cubierto con contribuciones voluntarias de las Partes.

## COSTOS DE TRANSACCIÓN

Para algunos proyectos MDL, especialmente de pequeña escala, la realización de las diferentes etapas del ciclo del proyecto, que van desde la preparación y revisión hasta la terminación del mismo, implican gastos significativos que se calculan en aproximadamente US\$ 265,000; tan sólo el proceso de verificación en el área forestal tendría un costo de alrededor de US\$ 20,000; lo significa que sólo los proyectos de gran magnitud podrán cubrirlos.

El MDL será administrado a través de tres órganos: el Consejo Ejecutivo, la COP/MOP y las Entidades Operacionales que estarán apoyadas por instancias independientes de auditoría y verificación.

## CRITERIOS PARA PARTICIPAR EN EL MDL

Los criterios de elegibilidad establecidos por el secretariado de la Convención Marco son los siguientes: *a)* la participación voluntaria de los países; *b)* el establecimiento de una Autoridad Nacional Designada para propósitos del MDL y *c)* el haber ratificado el Protocolo de Kioto. Además de los criterios anteriores, los países industrializados deberán reunir otras estipulaciones entre las que destaca el establecimiento de: *a)* La cantidad asignada bajo el artículo 3 del Protocolo; *b)* un sistema nacional para el cálculo de GEIS; *c)* un registro nacional; *d)* la elaboración de inventarios nacionales anuales de emisiones de gases de efecto invernadero; y *e)* un sistema de contabilidad para la compra y venta de reducción de emisiones.

En la ausencia de un acuerdo internacional sobre el establecimiento de criterios de sustentabilidad es importante que cada país anfitrión desarrolle los suyos, de acuerdo con los diferentes actores involucrados.

El MDL incluirá proyectos en los siguientes sectores:

1. Industrias energéticas (renovables/no renovables)
2. Distribución de energía
3. Demanda de energía
4. Industrias manufactureras
5. Industrias químicas

6. Construcción
7. Transporte
8. Minas / producción mineral
9. Producción metalúrgica
10. Emisiones fugitivas de combustibles (sólidos, petróleo y gas natural)
11. Emisiones fugitivas de la producción y consumo de halocarbonos y hexafluoruro de azufre
12. Uso de solventes
13. Disposición y manejo de desechos
14. Aforestación y reforestación
15. Agricultura

El MDL representa para México oportunidades de inversión en proyectos de mitigación en ambos sectores: energético y forestal. De acuerdo con el estudio “Mitigación de Emisiones de Carbono”, (Sheinbaum y Masera 2000), establecen un potencial anual de 131 MtCO<sub>2</sub><sup>1</sup> en el sector energía para el año 2010 y de 217 MtCO<sub>2</sub> en el sector forestal para medidas específicas evaluadas.

Existe un gran potencial de captura de carbono para proyectos forestales que a su vez promuevan el desarrollo sustentable. Los costos por tonelada equivalente de CO<sub>2</sub> de dichos proyectos son más bajos que los costos derivados de proyectos energéticos. De acuerdo a Pedroni (2002), la reducción de una tonelada de CO<sub>2</sub> en Japón puede tener un costo de US\$ 250 y en Europa de US\$ 175. En México, el costo promedio de captura del proyecto piloto Scolel Té se estimó en US\$ 13 por tonelada de Carbono (US\$ 3.55 por tCO<sub>2</sub>), e incluía la capacitación continua de las comunidades (<http://www.eccm.uk.com/scolelte>)

Como consecuencia del retiro de Estados Unidos de las negociaciones del Protocolo de Kioto, las proyecciones del mercado internacional de CERS en el periodo 2008-2012 se han reducido de un rango de 300-700 millones de toneladas de carbono equivalente (MtCeq) a 0-300 MtCeq. El rango estimado del precio del carbono en el 2010 disminuyó de US\$ 60–160 / tCeq a US\$ 3-87 / tCeq, (Heller 2003).

De acuerdo a Wellington (2003), el precio de la tonelada de carbono varía en función del tipo de comprador; para Partes con compromisos de reducción los estimados son: los del Prototype Carbon Fund, del Banco Mundial (US\$2.5–3.5 / tCO<sub>2</sub>), los del gobierno Holandés (ERUPT de • 5–9 /

tCO<sub>2</sub> en su primera fase; ERUPT 2 Y CERUPT a •4 / tCO<sub>2</sub> máximo esperado). Para compradores sin compromisos de reducción los precios oscilan de US\$ 0.5–2 / tCO<sub>2</sub>.

## PROYECTOS MDL EN EL SECTOR FORESTAL

El papel de los bosques en el cumplimiento de los objetivos de la Convención sobre Cambio Climático a través de las negociaciones ha sido controversial. Como se mencionó anteriormente, en 2001, se acordó que sólo serán elegibles las actividades de aforestación y reforestación relacionadas con el uso del suelo para el primer periodo de compromisos (2008-2012). El papel que jugarán los proyectos de uso del suelo y conservación de los bosques dentro del MDL se decidirá como parte de las negociaciones para el segundo periodo de compromisos (2013-2017).

Por otro lado, se ha establecido un marco general para aprobar y contabilizar los créditos de carbono generados por dichos proyectos (Auckland *et al.*, 2002; <http://unfccc.int/cdm>).

En la más reciente Conferencia de las Partes (COP 9, Milán, Italia) se acordó que el periodo de acreditación podrá ser de un máximo de 30 años ó de 20 años renovable dos veces (para un total de 60 años), siempre y cuando en cada renovación se revise la línea base. Adicionalmente se adoptó el concepto de certificados temporales para reflejar el carácter reversible del carbono capturado en bosques (ICERS ó tCERS)<sup>2</sup>. El país anfitrión evaluará los riesgos asociados con el uso de especies exóticas potencialmente invasoras y de organismos genéticamente modificados en proyectos del MDL.

Los proyectos de pequeña escala fueron definidos como aquellos que resulten en una captura antropogénica neta de GEI de menos de 8,000 toneladas de CO<sub>2</sub>eq./año y sean desarrollados por comunidades e individuos de “bajos recursos”. Estos proyectos podrán utilizar modalidades y procedimientos simplificados y beneficiarse de medidas que faciliten su implementación. La decisión final sobre las modalidades y procedimientos simplificados se tomará en la CoP10 (Diciembre 2004)

## PROYECTOS MDL EN EL SECTOR ENERGÍA

De acuerdo al Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, *por sus siglas en inglés*), las emisiones de CO<sub>2</sub>, principalmente derivadas de

la quema de combustibles fósiles y del cambio de uso del suelo, son responsables de un 70% del problema del cambio climático (IPCC 2001).

Para reducir las emisiones derivadas del consumo de combustibles fósiles, la Conferencia de las Partes acordó en Marrakech (2001), que cualquier proyecto energético con fecha de inicio posterior al primero de enero de 2000 sería elegible para su registro y obtención de CERS, siempre y cuando reúna los criterios establecidos por el Consejo Ejecutivo. Los acuerdos de Marrakech establecieron una “vía rápida” (*Fast track*) para proyectos de pequeña escala. Los proyectos considerados en dicha categoría son:

1. Los de energía renovable con una capacidad máxima de 15 Megawatts (MW).
2. Los de mejoramiento de eficiencia energética que reduzcan la demanda y/o oferta de energía hasta 15 GWh anuales.
3. Otras actividades que reduzcan emisiones por fuente, que directamente emitan menos de 15 kilotoneladas de CO<sub>2</sub> anuales.

Volviendo al tema de los altos costos de transacción que implica la instrumentación de proyectos MDL, lo que reduce la viabilidad de los proyectos de menor escala, es importante destacar que los Acuerdos de Marrakech reconocieron este problema y propusieron el desarrollo de procedimientos simplificados. Actualmente se desarrollan dichos procedimientos que permitirán la estandarización de líneas base, para una aprobación más rápida con el fin de que se puedan ofrecer los certificados a precios competitivos.

Los proyectos deberán seleccionar un periodo crediticio para sus actividades, ya sea un máximo de 10 años sin opción de renovación ó un máximo de siete años que podrá ser renovado como máximo dos veces (para un total de 21 años), con la condición de que se revise el desempeño y la línea base del proyecto.

Para consulta en línea de las once metodologías de líneas base y monitoreo que el Consejo Ejecutivo del MDL del Protocolo de Kioto ha aprobado, dirigirse a: (<http://cdm.unfccc.int/methodologies/approved>).

## BIBLIOGRAFÍA

Aukland, L., P. Moura Costa, S. Bass, S. Huq, N. Landell-Mills, R. Tipper y R. Carr. 2002. *Laying the foundations for Clean Development: Preparing the land Use Sec-*

- tor. *A quick guide to the Clean Development Mechanism*. London: IIED. Disponible en: <http://www.cdmcapacity.org>.
- Figueres, C. y M. Gowan. 2002. The operation of the CDM. In: Christina Figueres (ed.) *Establishing National Authorities for the CDM. A guide for developing countries*, pp. 21-32. Canada: International Institute for Sustainable Development and the Center for Sustainable Development in the Americas.
- Disponible en: [http://www.cckn.net/pdf/cdm\\_national\\_authorities.pdf](http://www.cckn.net/pdf/cdm_national_authorities.pdf).
- Heller, T. C. y P. R. Shukla. 2003. *Development and Climate. Beyond Kyoto: Advancing the International Effort against Climate Change*. (Working Draft). Washington: Pew Center.
- Pedroni, L. 2002. Aspectos a tomar en cuenta en proyectos forestales bajo el MDL. *Instrumentos Económicos y Medio Ambiente* 2(1):5-6. Disponible en: <http://www.andeancenter.com>.
- Point Carbon. 2003. Russia could earn 10bn USD from ratifying the Kyoto Protocol. <http://www.pointcarbon.com/article.php?articleID=2325> [fecha de consulta: 8 de julio de 2003].
- Scolel, Té. *Climate Change and Rural Livelihoods*. <http://www.eccm.uk.com/scolelte> [fecha de consulta: agosto de 2003].
- Sheinbaum, C. y O. Masera. 2000. Mitigating Carbon Emissions While Advancing National Development Priorities: The Case of Mexico. *Climate Change* 47:259-282.
- The Pembina Institute. 2002. *A User's guide to the Clean Development Mechanism (CDM)*. Canada: The Pembina Institute for Appropriate Development. Disponible en: [http://www.pembina.org/pdf/publications/cdm\\_users\\_guide.pdf](http://www.pembina.org/pdf/publications/cdm_users_guide.pdf).
- UNFCCC-CDM (United Nations Framework Convention on Climate Change–Clean Development Mechanism). 2004. *Designated Operational Entity (DOE)*. <http://cdm.unfccc.int/DOE/list> [fecha de consulta: julio de 2004].
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2003. *Caring for Climate Change. A guide to the Climate Change Convention and the Kyoto Protocol*. Issued by the Climate Change Secretariat (UNFCCC). Bonn, Germany.
- . 1998. *El Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Unidas sobre el Cambio Climático*. Publicado por la Secretaría del Cambio Climático con el apoyo de la Oficina de Información sobre las Convenciones del PNUMA. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
- Wellington, F. 2003. How Forestry can utilize carbon sequestration to improve capital structures: Using the CDM to increase debt capacity. En: *International Workshop Lessons learned on monitoring of environmental services*, August 7-8, 2003. Guadalajara, Jalisco, México.



## Notas

---

\* Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT.

1. Millones de toneladas de CO<sub>2</sub>

2. Long-term Certified Emission Reduction. Temporary Certified Emission Reduction.



# Lucha contra la desertificación y lucha contra el calentamiento global

*Gonzalo Chapela*

A LOS DIEZ AÑOS de la Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro, Brasil, en 1992, pudimos ver un reflujo en el entusiasmo sobre los temas ambientales. Lo anterior es importante dado que es notorio que los esfuerzos que la sociedad invierte en enfrentar sus problemas ambientales, los lleva a cabo principalmente cuando éstos son evidentes e inmediatos.

También se debe tomar en cuenta que existe una reducción en los recursos aplicados y en los compromisos adoptados por los países y los grupos sociales en materia ambiental y, por otro lado, también existe la dificultad para visualizar, desde cada campo sustancial del quehacer humano, el significado ambiental de las grandes decisiones y también de las múltiples pequeñas acciones y, de esa manera, establecer los acuerdos para lograr una mayor efectividad para actuar conjuntamente.

Mientras diversos grupos de interés debaten sobre la importancia de adoptar mayores compromisos y retomar una actitud más activa respecto de esos problemas ambientales, una veta de acción complementaria de gran importancia es el aprovechamiento de los esfuerzos en marcha, con objeto de lograr mayores efectos, dentro de las limitaciones existentes.

El calentamiento climático global es uno de los fenómenos más complejos que tienen lugar en los días contemporáneos, tanto en relación con su amplitud y la inclusión de todos los países y culturas, como en su temática, que incluye muy diferentes aspectos.

La estrategia para la disminución de gases con efecto invernadero en la atmósfera, que es el objetivo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, tiene dos componentes básicos: la reducción de las emisiones de diversos gases y la captura o fijación de bióxido de

carbono por medio de la actividad fotosintética de las plantas (ver el capítulo *La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de E. de Alba, en esta sección).

La mayor parte de las acciones orientadas hacia la mitigación del calentamiento global se refieren a los procesos que llamaremos urbanos: la generación de energía, la combustión en motores del autotransporte, el uso de gases de gran efecto invernadero, etc. (ver los capítulos en la sección IV).

Un factor importante en el balance de emisiones de gases con efecto invernadero es la problemática de los recursos naturales. Tanto en el caso de los procesos urbanos como en el manejo de los recursos naturales, algunas acciones tienen efectos contradictorios con objetivos del desarrollo, mientras que otras producen resultados benéficos a la sociedad o a los particulares mismos, a la vez que contribuyen a los objetivos ambientales.

Mientras que es ampliamente conocido el beneficio de mejorar la eficiencia en el uso de combustibles fósiles, o reducir los incendios descontrolados en las selvas, por ejemplo (SEMARNAT 2001), existen otros procesos menos evidentes y conocidos, como es la lucha contra la desertificación.

## LA DESERTIFICACIÓN

La desertificación es un fenómeno reconocido desde la década de 1960-1970 (ver el capítulo *Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación*, de O. Oropeza, en la sección III), a raíz de las hambrunas que tuvieron lugar en los países coloniales o recientemente independizados al sur del desierto de Sahara (PNUMA 2000).

A raíz de diversos y rápidos cambios políticos y de régimen de tenencia de la tierra, se suscitaron desequilibrios en los delicados sistemas de uso de esas frágiles tierras, lo que condujo a la reducción violenta de la productividad, así como al incremento de la vulnerabilidad de los sistemas agroalimentarios de la región (Drummond 1992).

Las sequías recurrentes que tuvieron lugar provocaron dramáticas consecuencias en los países afectados por la degradación de los recursos naturales y de su capital humano y social, con efectos desastrosos en términos de mortalidad, migraciones, pérdida de suficiencia alimentaria y de estabilidad social.

Por su cercanía con el Sahara, la connotación de estos procesos fue la del crecimiento de ese desierto, al perderse irreversiblemente la posibilidad de aprovechamiento de las tierras en una franja de particular fragilidad.

Con una historia de dificultades y retrocesos, en 1992 los participantes en la Cumbre de la Tierra, en Río de Janeiro, aprobaron la formación de un Comité de Negociaciones para la redacción de una Convención de Lucha Contra la Desertificación, que fue concluida el 17 de junio de 1994.

Con México en primer lugar, la mayoría de los países ratificaron la Convención Contra la Desertificación (CCD), la cual entró en vigencia en septiembre de 1996 (PNUMA, 2000). Su primera Conferencia de las Partes; es decir, su asamblea general, se realizó en Roma en 1997, y a la fecha ha celebrado ya su sexta Conferencia (Roma, Italia, 1997; Dakar, Senegal, 1998; Recife, Brasil, 1999; Bonn, Alemania, 2000; Ginebra, Suiza, 2001; y La Habana, Cuba, 2003).

Para México, que ha tenido un papel muy activo en la CCD, la ratificación de la Convención por el Senado de la República convierte a este instrumento jurídico en un Tratado, con jerarquía constitucional.

A la vez que, desde su origen, la desertificación ha sido asociada muy limitativamente con condiciones de aridez, ha sido motivo de una reflexión sistematizada sobre sus características, causas y consecuencias, lo que proporciona un marco conceptual de carácter integral, que permite construir propuestas programáticas completas y radicales (NU 1994).

De la misma manera, frecuentemente se utiliza un concepto restringido sobre la naturaleza de las tierras objeto de la lucha contra la desertificación, que incluye solamente el sustrato que llamamos *suelo*. Una comprensión más útil sobre las tierras debe abarcar una mayor riqueza de determinaciones.

La tierra, como recurso *natural*; es decir, sin la acción constructiva humana, incluye variables relativamente estables, como el relieve, la exposición, o la localización en latitud, longitud o altitud, lo que determina los principales climas y atributos de fragilidad de las tierras. A la vez, incluye también la constitución geológica y el suelo generado mediante largos procesos y el acervo genético de microorganismos y organismos superiores, entre los que destacan las plantas.

Sobre este sustrato *natural* ocurren acciones humanas que acondicionan las tierras o les proveen características que facilitan la producción y el acceso al abastecimiento de medios de trabajo o a los mercados. En el primer grupo se encuentran las obras de mejoramiento, como terrazas, abonados o prácticas de pastoreo mejoradoras de la condición de los potreros; en el segundo grupo se pueden encontrar las vías de comunicación o infraestructura productiva como obras hidráulicas, almacenamientos o electri-

ficación, que tienen todas un efecto sustancial sobre la producción, sin ser parte de la dotación *natural* de recursos.

No menos importante que lo anterior es la definición de las tierras como objeto de relaciones humanas, tanto económicas como sociales y culturales. Las diversas formas de derechos de propiedad, que rebasan la estricta definición de lo jurídico; las instituciones locales de regulación de la gestión de recursos de propiedad común, el carácter territorial y patrimonial de la tierra, son complejas determinaciones sin las cuales no es posible entender la dinámica de la gestión de las tierras (Chapela 2000).

Sólo desde una perspectiva inclusiva que considere estas complejas interrelaciones, es posible abordar con éxito la lucha por el mejoramiento de los recursos naturales y de la calidad de vida de poblaciones que dependen directamente de su producción e, indirectamente, de servicios ambientales tales como, en este caso, la captura y almacenamiento de bióxido de carbono.

Además debe hacerse notar que la desertificación ocurre en tres planos de diagnóstico: el más inmediato es el de los datos de daños sobre las tierras; el segundo observa la relación inmediata entre los sistemas de manejo de las tierras y su condición; el tercero indaga sobre las causas que determinan la selección de técnicas y sistemas de aprovechamiento de las tierras (SEMARNAP 1995).

Cada uno de esos planos implica una diferente percepción y tratamiento del problema, como se observa en los ejemplos del siguiente cuadro:

El concepto de la desertificación incluye, de esta manera, los campos de los tres planos de diagnóstico y también las determinaciones más amplias relacionadas con aspectos como las políticas de comercio exterior, los criterios sobre derechos de propiedad, la cuestión indígena, la tasa cambiaria o el monto y orientación del gasto público.

El carácter integral de la percepción y programa de lucha contra la desertificación, obliga a enfatizar la necesidad de la armonización de las decisiones dentro de las acciones sustanciales de la sociedad y no sólo el actuar sobre los efectos más evidentes del problema (NU 1996 y Chapela 2003).

Por otro lado, la preocupación por la desertificación considera sus consecuencias: migración, pobreza, discriminación de género, o la pérdida de biodiversidad y, como se mencionó anteriormente, servicios ambientales, como la captura de bióxido de carbono.

Con estas definiciones, la lucha contra la desertificación se convierte en un programa muy cercano a las acciones de desarrollo regional, que busca interactuar, de manera privilegiada, con las grandes iniciativas de transformación cultural y económica de la sociedad rural.

CUADRO 1. PROBLEMAS DE DESERTIFICACIÓN, PLANOS DE DIAGNÓSTICO Y PROGRAMAS DE ACCIÓN

	DIAGNÓSTICO INMEDIATO	SISTEMAS DE MANEJO	CAUSAS DE SELECCIÓN DE MALAS TÉCNICAS Y SISTEMAS DE MANEJO
<i>Diagnóstico</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erosión en ganadería extensiva</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pastoreo continuo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausencia de sistema de derechos de pastos</li> </ul>
Ganadería de pastoreo, norte de México	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compactación</li> <li>• Pérdida de infiltración de agua</li> <li>• Pérdida de especies deseables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobrecarga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de acceso a conocimientos</li> <li>• Falta de recursos financieros</li> <li>• Falta de infraestructura básica</li> </ul>
Programa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construcción de retenes</li> <li>• Acondicionamiento mecánico</li> <li>• Resiembra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste de carga</li> <li>• Pastoreo rotativo</li> <li>• Programación de partos y ventas</li> <li>• Distribución del ganado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Organización e instituciones locales de gobierno</li> <li>• Inversiones públicas temporales en infraestructura</li> <li>• Acompañamiento a la gestión de los productores</li> </ul>
<i>Diagnóstico</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inundaciones catastróficas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agricultura migratoria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insuficiente asesoría experimentación</li> </ul>
Agricultura de montaña costa sureste	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erosión</li> <li>• Pérdida de cubierta forestal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ganadería extensiva permanente</li> <li>• Concentración de drenes deficientes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislamiento de los productores</li> <li>• Mercados alternativos</li> </ul>
Programa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programas militares de contingencia</li> <li>• Reforestación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cultivos bajo sombra</li> <li>• Cultivo de cobertura</li> <li>• Barreras vivas con especies útiles locales</li> <li>• Pastoreo estacional en la costa y sierra</li> <li>• Dispersión de drenes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo de mercados</li> <li>• Concertación entre ganaderos de la sierra y la costa</li> <li>• Cambio de criterios de integración de cuencas</li> </ul>

La pérdida de productividad de las tierras puede ocurrir por efecto de los grandes cambios naturales en los que no hay injerencia de los hombres, tales como las glaciaciones, la circulación general de la atmósfera o el relieve. Lo que, en español, es nombrado convencionalmente como *desertización*. El término *desertificación* se reserva, también de manera convencional, a la degradación de las tierras causada por los humanos.

La degradación antrópica de las tierras es un proceso dinámico que puede ser reversible, dentro de límites marcados por la posibilidad de recuperación del suelo, sustrato fundamental prácticamente no renovable, dada la longitud del periodo necesario para esa recuperación. Se podría decir que, prácticamente, todos los problemas ambientales son teóricamente reversibles, a excepción de la pérdida de los recursos genéticos y del suelo.

Cuando la degradación de la tierra alcanza un estado irreversible, se dice que se ha desertificado, dando, en ocasiones, la falsa impresión de un proceso abrupto, cuando más bien es gradual y puede ocurrir en cualquier condición climática, en donde son aplicables todos los conceptos y acciones relativos a la desertificación, tal como lo establece para México la Ley de Desarrollo Rural Sustentable aprobada por el Congreso de la Unión en 2001 (Congreso de la Unión 2001).

La lucha contra la desertificación es pues, para México, un objetivo prioritario, jurídicamente obligatorio, con aplicación en todo el territorio nacional.

## COINCIDENCIAS DE LAS AGENDAS DE LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN Y LA DE CAMBIO CLIMÁTICO

La fotosíntesis es la característica esencial de vinculación entre algunos de los esfuerzos por reducir el calentamiento global y por detener la desertificación. Como proceso básico generador de vida, la fotosíntesis es la única manera natural conocida para transformar en material orgánico el bióxido de carbono contenido en la atmósfera y almacenarlo en diversas formas posteriormente.

La fotosíntesis, de hecho, fue el mecanismo mediante el cual las plantas que existieron en eras geológicas anteriores fijaron la energía del sol y el bióxido de carbono que actualmente contienen los combustibles que utiliza la sociedad industrial, regresando, al consumirlos, el bióxido de carbono nuevamente a la atmósfera, con el consecuente aumento del efecto de invernadero.



Los puntos de encuentro entre las dos convenciones son en primera instancia, por consecuencia, las acciones que se pudieran emprender para la protección de las reservas de bióxido de carbono que existen almacenadas en los recursos naturales de vegetación y materia orgánica de los suelos; a la vez, el incremento de la masa de materia orgánica contenida en los organismos vivos o sus productos y el suelo.

Se pueden identificar las siguientes líneas esenciales de acción sinérgica:

- a) Garantizar la *base de la producción* primaria, como forma fundamental para la captura de carbono. Lo anterior implica la protección y el mejoramiento de las tierras, como sustrato productivo básico.

No es posible pensar en la captura de carbono mediante el incremento en la fotosíntesis, sin establecer medidas para incrementar el potencial productivo de las tierras.

El incremento del contenido de materia orgánica, la retención del agua, la construcción de obras de conservación de suelos, como son las terrazas, el subsoleo, el surcado en contorno, la extracción de sales, la corrección de los valores de reacción, o los abonados, entre otras, son prácticas que, en su contexto particular, contribuyen a incrementar la tasa potencial de fotosíntesis, que significa una mayor captación de bióxido de carbono, a la vez que una mejoría en los ingresos o bienes para la población.

- b) Protección eficaz de la *cubierta vegetal* y los ecosistemas como conjunto integral.

Lo anterior puede significar la segregación de tierras a la actividad productiva, lo cual en algunos casos es necesario; sin embargo, otra opción de gran potencialidad es la promoción de acciones de manejo y aprovechamiento sustentable que proporcionen beneficios tangibles a sus dueños. En el caso de México, donde una condición casi *endémica* es la presencia de comunidades campesinas en las áreas con ecosistemas naturales, existen notables ejemplos de manejo sustentable de recursos de flora y fauna.

Desde el punto de vista de la captura de bióxido de carbono, es importante tener presente que los ecosistemas segregados tienden a estabilizar su relación producción-consumo, mientras que en aquellos manejados con una tasa de extracción sostenible, la fijación neta de bióxido

de carbono es persistente. En todo caso, sería conveniente evaluar comparativamente los resultados de los enfoques y buscar un equilibrio aceptable entre ambos.

- c) Adopción de *patrones agropastoriles* que incluyan mayor persistencia de la cobertura vegetal y mayor productividad primaria.

No sólo la vegetación de los ecosistemas *naturales* es capaz de fijar bióxido de carbono. De hecho, la domesticación y selección de plantas útiles al hombre, ha permitido identificar y generar organismos altamente especializados en acumular materia orgánica. Casos sobresalientes de lo anterior son los cultivos de granos, los forrajes, la caña de azúcar, el bambú o los árboles de rápido crecimiento.

El incremento de la productividad en la agricultura puede ser un componente muy significativo en la captura de carbono.

- d) Promoción de *productos agropecuarios y forestales de mayor persistencia* en uso, para incrementar la relación volumen-tiempo en la captura de carbono.

Como tema de balance contable, la captura efectiva de carbono está correlacionada con el tiempo útil de los productos del campo que contienen carbono capturado. Así, el azúcar tendría, como energético que es, una vida útil de menos de un año, mientras que una pieza de madera para construcción debería tener una vida útil de entre 50 y 100 años.

Una de las líneas de acción contra el calentamiento global, desde la perspectiva de la producción de las tierras, es la promoción de formas de prolongar la vida útil de los productos provenientes de fotosíntesis, como, por ejemplo, la utilización del bagazo de caña como materia prima del papel, el tratamiento de las maderas para una mayor durabilidad de las construcciones, etc. Por lo general, estas medidas deberían ser rentables por su propio carácter y contribuirían a otros propósitos sociales, como reducir el costo del papel o de la vivienda.

- e) Incremento en el contenido de *materia orgánica de los suelos*

El potencial de almacenamiento de carbono en el suelo, en forma de materia orgánica, ha sido poco reconocido (FAO, 2001). Sin embargo, un ejercicio aritmético simple que considere los suelos de los 200 millones de hectáreas de México, con una profundidad de 40 cm y un contenido

actual promedio de materia orgánica del orden de 1.5%, representa una reserva actual aproximada de 22,000 millones de toneladas de bióxido de carbono y un potencial adicional de dos veces esa cifra.

Además de las medidas mencionadas de conservación e incremento del carbono capturado, es conveniente anotar que ambas convenciones consideran en sus agendas tres componentes importantes:

- Medidas de mitigación de los efectos del calentamiento

Gracias a las compañías de seguros es posible ahora documentar el aumento en la incidencia y la intensidad de las catástrofes meteorológicas a la par que continúa el calentamiento atmosférico, con mayor frecuencia e intensidad de las oscilaciones térmicas marinas que dan origen a los fenómenos de *El Niño* y *La Niña*.

La CCD considera también atender este aspecto, principalmente en lo referente a la mitigación de los efectos de la sequía y su impacto indirecto sobre la calidad de los recursos (ver el capítulo *Sequía meteorológica*, de M. E. Hernández, en la sección III). Las técnicas de cosecha de agua, las de incremento de la infiltración o las de incremento en la cubierta vegetal en las tierras de pastoreo, son medios para la reducción del efecto de las sequías.

De la misma manera, el efecto de los excesos de lluvia, que causan avalanchas e inundaciones, es objeto de la preocupación de la CCD, que promueve medidas de manejo y mejoramiento de las cuencas, que, junto con la reducción del riesgo y vulnerabilidad, al ser mejoradas cuentan con mejores atributos productivos.

- Establecimiento de sistemas de alerta temprana

El establecimiento de sistemas de alerta temprana, que ocupa a ambas convenciones, incluye la generación y difusión de mapas de riesgo y fragilidad, que permitan focalizar la atención a las zonas con mayores problemas potenciales.

Igualmente, la utilización de medios modernos de detección de incendios y condiciones de incidencia de siniestros, el trazado de rutas de tormentas y ciclones y otros medios prospectivos deben acompañarse de medidas preventivas que incluyen el ordenamiento del territorio, a

fin de que los usos de la tierra consideren el factor de riesgo y las actividades humanas se ubiquen en condiciones de baja amenaza, así como acciones más directamente orientadas a reducir los impactos de los siniestros en el corto plazo, por medio del aligeramiento de la carga animal que deberá ser suplementada, la restricción de siembra cuando no se pronostican buenas cosechas, y la disposición de estrategias alternativas para la alimentación, en su caso.

- Monitoreo e información

El monitoreo es un instrumento de planeación que comparten ambas convenciones. La aplicación de los sistemas de inventario y monitoreo de las tierras tiene múltiples beneficios, incluida la posibilidad de destinar los recursos escasos disponibles a los propósitos que lo ameriten (CONAZA 1993; Santibáñez 1999).

Otra aplicación importante del monitoreo es la evaluación del efecto de las decisiones y medidas aplicadas. Este aspecto, por sí solo tiene un enorme impacto en la gestión y la gobernabilidad, como forma de aplicar el principio básico de rendición de cuentas y hacer posible el escrutinio por parte, en primer lugar, de los miembros de la sociedad, del poder legislativo en su función de vigilante del Ejecutivo e, inclusive, tratándose de compromisos internacionales, de órganos internacionales.

Sin lugar a dudas, se puede afirmar que todas las acciones en favor de la conservación y mejoramiento de los recursos naturales; es decir, la lucha contra la desertificación, contribuyen sin excepción a la mitigación del calentamiento atmosférico. Dichas acciones, tanto directas como indirectas, deberían ser coordinadas con provecho para los propósitos de ambas convenciones.

## PROPUESTAS PARA INCREMENTAR LA SINERGIA ENTRE LAS CONVENCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DESERTIFICACIÓN

Con los múltiples puntos en común de las dos convenciones, es evidente la urgencia de dar pasos hacia la coordinación de las acciones de ambas. Entre las principales medidas que se pueden sugerir están:

1. El trabajo conjunto para promover un proceso profundo y sistemático, de largo alcance, para armonizar las políticas relacionadas con el campo, a fin de mejorar su desempeño ambiental, sin demérito de los objetivos específicos para los que fueron creados los instrumentos correspondientes.
2. Coordinación de los planes sectoriales de los diversos programas de gobierno, a fin de que todas las acciones relevantes coincidan en su enfoque de promoción de la sustentabilidad.
3. Formulación, promulgación, reglamentación y aplicación de un marco jurídico congruente, que incluye, al menos, la Ley de Desarrollo Rural Sustentable, la Ley Forestal, la Ley de Aguas Nacionales y la Ley de Conservación de Tierras, que se entrelazan de manera múltiple y estrecha y deberían ser objeto de un trabajo minucioso de carácter integral.
4. Acceso a bonos y transferencias relacionados con la captura y conservación de depósitos de bióxido de carbono y la prevención de daños en las cuencas hidrográficas y los ocurridos por sequías.
5. Inclusión del tema de desertificación y degradación de tierras en los instrumentos financieros ambientales, como el Fondo Mundial para la Naturaleza, como fue aprobado en la Conferencia de las Partes de la CCD, celebrada en La Habana, en 2003 (NU 1996). Los lineamientos y decisiones internas del Fondo, han sido plasmadas en el Documento Operativo 15 (FMAM 2003).
6. Establecer un mecanismo institucional permanente de coordinación entre las acciones de ambas convenciones.
7. Endosar a la CCD la agenda “verde” de la Convención de Cambio Climático.

## BIBLIOGRAFÍA

- CONAZA (Comisión Nacional de Zonas Áridas). 1993. *Plan de acción para Combatir la Desertificación en México*. Saltillo, México.
- Congreso de la Unión. 2001. *Ley de desarrollo Rural Sustentable*. Edición de las Comisiones de Agricultura y de Desarrollo Rural. México
- Chapela, G. 2000. Recursos Forestales, Tierras y Desertificación. En: *Foro Nacional: Política Ambiental Mexicana. Los Retos del Nuevo Milenio*, 21 y 22 de septiembre de 2000. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca-Universidad Nacional Autónoma de México, Xochimilco. México.
- . 2003. Armonización de Políticas en la Lucha contra la Desertificación: El caso de México. En: J. Luis Mérega (comp.) *Desertificación y Sociedad Civil*. Buenos

- Aires: Fundación del Sur y Mecanismo Mundial de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación.
- Drummond, R. 1992. *Un Mundo Insustentable*. México: Siglo XXI Editores.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2001. Soil Carbon Sequestration for Improved Land Management. *FAO World Soil Resources Reports No 96*. Roma.
- FMAM (Fondo para el Medio Ambiente Mundial). 2003. Documento Operativo 15. Mecanoescrito. New York.
- NU (Naciones Unidas). 1994. Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en Países con Sequía Seria o Desertificación, particularmente en África. París.
- . 1996. Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, III Reunión Regional para América Latina y el Caribe. Programa Regional de Acción. Armonización de Políticas Públicas. Mecanoescrito. Habana, Cuba.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2000. *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial Geo-3*. Madrid: Ediciones Mundiprensa.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1995. *Programa Sectorial Forestal y de Suelos*. México: SEMARNAP.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2001. *Cruzada por el agua y el bosque*. Documento Base. Mecanoescrito. México.
- . 2001. *Plan Estratégico Forestal para México 2025*. Mecanoescrito, México: SEMARNAT.
- Santibáñez, F. 1999. *Sistema Armonizado de Indicadores Sobre la Desertificación en América Latina y el Caribe*. Santiago: Universidad de Chile.

Sección III  
Impactos, vulnerabilidad y adaptación





# Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México

*Víctor Magaña,\* Juan Matías Méndez,\*  
Rubén Morales\*\* y Cecilia Millán\*\**

## INTRODUCCIÓN

CONDICIONES EXTREMAS EN el clima afectan la vida del planeta. Dependiendo de la intensidad y duración de una anomalía en la lluvia o la temperatura, así como del grado de vulnerabilidad de una sociedad o de un ecosistema, los impactos del clima pueden variar de imperceptibles a catastróficos. Para entender el origen de muchos de los grandes desastres naturales se debe tener en cuenta el factor riesgo, como una combinación de la amenaza y de la vulnerabilidad. En el presente caso, la amenaza pueden ser las condiciones extremas asociadas al cambio climático mientras que la vulnerabilidad estará asociada al desarrollo (o subdesarrollo) del país.

En México, la vulnerabilidad de la población a extremos del clima es grande. Dado que una vasta parte de nuestro territorio es semiárido (poca precipitación la mayor parte del año), los cambios en la temporada de lluvias resultan en amenaza de sequía (ver el capítulo *Sequía Meteorológica*, de M. E. Hernández y G. Valdez, en esta sección) y, con frecuencia, en desastres para sectores dependientes del agua. Es por ello que para nuestro país el manejo adecuado de este recurso se ha vuelto prioritario. Como en muchas otras partes del mundo, donde las variaciones en las lluvias estacionales son poco entendidas, resulta de gran importancia para los tomadores de decisiones el considerar con cuidado la información que los científicos generan sobre el clima. Desafortunadamente, las lluvias deficitarias también han llevado a charlatanes a proponer costosos y fraudulentos sistemas que supuestamente producen precipitación, aprovechándose de la ignorancia y la necesidad de agua de muchos agricultores y autoridades.

La forma más conocida de variabilidad interanual en el clima está relacionada con El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), que altera los patrones climáticos globales con periodos de dos a siete años, resultando con frecuencia en multimillonarias pérdidas. Como el fenómeno ENOS se trata de una forma de variabilidad natural del clima, muchos esfuerzos científicos se han encaminado a entender mejor su origen y sus impactos, para así disponer de mejores predicciones de su ocurrencia. Mejores pronósticos permiten prepararse, reduciéndose los daños o incluso aprovechándose ciertas condiciones anómalas del clima. No se piense, sin embargo, que la variabilidad interanual en el clima se reduce sólo al fenómeno ENOS. Existen otros factores que pueden generar variaciones en el clima en escalas de tiempo de años, décadas o incluso siglos que aún no entendemos. Los cambios en la temperatura de la superficie del mar en el Atlántico, las variaciones en la cubierta de hielo y nieve (ver el capítulo *Investigaciones de los glaciares y del hielo de los polos*, de L. Vázquez, en la sección 1), así como los cambios en la cubierta vegetal del planeta son sólo algunos de los elementos que habrá que considerar para disponer de pronósticos del clima más precisos.

A diferencia de la variabilidad natural del clima, las evidencias apuntan a que el cambio climático actual tiene su origen en actividades humanas. La quema de combustibles fósiles, la deforestación o la agricultura intensiva, resultan en alteraciones de la composición atmosférica que, gradual pero consistentemente, comienzan a reflejarse en el clima (ver los capítulos *¿Qué es el efecto invernadero?*, de R. Garduño, y *Los gases regulados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de D. H. Cuatecontzi y J. Gasca, en la sección 1). Podemos decir que mientras que la variabilidad natural del clima se presenta como ciclos, el cambio climático de origen antropogénico es más bien una tendencia en las condiciones medias de las variables.

El problema del cambio climático, desde el punto de vista del desarrollo de un país o una región, cobra sentido cuando se considera la manera como las anomalías en el clima afectan a los sectores socioeconómicos. La amenaza del fenómeno debe analizarse mediante la generación de escenarios del clima futuro y mediante la comparación de éstos con las condiciones actuales o incluso pasadas. Así, más que hablar de pronósticos para el año 2076, se habla de escenarios a cincuenta o cien años, ya que sin determinar de manera precisa cuáles serán los valores de lluvia o temperatura que se tendrán en un punto y momento determinados, se propone una situación de

cambio probable en ciertos parámetros como la lluvia o la temperatura media estacional. De tales condiciones se deduce información relevante para la sociedad, como la referente a disponibilidad de agua o las condiciones de *confort* humano, y se analiza qué tan preparados estaríamos para vivir en tales escenarios. De esta manera, en un escenario se propone si las lluvias serán más o menos intensas o frecuentes de lo que son en la actualidad, o si la temperatura de superficie aumentará o disminuirá más allá de lo que se consideran rangos normales de variabilidad para tal parámetro. Considerando la vulnerabilidad actual se pueden proponer medidas de adaptación para que el impacto del cambio o incluso de la variabilidad del clima no sea grande. Por lo antes descrito, es conveniente contar con pronósticos estacionales del clima y con escenarios adecuados de cambio climático, así como con estudios de vulnerabilidad por sector ante extremos en el clima, para proponer estrategias de adaptación.

Durante las últimas dos décadas del siglo xx, hubo grandes avances en el entendimiento de la variabilidad y del cambio climático. Es por ello que hoy los gobiernos de muchos países consideran las variaciones del clima como un elemento importante en el establecimiento de sus políticas de desarrollo.

## IMPACTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

La mayor experiencia en términos de impactos por variaciones en el clima es la asociada a El Niño, que corresponde a un estado del océano Pacífico en que la temperatura de superficie del mar, desde las costas de Perú y Ecuador hasta el Pacífico central, presenta una anomalía positiva (entre 2 y 5°C). Tal calentamiento produce cambios en la circulación atmosférica que alteran el clima de todo el planeta. En invierno o verano, las principales alteraciones en el clima corresponden al ciclo hidrológico en regiones tropicales y subtropicales. Las variaciones en el clima generalmente son proporcionales a la intensidad de la anomalía de la temperatura de superficie del mar en el Pacífico ecuatorial del este. Así, los eventos más intensos de El Niño registrados en el siglo xx ocurrieron en 1982-1983 y en 1997-1998, cuando la anomalía en la temperatura de superficie del mar sobrepasó los 4°C.

Así como se habla del fenómeno El Niño, existe una contraparte climática conocida como La Niña. Durante ese periodo, la temperatura de superficie del mar en la región del Pacífico tropical centro-este es más baja de lo normal y los efectos en el clima del planeta son aproximadamente opuestos a

los observados durante El Niño. Muchos piensan que el estado normal del clima es la fluctuación entre Niños y Niñas, en lo que se conoce como ENOS.

Los cambios en el clima en periodos de El Niño severo han afectado a millones y causado cuantiosas pérdidas económicas. Sirva como ejemplo el caso del evento El Niño vivido de mediados de 1997 a mediados de 1998. Los cambios experimentados en el clima durante ese periodo se manifestaron básicamente como alteraciones en el ciclo hidrológico y, consecuentemente, en disponibilidad de agua. En las costas de Perú y Ecuador, al igual que en los países del Cono Sur, se presentaron lluvias torrenciales que en muchos casos resultaron en inundaciones. En gran parte de Mesoamérica y el Caribe, así como en el noreste brasileño y regiones vecinas, se presentaron sequías que causaron un grave descenso en los niveles de agua potable. Condiciones extremas en las lluvias afectaron en gran medida las actividades



Figura 1. Algunos impactos socioeconómicos de El Niño 1997-1998 en Latinoamérica.  
 1. Agricultura y ganadería, 2. Mayor disponibilidad de energía, 3. Hambrunas, 4. Incendios forestales, 5. Pesca, 6. Salud, 7. Muertes, 8. Plagas, 9. Daños en propiedad, 10. Disminución en turismo, 11. Problemas en transporte, 12, Conflictos sociales, 13. Pérdida de vida silvestre, 14. Racionamiento de agua.

dependientes del agua, como son agricultura, ganadería, salud, etc. (figura 1). Asociadas con cambios en el ciclo hidrológico, algunas alteraciones en las condiciones oceánicas se reflejaron en cambios para los ecosistemas marinos.

Diferentes estudios económicos estiman que los costos de El Niño 1997-1998 en Latinoamérica y El Caribe fueron de alrededor de 8,500 millones de dólares. Analizando el caso de cada país, se puede pensar que los costos fueron mucho mayores. Algunas estimaciones para países de Latinoamérica y El Caribe sugieren que los daños, en millones de dólares, fueron: Bolivia, 527; Colombia, 564; Ecuador, 2882; Perú, 3498; Venezuela, 72; Costa Rica, 82; y Argentina, 2500 (CAF 1998).

En México, El Niño se manifiesta generalmente como un aumento en las lluvias invernales, principalmente en Baja California Norte y parte de Sonora. Sin embargo, la señal de El Niño en verano en gran parte México es de una disminución generalizada de las lluvias (Magaña 1999). El déficit en precipitación puede ser tan severo que se traduzca en sequías y problemas por la falta de agua. Tan grave fue la sequía en 1997 y parte de 1998, que la agricultura tuvo enormes pérdidas y se tuvo un récord en incendios forestales. El calor, por falta de nubosidad y mayor radiación solar alcanzando la superficie, fue intenso, provocando que los desiertos en el norte florecieran como en pocas ocasiones.

Los costos del fenómeno El Niño 1997-1998 en México fueron de aproximadamente dos mil millones de dólares, principalmente por afectaciones en la agricultura, en los recursos forestales, por desastres naturales y alteraciones a la pesca (Magaña 1999). No existe una cuantificación de las personas afectadas por este fenómeno, pero pudieron haber sido casi veinte millones. Aunque se sabía del potencial negativo de este fenómeno sobre México, no existieron verdaderos planes de acción para enfrentar las anomalías climáticas, y simplemente se fue respondiendo al desastre conforme este se presentaba. Hoy en día, diversas instituciones de gobierno han establecido esquemas para reducir los costos que pudiera tener otro evento El Niño.

Como se mencionó anteriormente, no se debe pensar que toda la variabilidad del clima en México o en el mundo se debe a sólo al ENOS. Hay regiones del país donde no se tiene una idea clara de qué factores controlan la variabilidad interanual en el clima. Tal es el caso de la región del noroeste durante el verano, donde las lluvias del llamado Monzón Mexicano y su variabilidad interanual requieren de estudios más detallados. La importancia de esta región en la agricultura mexicana llevará a que pronto quede

establecido un buen esquema de pronóstico climático para ayudar en la planeación de actividades agrícolas, incluyendo aquellas de riego.

## ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

El segundo gran problema relacionado con el clima que debe enfrentarse hoy en día es el cambio climático. Quedan pocas dudas de que el clima del planeta está cambiando más allá de lo que considerábamos normal. Más aún, la evidencia apunta a que las actividades humanas son las responsables de tales cambios. En el último siglo, las anomalías en el clima no se reducen a aquellas asociadas con el aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero. La deforestación (cambios en el uso de suelo) ha producido también alteraciones en el clima. En México, la pérdida de bosques por la tala inmoderada parece alterar el ciclo hidrológico.

El elemento climático de mayor importancia en nuestras actividades socioeconómicas es la lluvia, y, consecuentemente, la disponibilidad de agua. Determinar cómo, cuándo y en qué medida cambiará la precipitación, los caudales de ríos o los niveles de presas requiere de un análisis multidisciplinario (ver el capítulo *Vulnerabilidad en el recurso agua de las zonas hidrológicas de México ante el cambio climático*, de V. M. Mendoza, E. E. Villanueva y L. E. Maderey, en esta sección). En todo caso, la generación de escenarios climáticos es el punto de partida. Si tales escenarios indicaran disminución o aumento marcado en las lluvias, se puede proponer cómo cambiará la disponibilidad de agua y, por tanto, se pueden sugerir mejores políticas de manejo de agua. Son varias las estrategias para generar escenarios nacionales de cambio climático, de utilidad en la planeación a largo plazo. Éstas incluyen el análisis de las tendencias del clima en las últimas décadas, el uso de modelos numéricos de la circulación de la atmósfera para simulaciones del clima futuro (Magaña *et al.* 1997), o simplemente la imposición de aumentos o decrementos en los valores medios de temperatura y lluvia, o una combinación de los anteriores, respecto a los valores actuales, para determinar cómo cambian otras variables. Es sin duda la precipitación la variable más difícil de pronosticar. Así, aunque es casi seguro que las temperaturas en el país aumentarán, no se puede decir lo mismo de la precipitación y, consecuentemente, de la disponibilidad de agua.

Un ejemplo de las tendencias de la lluvia en las últimas décadas muestra que en la mayor parte de México existe una tendencia a mayor precipitación, principalmente en los estados del norte (figura 2). Por el contrario, en

los estados donde las lluvias dependen de lo que ocurre en el Pacífico mexicano (huracanes, actividad de la Zona Inter Tropical de Convergencia [ZITC]) parece haber una tendencia a menores precipitaciones. Si se extrapola el análisis del periodo 1950-2000 a los próximos veinte o cincuenta años, se tiene un escenario de cambio climático, al menos en lo referente a la lluvia.

De la generación de escenarios a futuro a partir de las tendencias de la lluvia a escala regional (figura 2), uno puede preguntarse por qué se habla constantemente de sequía en el norte del país, o por qué tiende a llover menos en los estados del sur de México. Respondiendo a la primera pregunta, mayor cantidad de lluvia significa en principio mayor disponibilidad de agua. Sin embargo, el crecimiento demográfico y agro-industrial en el norte de México ha aumentado la demanda mucho más que la disponibilidad. Lo anterior significa que aun con tendencias positivas de la lluvia se deben buscar fuentes alternativas de agua (re-uso, desalinización) para enfrentar las futuras demandas del vital líquido. Aun más, los modelos numéricos, con gran incertidumbre en cuanto a generación de escenarios de lluvia para México y otras regiones de clima monzónico, sugieren que aun cuando aumenten las lluvias, la humedad en el suelo podría disminuir como

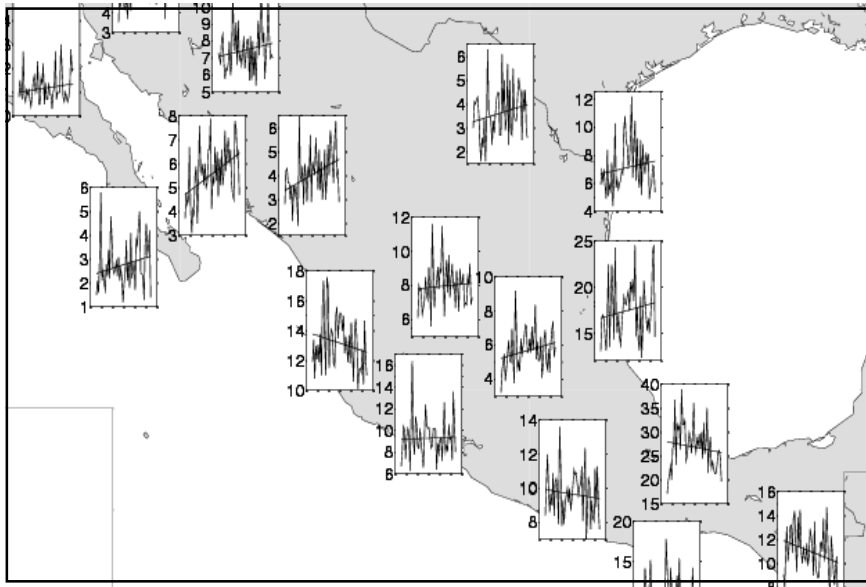


Figura 2. Tendencia de la precipitación por regiones para el periodo 1945-1995. Medias anuales (mm/100) de precipitación regional. Fuente: Englehart y Douglas, 2001.

consecuencia de mayor temperatura y evaporación. La falta de datos por periodos largos sobre la humedad en el suelo, imposibilita por el momento analizar cuáles son las tendencias actuales en esta variable.

La segunda pregunta resulta de gran interés científico. No existe una real estadística sobre la actividad de la ZITC que nos permita definir si hoy en día es más o menos activa. Sabemos al menos que en veranos El Niño, la ZITC permanece cercana del ecuador, más alejada de México, y por tanto produce menos lluvias en el país. Por ello, el aumento en la frecuencia e intensidad de El Niño en las últimas dos décadas podría estar produciendo una disminución de las lluvias en la parte sur de México. Una segunda opción está relacionada con los huracanes del Pacífico. Aunque no ha sido probado, los huracanes en esta región parecen actuar como inhibidores de lluvia en el sur de México, al hacer converger la humedad sobre regiones oceánicas y no continentales. Las estadísticas muestran que en esta parte del mundo el número de huracanes intensos ha aumentado en los últimos treinta o cuarenta años. Tal incremento en la intensidad de estos meteoros podría estar relacionado con la tendencia negativa de la lluvia en la parte sur de México.

Para generar escenarios físicamente consistentes entre la circulación de la atmósfera del planeta y el clima observado de México, es necesario considerar el funcionamiento actual del sistema climático y los mecanismos mediante los cuales sus variaciones se manifiestan en regiones de México. Tal y como sucede en años El Niño, el análisis de formas de variabilidad interanual en el clima global puede llevarnos a establecer la vulnerabilidad de México ante extremos climáticos. Se debe de ahí analizar los factores que en la actualidad determinan parte de nuestro clima y las consecuencias que sobre ellos tendría un calentamiento de la atmósfera. Por ejemplo, considérese la región del noreste de México (Tamaulipas), en donde la agricultura o la ganadería son actividades demandantes de gran cantidad de agua. Según el modelo del Centro Europeo, en una simulación de cambio climático con incrementos graduales de concentración de gases de efecto invernadero, la temperatura de superficie aumentará sustancialmente en los próximos veinte años, principalmente durante los meses de invierno, cuando la temperatura podría aumentar hasta casi 6°C (figura 3a). Los meses de verano por otro lado, podrían no variar en cuanto a temperatura de superficie. Por otro lado, la precipitación podría aumentar en los meses de verano en el noreste de México en las próximas dos décadas (figura 3b), de acuerdo con el modelo antes referido, que por cierto es capaz de reproducir la canícula (Ma-



gaña *et al.* 1999). Tal resultado es consistente con lo propuesto al generar un escenario mediante un simple análisis de extrapolación de los últimos registros de precipitación. No se piense, sin embargo, que tal concordancia de resultados se obtiene para todas las regiones del país. En varias de las regiones del país, el modelo tiene dificultades en reproducir el ciclo anual de la temperatura y la precipitación. Es allí donde más incertidumbre se tiene al generar un escenario de cambio climático. Aún más, el efecto combinado de mayor temperatura y precipitación podría llevar a mayor evaporación y déficit de humedad en el suelo en Tamaulipas.

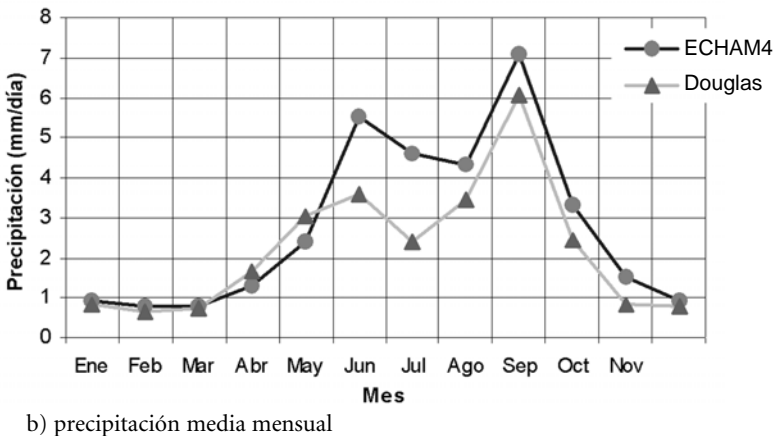
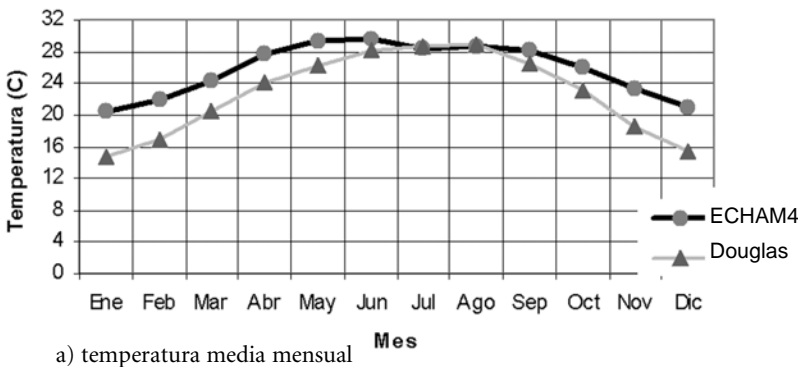


Figura 3. Comparación entre valores climatológicos observados para el periodo 1961-1990 (triángulos) y las simulaciones por el modelo ECHAM4 del Centro Europeo para la década del 2020 (círculos) para el noreste de México.

El problema no es sencillo, pues tanto los huracanes como la actividad de la ZITC, o la evaporación en el sentido climático, constituyen retos científicos. Cuando se les analiza desde el punto de vista del cambio climático el reto es mayor. El estudio combinado de registros históricos, diagnósticos físicos y modelos numéricos aclarará sin duda varias de las interrogantes antes planteadas.

## LAS CONSECUENCIAS DE CONDICIONES EXTREMAS EN EL CLIMA

Aunque no existe una detallada evaluación regional de la vulnerabilidad de México a condiciones extremas en el clima, se sabe que las fluctuaciones en la lluvia tienen altos costos. La falta o exceso de precipitaciones generalmente lleva a severas sequías o inundaciones que, por no existir una política de manejo de agua basada en pronósticos o escenarios del clima, se traducen con frecuencia en «desastres naturales». Las experiencias de los eventos de El Niño y La Niña, ponen de manifiesto que los extremos climáticos en México cuestan mucho. Algunos escenarios de cambio climático sugieren un aumento en la frecuencia e intensidad de El Niño (Trenberth 1997). De ser esto cierto, se está ante un panorama preocupante por la falta de un esquema interinstitucional e intersectorial claro para atenuar los efectos negativos del ciclo ENOS, principalmente aquellos en el ciclo hidrológico.

Para realmente llegar a resultados de aplicación en la planeación de actividades relacionadas con las variaciones y cambios en el clima regional es necesario que los pronósticos o escenarios climáticos queden descritos en términos de variables de relevancia por sector. Así, el sector de administración del agua requerirá que los escenarios sean elaborados en términos de caudales, demanda y niveles de las presas, mientras que el sector agrícola lo requiere en términos de humedad en el suelo. El manejo de esta información debe considerar los alcances y limitaciones de la información generada. No se trata de pronósticos determinísticos, sino de informaciones probabilísticas para planeación en el mediano y largo plazos. La información del clima a futuro tiene gran valor cuando se sabe interpretar y aprovechar adecuadamente. En algunos países no es exagerado hablar de millones de dólares en ahorro a partir del uso adecuado de dicha información.

Los sectores mexicanos afectados por condiciones extremas en el clima son varios, pero todos tienen como común denominador los cambios en las lluvias y la humedad en el suelo (agricultura, bosques, etc.). Por tratarse de

un país semiárido en su mayor parte, el manejo del agua se vuelve un tema de seguridad nacional, tal y como se plantea en los programas de gobierno actuales. Valdrá la pena instrumentar planes de prevención ante el anuncio de un futuro evento El Niño, o de medidas de adaptación ante escenarios dados de cambio climático. La inversión requerida en prevención siempre será mucho menor a los costos que los desastres por condiciones extremas en el clima puedan tener.

## BIBLIOGRAFÍA

- Corporación Andina de Fomento (CAF).1998. *Evaluación de los daños originados por el fenómeno El Niño de 1997-1998 en la región andina*. Reporte RJ/CAF/98/1.
- Englehart, P.J. y A. V. Douglas. 2001. The role of Eastern North Pacific tropical storms in the rainfall climatology of western Mexico. *Int. J. Climatol* 21: 1357-1370.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez y C. Gay. 1997. Assesment of current and regional climate scenarios for Mexico. *Climate Research* 9: 107-114.
- Magaña, V., J. A. Amador y S. Medina. 1999. The mid-summer drought over Mexico and Central America. *J. Climate* 12: 1577-1588.
- Magaña, V. 1999. *Los Impactos de El Niño en México*. México: Secretaría de Gobernación.
- Trenberth, K. 1997. What is happening to El Niño. Pp. 88-99. In: *1997 Yearbook of Science and the Future*. Chicago: Encyclopedia Britannica.

## Notas

---

\* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

\*\* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.



# Vulnerabilidad en el recurso agua de las zonas hidrológicas de México ante el Cambio Climático Global

*Víctor M. Mendoza,\* Elba E. Villanueva\*  
y Laura E. Maderey\*\**

## INTRODUCCIÓN

COMO RESULTADO DE la participación de investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y del Instituto de Geografía (IG) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el área de Vulnerabilidad en los Recursos Hídricos del proyecto “Estudio de País, México: México ante el cambio climático”, cuyos resultados fueron publicados en la Primera Comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INE 1997), en el CCA se desarrolló un modelo de balance térmico-hidrológico (MBTH) para poder dar algunas conclusiones importantes sobre la vulnerabilidad en las zonas hidrológicas de México ante un cambio climático, pronosticado para el año 2050 o 2075 por tres modelos; dos de ellos de circulación general, cuyos resultados fueron analizados y preparados por Conde *et al.* (1994 y 1995): el GFDLR30, del Laboratorio de Dinámica de Fluidos de Princeton (Manabe y Stouffer 1980), y el de segunda generación CCCM, del Centro Climático Canadiense (Boer *et al.* 1992); el tercer modelo es el modelo termodinámico del clima (MTC), del CCA (Garduño y Adem 1992). Los cambios climáticos en temperatura y precipitación generados por estos tres modelos, fueron usados en el MBTH, cuyos resultados sugieren que cambios plausibles en la temperatura del aire superficial y la precipitación, causados por la duplicación del CO<sub>2</sub> atmosférico, pueden tener un impacto dramático en el régimen y la magnitud de la escorrentía, la humedad del suelo y la evaporación, así como en el grado de aridez de algunas zonas hidrológicas del país; sin embargo, en otras el cambio climático puede ser favorable.

## ESCORRENTÍA POR HABITANTE

Se dividió al país en doce zonas hidrológicas de características semejantes (figura 1), considerando las 37 regiones hidrológicas del país (Atlas del Agua, 1976). En las zonas sur y centro del país (zonas I a VII) se localiza aproximadamente 77.4% de la población y se da 88.8% de la escorrentía anual, lo que a primera vista parece ser una proporción adecuada entre población y escorrentía; sin embargo, mientras que las zonas I, II, III, y VII tienen una escorrentía mayor a 10 millones de litros cúbicos por habitante (cuadro 1), las zonas V y VI, que corresponden a las cuencas del Pánuco y del Lerma-Chapala-Santiago (LeChSa), tienen solamente 0.93 y 0.66 millones de metros cúbicos por habitante, respectivamente; ello se debe a que tan sólo en estas dos zonas vive 41.9% de la población total del país.

Hemos calculado los incrementos de la población al año 2050 para cada zona hidrológica y para todo el país (cuadro 1), usando las proyecciones

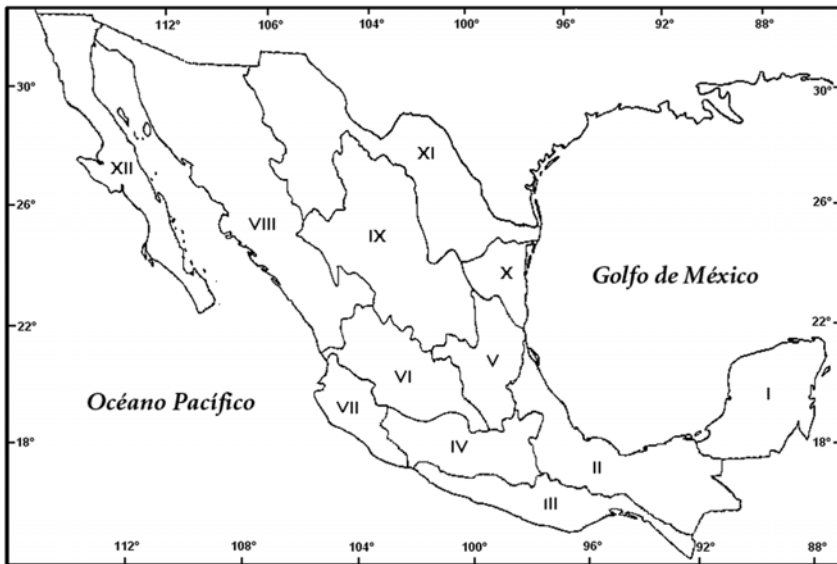


Figura 1. Zonas hidrológicas de México (i) Planicie de Campeche-Yucatán-Quintana Roo, (ii) Vertiente Sur del Golfo de México, (iii) Vertiente del Pacífico Sur, (iv) Cuenca del Río Balsas, (v) Cuenca del Río Pánuco, (vi) Cuenca del Río Lerma-Chapala-Santiago, (vii) Vertiente del Pacífico Central, (viii) Vertiente del Pacífico Norte, (ix) Cuenca interior Mapimi-Aguanaval-El Salado, (x) Cuencas Interiores del Norte, (xi) Cuenca del Río Bravo, y (xii) Región de la Península de Baja California.

logísticas de población del año 1995 al año 2050 para la República Mexicana proporcionadas por el grupo de Asentamientos Humanos del Estudio de País (Aguilar 1995). Estos incrementos van de 66.6% (zona VII) a 72.6% (zona X). En el escenario de clima futuro GFDLR30, la población en la mayor parte de la República Mexicana se ve beneficiada por un incremento sustancial en la escorrentía por habitante; sin embargo, la zona más poblada (cuenca del Pánuco), de la cual se proyecta un incremento de la población de 67.8%, sufre una reducción en su escorrentía por habitante de 2.2%. Las reducciones en la escorrentía por habitante en los escenarios CCCM y MTC son francamente dramáticas, lo cual se debe por supuesto al incremento en la población y al decremento en la escorrentía anual.

CUADRO 1. NÚMERO DE HABITANTES PARA 1995 EN CADA ZONA HIDROLÓGICA Y EN EL PAÍS, Y SU INCREMENTO AL AÑO 2050 AMBOS ESTIMADOS USANDO LAS PROYECCIONES LOGÍSTICAS DE POBLACIÓN DEL AÑO 1995 AL AÑO 2050 PARA LA REPÚBLICA MEXICANA, PROPORCIONADAS POR EL GRUPO DE ASENTAMIENTOS HUMANOS DE ESTUDIO DE PAÍS (AGUILAR, 1995); ASÍ COMO LA ESCORRENTÍA ANUAL EN EL ESCENARIO BASE, EN MILLONES DE METROS CÚBICOS Y EN MILLONES DE LITROS POR HABITANTE Y SU INCREMENTO EN EL CLIMA FUTURO, SEGÚN LOS ESCENARIOS GFDLR30, CCCM Y MTC

ZONAS	1995 NÚM. DE HABITANTES	2050 INCREMENTO (%) EN EL NÚM. DE HABITANTES	ESCORRENTÍA ANUAL. ESCENARIO BASE		INCREMENTO (%) EN LA ESCORRENTÍA ANUAL POR HABITANTE		
			MILLONES DE METROS CÚBICOS	MILLONES DE LITROS POR HABITANTE	GFDLR30	CCCM	MTC
I	2 610 261	69.0	29 846.6	11.43	-27.0	-15.9	-35.2
II	13 646 626	67.8	1 87 014.2	13.70	-7.3	-41.0	.39.7
III	4 845 010	67.7	65 723.2	13.56	-0.1	-47.1	-37.9
IV	9 287 032	68.1	29 005.2	3.12	30.8	-65.7	-54.3
V	22 622 258	67.8	21 067.7	0.93	-2.2	-49.6	-46.8
VI	15 771 469	67.9	10 389.2	0.66	52.4	-56.0	-60.1
VII	20 69 891	66.6	20 991.1	10.14	7.58	-34.8	-54.4
VIII	57 79 209	67.9	34 459.7	5.96	51.3	-32.6	-80.2
IX	37 73 429	68.1	3 003.0	0.79	107.1	-50.1	-69.6
X	6 86 911	72.6	2 112.1	3.07	32.2	-57.8	-36.4
XI	8 114 705	68.3	6 121.7	0.75	31.3	-30.1	-54.4
XII	2 326 338	68.9	287.3	0.12	55.1	0.0	-72.4
País	91 533 139	67.9	410 021.0	4.48	4.4	-41.6	-45.6

## VULNERABILIDAD

Para cuantificar la vulnerabilidad de las zonas hidrológicas y del país, en el “Estudio de País: México” usamos índices de vulnerabilidad, definidos de acuerdo con criterios establecidos para este tipo de estudios. Dichos índices nos han dado información de las zonas hidrológicas que ya presentan vulnerabilidad en el clima actual y de otras que pueden ser vulnerables a futuros cambios climáticos (Mendoza *et al.* 1997). En este trabajo mostramos algunos de los resultados más importantes del estudio.

### Vulnerabilidad en el agua disponible y de reserva

Hemos hecho una estimación del volumen de agua que puede ser retirado de una zona húmeda sin que se transforme en una zona seca, cantidad llamada volumen disponible. Definimos el índice de agua disponible como la razón del volumen disponible a la reserva de agua ( $Q_{reserva}$ ); esta última cantidad se calcula como la diferencia entre la escorrentía anual y el volumen disponible. De esta manera, el índice de agua disponible se expresa como:

$$I_W (\%) = (V_D / Q_{reserva}) \times 100$$

Zonas húmedas o zonas no declaradas como secas en el clima actual que llegan a tener un índice  $I_W$  menor que 100% en un escenario de cambio climático han sido consideradas como vulnerables. Las zonas secas tienen un índice  $I_W$  igual a cero. En un nuevo escenario climático, estas zonas podrían recibir menor precipitación y llegar a convertirse en desiertos; en caso contrario, una mayor precipitación las llevaría a un índice  $I_W$  cercano a 100% y a convertirse, de esta manera, en zonas vulnerables en su reserva de agua con el nuevo clima.

En el clima actual sólo tres cuencas presentan vulnerabilidad en su reserva de agua (figura 2A): la cuenca del LeChSa (vi) presenta una vulnerabilidad alta con riesgo de secarse, y la cuenca del Panuco y la zona x presentan vulnerabilidad baja. En el escenario GFDLR30 (figura 2B), que pronostica en la mayor parte de la República Mexicana un clima con más lluvia que el actual, la cuenca del LeChSa es la única zona que persiste con vulnerabilidad en su reserva de agua, pero ahora es moderada. En los escenarios CCCM y MTC (figuras 2C y 2D), los cuales pronostican un clima con menos precipitación



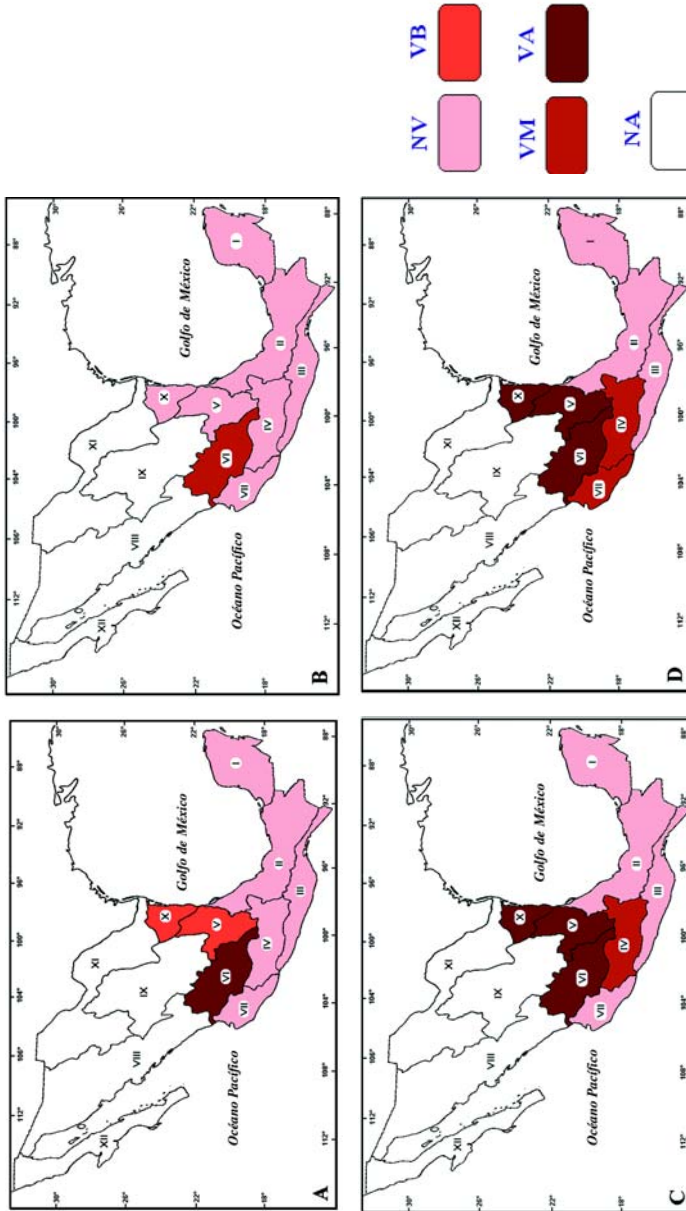


Figura 2. Vulnerabilidad en la reserva de agua de las zonas hidrológicas en los escenarios base (a), GFDL30 (b), CCCM (c) y MTC (d). NV indica no vulnerable ( $0 \leq I_{vr} < 50\%$ ); VB, vulnerabilidad baja ( $50\% \leq I_{vr} < 75\%$ ); VM, vulnerabilidad moderada ( $75\% \leq I_{vr} < 100\%$ ); VA, vulnerabilidad alta ( $I_{vr} \geq 100\%$ ), y NA, no se aplica por tratarse de zonas secas.

que el actual, la vulnerabilidad se ha extendido hacia el sur del país; en el escenario MTC, tres zonas presentan vulnerabilidad alta y riesgo de secarse. El incremento en la temperatura del suelo y del aire y, por consecuencia, de la evaporación, así como el decremento en precipitación, son las causas de que el volumen disponible de agua en las zonas V, VI y X se haya reducido prácticamente a cero. ¿Pero realmente se producirá un clima con menos precipitación como lo pronostican los modelos CCCM y MTC? En un reporte reciente del IPCC (2001) se muestran dos escenarios construidos con dos versiones del modelo de circulación general atmósfera-océano del Centro Hadley (AOGCM); en dichos escenarios se observa una *reducción* importante en la escorrentía anual en las zonas centro y sur del país, de 25 a 150 mm/año; el norte del país muestra condiciones más o menos de clima actual.

### Vulnerabilidad en el consumo de agua

A partir del más completo plan nacional del agua realizado para México (Atlas del Agua 1976), hemos estimado los porcentajes del consumo del agua urbano, industrial, de generación de energía eléctrica y de riego, respecto a la escorrentía anual observada para las 12 zonas hidrológicas y para el país. Utilizando las proyecciones logísticas de población al año 2050 del grupo de Asentamientos Humanos y un ajuste de regresión polinomial de segundo grado para extrapolar estos porcentajes hasta el año 2050, hemos determinado el índice de consumo total de agua,  $I_T$ , para cada zona en el escenario de clima actual (BASE) y en los escenarios de clima futuro GFDLR30, CCCM y MTC.

El volumen de agua destinado a usos domésticos, municipales e industriales, uso industrial específico y generación de energía eléctrica (volúmenes que no se recuperan) más el volumen de agua destinado al riego, constituye el consumo total de agua ( $U_T$ ). Según Szestay (1970), el consumo total de agua es considerado como un factor decisivo para el desarrollo social y económico en zonas en donde es mayor a 20% de la escorrentía anual,  $Q$ . Por lo tanto, hemos considerado que la zona hidrológica se vuelve vulnerable al consumo total de agua para valores del índice mayores a 20%:

En el escenario Base, la vulnerabilidad en el consumo total de agua se presenta alta en las zonas XI y XII del norte del país (figura 3A); en el escenario GFDLR30 (figura 3B), de mayor precipitación y escorrentía, la cuenca del Pánuco, con la mayor población del país (cuadro 1) se agrega a las zonas con alta vulnerabilidad. En los escenarios CCCM y MTC (figuras 3C y 3D) la vulnerabilidad se incrementa y se extiende hacia el sur del país; la mayor parte del territorio mexicano muestra una alta vulnerabilidad y únicamente las zonas I, II, y III permanecen sin vulnerabilidad.

### Vulnerabilidad en el almacenamiento de agua

Hemos sumado el almacenamiento de presas cuya capacidad supera los 4 millones de  $m^3$  de nivel de almacenamiento máximo operativo (NAMO) y el de grandes cuerpos de agua contenidos en cada una de las 12 zonas. Se define el índice de almacenamiento anual de agua como la razón de almacenamiento anual ( $A$ ) a escorrentía anual; es decir:

$$I_A = (A/Q) \times 100$$

De acuerdo con Matalas y Fiering (1977), hemos usado como valor indicativo de vulnerabilidad 60%; zonas con un valor menor a 60% son particularmente vulnerables a eventos prolongados de sequías o a periodos de lluvias intensas muy por arriba del valor climatológico.

El mayor problema de almacenamiento de agua en el clima actual se presenta en las zonas del sur del país (figura 4A) debido a la mayor cantidad de precipitación en esas zonas. De acuerdo con la escorrentía anual, las zonas del norte cuentan con suficiente capacidad de almacenamiento de agua. Para los escenarios de clima futuro hemos supuesto que el país mantiene la misma capacidad de almacenamiento; de esta manera debido al incremento en la escorrentía en el escenario GFDLR30, la vulnerabilidad se incrementa sensiblemente en casi todo el país (figura 4B); en este escenario, la zona II se agrega a las zonas de alta vulnerabilidad. En los escenarios GFDLR30 y MTC (figuras 4C y 4D) ocurre lo contrario; es decir la vulnerabilidad se reduce.

Según nuestras estimaciones, el déficit de almacenamiento de agua en el país es de 101,044.6 millones de  $m^3$  en el clima actual, lo que representa 24.6% de la escorrentía anual (410,021.0 millones de  $m^3$ ); en los escenarios

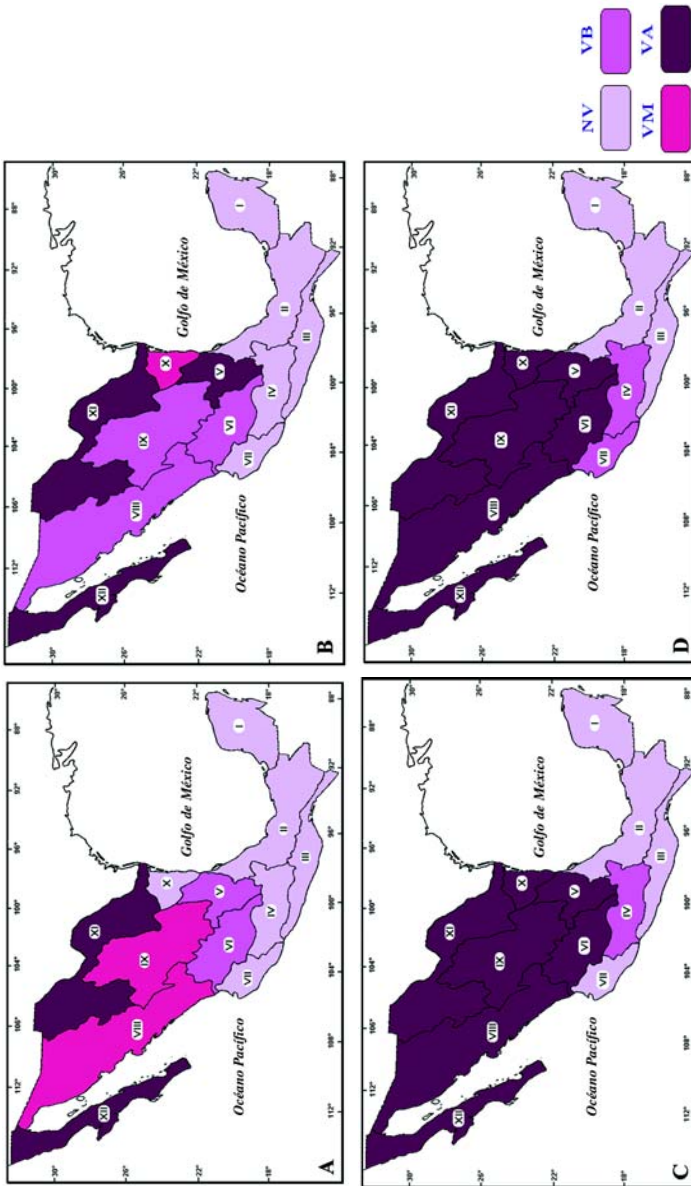


Figura 3. Vulnerabilidad en el consumo total de agua de las zonas hidrológicas en los escenarios base (a), GFDLR30 (b), CCCM (c) y MTC (d). NV indica no vulnerable ( $I_r < 20\%$ ); VB, vulnerabilidad baja ( $20\% \leq I_r < 50\%$ ); VM, vulnerabilidad moderada ( $50\% \leq I_r < 75\%$ ), y VA, vulnerabilidad alta ( $I_r \geq 75\%$ ).

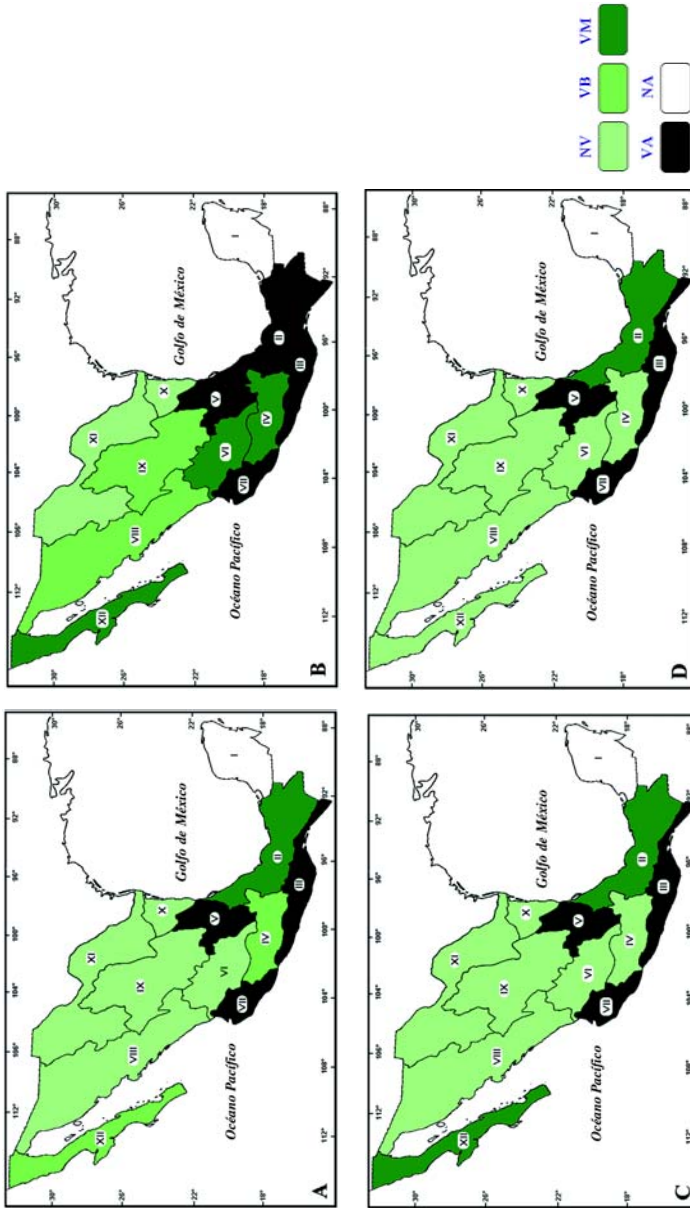


Figura 4. Vulnerabilidad en el almacenamiento de agua de las zonas hidrológicas en los escenarios base (a), GFDLR30 (b), CCCM (c) y MTC (d). NV indica no vulnerable ( $60\% < I_A$ ); VB, vulnerabilidad baja ( $60\% \leq I_A < 40\%$ ); VM, vulnerabilidad moderada ( $20\% \leq I_A \leq 40\%$ ); VA, vulnerabilidad alta ( $0 \leq I_{sp} < 20\%$ ), y NA, no se aplica por tratarse de suelo plano.

GFDLR30, CCCM y MTC es de 232,878.0, 66,507.7 y 52,102.3 millones de m<sup>3</sup>, respectivamente.

## CONCLUSIONES

Las cuencas del Pánuco (v) y del LeChSa (vi) tienen la densidad de población (236.4 y 120.9 habitantes/km<sup>2</sup>) y el número de habitantes más altos del país, ello representa un problema social y económico en la distribución del agua para el uso y consumo de sus habitantes, el cual puede agravarse en un posible cambio climático futuro, aun en el caso en que nuestro país se vea beneficiado con un incremento importante en la precipitación (escenario GFDLR30). Nuestros resultados sugieren que una posible solución, que puede resultar muy costosa, es trasladar a las zonas secas y semi-húmedas el agua de las Vertientes sur del Golfo y del Pacífico (zonas II y III), las cuales prevalecen con suficiente agua aun en el escenario más seco (MTC).

Debemos de tomar en cuenta el hecho de que el clima actual o futuro tiene una cierta variabilidad, y que un clima más cálido y seco como lo pronostican los modelos CCCM y MTC, puede estarnos indicando en promedio un mayor número de eventos de temperaturas altas y poca lluvia asociados con sequías intensas; pero que, sin embargo, eventualmente pueden presentarse eventos de abundante lluvia, lo que requeriría almacenar el agua eficientemente para su aprovechamiento posterior. Por su parte, un clima más cálido y húmedo, como el que pronostica el modelo GFDLR30, puede indicarnos en promedio un mayor número de eventos de abundante lluvia, en los cuales también se requiere almacenar el agua y la construcción de grandes avenidas de agua y sistemas de drenaje eficientes en las ciudades de nuestro país.

La conservación del recurso agua no sólo se refiere a cuidar la cantidad que se consume, ni a evitar en lo posible su contaminación, como ha ocurrido con la cuenca del Pánuco, sino también a que las personas tomen conciencia sobre el origen y el comportamiento físico de este recurso, para lo cual es esencial comprender que se habita dentro de una cuenca hidrológica, unidad física de cuyo buen manejo depende tanto la supervivencia como la calidad de sus habitantes.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, A. G. 1995. El cambio climático global y la vulnerabilidad de asentamientos humanos en México ante el cambio climático. En: *Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. México ante el cambio climático*. Pp. 203-211, INE, U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM, 18 al 22 de abril de 1994, Cuernavaca, Morelos, México.
- Boer, G. J., N. A. Farlane y M. Lazare. 1992. Grengouse gas induced climate change simulated with the Canadian Climate Center second generation general circulation model. *J. Clim.* 5: 1045-1077.
- Conde, C., O. Sanches y C. Gay. 1994. Escenarios básicos y regionales. Estudio de País: México, México ante el cambio climático. En *Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. México ante el cambio climático*. Pp. 39-44, INE, U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM, 18 al 22 de abril de 1994, Cuernavaca, Morelos, México.
- , O. Sanches, V. Magaña y C. Gay. 1995. Escenarios climáticos básicos y regionales. México ante el cambio climático. En *Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. México Ante el Cambio Climático*. Pp. 101-111, INE, U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM, 8 a 11 mayo, 1995, Cuernavaca, Morelos, México.
- Garduño, R. y J. Adem. 1992. Calentamiento global calculado con el modelo termodinámico. *Ciencias* 43 (Número especial): 11-14.
- Gay, C. (comp.). 2000. *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*. México: INE, SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program.
- INE- SEMARNAP (Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca). 1997. *Primera Comunicación Nacional Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: INE-SEMARNAP.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Summary for Policymakers, Climate Change: Impacts, Adaptations and Vulnerability*. Working Group II. IPCC.
- Manabe, S. y R.J. Stouffer. 1980. Sensitivity of global climate model to an increase of CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 85:5529-5554.
- Matalas, N. C. y M.B. Fiering. 1977. Water resource systems planning. Pp. 99-110. In: J. Wallis (ed.) *Climate, climate change, and water supply*. Washington, D.C.: National Academic of Sciences.

- Mendoza, V. M., E. E. Villanueva y J. Adem. 1997. Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate Research* 9: 139-145.
- SRH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1976. *Atlas del Agua de la República Mexicana*. México: Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- Szesztay, K. 1970. The hydrosphere and the human environment: results of research on representative and experimental basins. Proceedings of the Wellington Symposium. UNESCO *Studies and reports in hydrology*. No. 12. París: UNESCO Publications.

## Notas

---

\* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

\*\* Instituto de Geografía, UNAM.



# Impactos del cambio climático en la agricultura en México

*Cecilia Conde, Rosa Ma. Ferrer, Carlos Gay y Raquel Araujo\**

## INTRODUCCIÓN

EL PANEL INTERGUBERNAMENTAL SOBRE el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) concluyó en el 2001 el Tercer Reporte de Evaluación (TAR, por sus siglas en inglés). Las conclusiones de los estudios quedaron integradas en tres grandes volúmenes a partir de los cuales se construyeron resúmenes para tomadores de decisiones y reportes técnicos (<http://www.ipcc.ch>).

Entre las conclusiones más importantes (IPCC 2001a) pueden mencionarse las siguientes: el conjunto de observaciones recabadas hasta ahora apunta a que hay un calentamiento global y cambios en el sistema climático. Hay evidencias cada vez más sólidas de que la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años es atribuible a la acción humana. En el futuro, las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles por actividades humanas continuarán alterando la atmósfera de tal forma que se espera que el clima se verá afectado durante este siglo. Por otra parte, ha aumentado la confianza en la habilidad de los modelos para proyectar el clima futuro. Dichos modelos señalan importantes aumentos en la temperatura media global y en el nivel del mar, en cualquiera de los escenarios socioeconómicos planteados por consenso en el IPCC. Finalmente, se espera que el cambio climático de origen antropogénico persista por varias centurias.

Uno de los grandes retos dentro de las investigaciones actuales es el de realizar a escala regional estudios de *vulnerabilidad* que permitan diseñar estrategias de *adaptación* (v&a) de los sistemas humanos sobre los que descansa la productividad y bienestar de nuestras sociedades. De hecho, el impulso a los estudios de v&a es la tarea que se han propuesto impulsar du-

rante los próximos años los países comprometidos en la Conferencia de las Partes: ligar las llamadas Comunicaciones Nacionales a los resultados que desarrollen en este campo. De particular interés son las investigaciones que se realizarán en los países en desarrollo, seguramente los más vulnerables a las condiciones de cambio climático. En general, para estos países se espera una reducción importante en los rendimientos de sus cultivos, un decremento significativo en su disponibilidad de agua, un aumento en el número de personas expuestas a enfermedades como el paludismo y el cólera, así como un aumento en el riesgo de inundaciones, producto de lluvias torrenciales y en el aumento del nivel del mar (IPCC 2001b).

En una primera etapa, los estudios de v&a se centraron en el análisis de los posibles impactos del cambio climático, identificando con ello las regiones y sectores más vulnerables. Lo anterior abrió la discusión de las posibles opciones de adaptación al cambio climático dadas las capacidades disponibles. Se espera que en una segunda etapa los estudios de v&a se enfoquen al diseño de medidas de adaptación, planteen explícitamente las medidas para incrementar la capacidad adaptativa de las regiones y sectores más vulnerables, y que este proceso finalmente influya en el diseño de políticas nacionales o regionales de desarrollo.

Entre los planteamientos más interesantes del TAR relacionados con los estudios de la v&a está el considerar que se debe prestar mucha más atención a los procesos de vulnerabilidad y adaptación a las variaciones naturales del clima actual, como punto de partida de los nuevos estudios. Así, se considera fundamental analizar en detalle las medidas que los sistemas humanos han adoptado o podrían adoptar ante la variabilidad climática estacional o interanual (como el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur, ENOS) y durante eventos climáticos extremos. Teniendo entonces una primera evaluación de las capacidades de adaptación ante esos eventos, se espera construir, probar y aplicar aquellas medidas que aumenten la capacidad adaptativa y también lograr disminuir aquellas prácticas que incrementan la vulnerabilidad (mal adaptaciones) ante eventos climáticos adversos.

Presentamos entonces aquí los resultados que consideramos más importantes relacionados con la agricultura en México, dadas las perspectivas de investigación esbozadas anteriormente. Estos resultados se obtuvieron durante el Estudio de País: México (INE 1996; Gay *et al.* 2001), y durante el proyecto "Utilización de pronósticos climáticos para actividades agrícolas en el estado de Tlaxcala", que consideramos una segunda fase del Estudio de País y en el que analizamos con detalle el impacto del ENOS en la agricultura de

maíz de temporal en algunos municipios de ese estado (Conde *et al.* 2000). Finalmente, y aplicando la metodología aprendida en esos dos estudios, delineamos los objetivos que perseguimos en el proyecto “Evaluación integrada de la vulnerabilidad social y la adaptación a la variabilidad y al cambio climáticos entre los productores agrícolas en México y Argentina” (Gay *et al.* 2001), con el que esperamos intercambiar y comparar métodos y experiencias que permitan fortalecer las estrategias de adaptación en ambos países.

## CAMBIO Y VARIABILIDAD CLIMÁTICOS Y LAS ACTIVIDADES AGRÍCOLAS

Los estudios actuales de v&a relacionados con la agricultura parten necesariamente de considerar que esta actividad es extremadamente vulnerable en los países en desarrollo, ya que se encuentra doblemente expuesta (O’Brien y Leichenko 2000): es vulnerable a los fuertes cambios socioeconómicos que se dan dentro del proceso de globalización económica, y es además altamente sensible a las variaciones climáticas, como se observó durante los grandes eventos climáticos que acontecieron en la década de los noventa, particularmente durante el fuerte evento de El Niño de 1997-1998 (ver el capítulo *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad climática y del cambio climático en México*, de V. Magaña *et al.*, en esta sección). Recientemente, durante el segundo semestre del 2001, la región centroamericana sufrió uno de los ejemplos más dramáticos de esta “doble exposición”: además de la severa sequía que se presentó en vastas regiones de Guatemala, Honduras, El Salvador y Nicaragua (Petrich 2001), en el ámbito internacional hubo una caída drástica en los precios del café, que es uno de los cultivos en los que descansa en buena medida la economía de esas regiones.

Si bien para Latinoamérica se postulan grandes variaciones en los rangos posibles de temperatura y precipitación en condiciones de cambio climático, existe una alta confianza en que son las condiciones de ENOS las mayormente responsables de la variabilidad climática en la región (IPCC 2001b). Por tanto, variaciones en el clima que implicaran un aumento en el número o la intensidad de este evento constituirían un escenario de cambio climático bastante adverso a las actividades productivas de la región. Durante el Estudio de País, los escenarios regionales construidos a partir de técnicas estadísticas (Magaña *et al.* 1997) mostraron claramente estas condiciones para varios modelos de circulación general (GCMs).

Aunque el TAR no fue concluyente en cuanto a estos aspectos del ENOS, si establece la probabilidad de que se alargue la duración del mismo (entre 12 a 18 meses). En ese caso, podían presentarse para México dos veranos con sequía, o dos inviernos con bajas temperaturas y lluvias torrenciales. Además, algunos estudios relacionan a El Niño con la mayor presencia de huracanes en el Pacífico; estos meteoros han sido la fuente de grandes desastres en Latinoamérica, particularmente en Centroamérica y México, ya que las inundaciones y deslizamientos de tierra provocan grandes pérdidas de vidas humanas y de infraestructura que pueden retrasar el desarrollo regional aun por décadas.

## ESTUDIOS PARA MÉXICO

El estudio del impacto posible del cambio climático en la agricultura en México se centró en el análisis de la vulnerabilidad de la producción de maíz de temporal, particularmente en el ciclo primavera-verano. Si bien las variables macroeconómicas del país no indican una contribución importante de este grano en el producto interno bruto, indudablemente de su producción dependen millones de campesinos a todo lo largo y ancho del país. El maíz se cultiva a nivel del mar y a más de 2,000 metros de altura, y ha sido el sustento básico de muchas generaciones en el sector rural.

Así, la producción de maíz en México depende fuertemente del clima y se desarrolla prácticamente en todo el territorio nacional. Los bajos rendimientos y la gran superficie siniestrada que se presentan año con año, son indicativos de que este cultivo no se desarrolla ni exclusiva ni fundamentalmente para su comercialización a gran escala (figura 1a); además, se cultiva en áreas en donde no existe aptitud para ello, tanto en el ámbito climatológico como en el de suelos y pendientes, lo que en parte explica las altas pérdidas en las cosechas de este cultivo y los bajos rendimientos (menores a 2 ton/ha) en más de la mitad del territorio nacional.

Los escenarios de cambio climático utilizados fueron proporcionados por el equipo de trabajo encargado de ello (Magaña *et al.* 1997). Empleamos las salidas de dos modelos de circulación general (MCG): El CCCM (Canadian Climate Center Model) y el GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory). Dichas salidas nos permitieron obtener las variaciones de temperatura, precipitación y radiación provocadas por una duplicación del bióxido de carbono (referida como  $2\times\text{CO}_2$  en los estudios). En el estudio

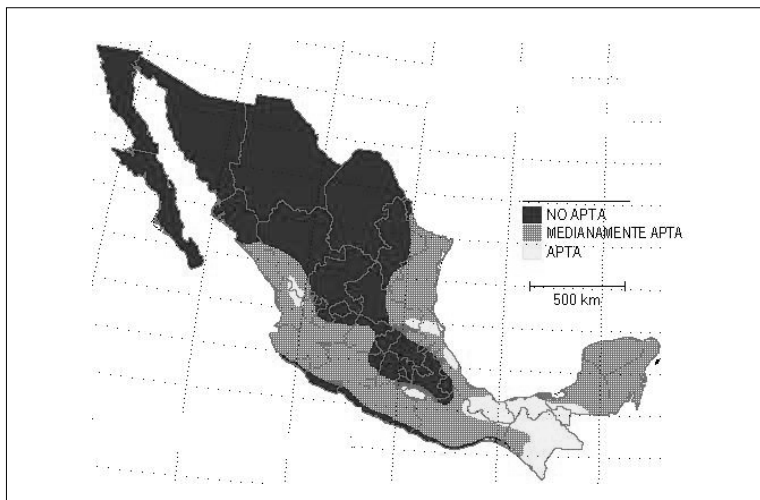


Figura 1a. Áreas potencialmente aptas para la producción de maíz de temporal. Escenario base. Fuente: Flores *et al.* 1996.

también se consideró el llamado efecto fertilizante del bióxido de carbono, que provoca un incremento en la biomasa producida ante un aumento del bióxido de carbono atmosférico. Para el caso del maíz, que es una planta C4, este efecto implicaría un aumento de alrededor de 6% (Parry 1993).

Se analizaron los posibles impactos biofísicos del cambio climático en la agricultura de maíz de temporal considerando básicamente las variaciones a los requerimientos hídricos y térmicos de la planta, tanto en el ámbito regional como en el local. Por un lado se plantearon los rangos óptimos de aptitud para este cultivo, y se estudiaron las variaciones regionales posibles cuando estos rangos fueran violentados por las condiciones de cambio climático (Flores *et al.* 1996). Por otra parte se aplicó (Conde *et al.* 1997) el modelo de simulación de crecimiento del maíz Ceres-Maize (Jones y Kiriny 1986), para el que es necesario especificar variedad, etapas fenológicas, tipo de suelo, manejo de cultivo, entre otras particularidades del cultivo en las localidades en estudio.

Los resultados con ambos métodos apuntaban a un aumento en la vulnerabilidad en la agricultura de maíz de temporal, ya sea considerando los decrementos regionales en la superficie apta para este cultivo (figura 1b), o bien, las fuertes reducciones en los rendimientos en las diferentes localidades en los estados de Puebla, Veracruz y Jalisco, en donde se aplicó el modelo Ceres-Maize. Para el Estado de México, el modelo reportó incrementos en los rendimientos probablemente asociados a un aumento en la tempera-

tura mínima, lo que alejaría el peligro de las heladas que siniestran frecuentemente a los cultivos de temporal en el centro del país.

Mediante el Ceres-Maize realizamos cálculos simples del impacto que tendría el retiro de los subsidios que apoyaban la producción de maíz de temporal, hecho que ocurrió plenamente antes del año 2000. Indicamos en ese estudio que los cambios económicos que se estaban impulsando en el país tendrían tanto o más impacto negativo que las condiciones de cambio climático previstas por los modelos, aun si se aplicaran las medidas de adaptación simuladas mediante el modelo Ceres, que se centraron en los posibles cambios en el manejo del cultivo: cambio en la fecha de siembra, cambio en la variedad de semilla empleada, aplicación de fertilizante, etc.

Cuando se emplearon métodos estadísticos que relacionaban las salidas de los MCG citados con las variables locales, se obtuvieron escenarios semejantes a las condiciones climáticas que prevalecen durante fuertes eventos de El Niño, por lo que de manera natural iniciamos la investigación del impacto histórico de este evento en la agricultura de temporal. En general, un evento fuerte de El Niño, puede acarrear aumentos importantes en las lluvias de invierno, y decrementos considerables en las lluvias de verano (Magaña 1999), siendo estas últimas fundamentales para la agricultura de temporal en nuestro país. Este posible escenario en donde el clima “nor-

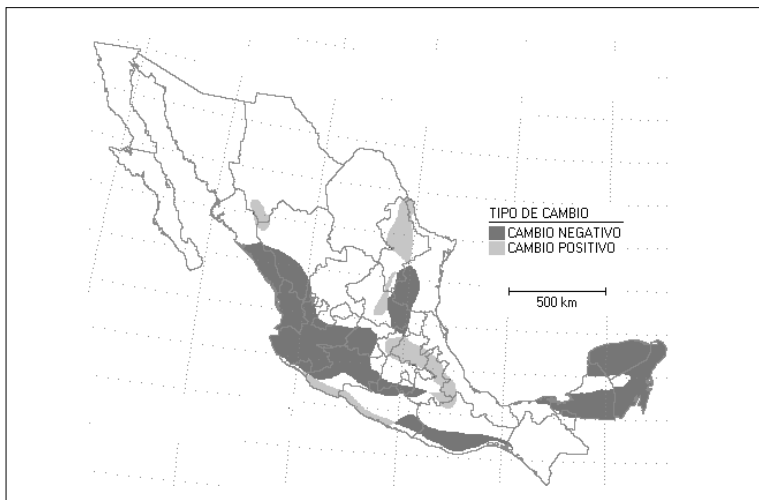


Figura 1b. Áreas con cambio en aptitud respecto al escenario base. Escenario de cambio CCCM. Fuente: Flores *et al.* 1996.

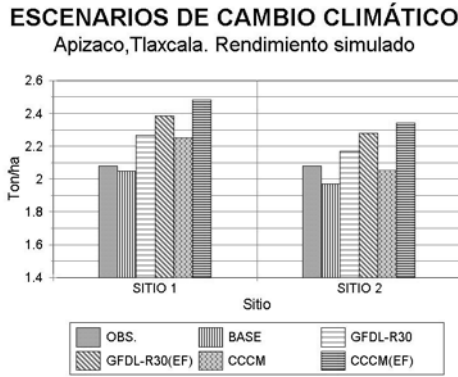
mal” se asemeja a las condiciones El Niño, implicaría que la agricultura de temporal se enfrentaría a grandes pérdidas, o bien, que este tipo de agricultura deberá de sufrir grandes transformaciones para adaptarse. Por ejemplo, entre 1997 y 1998 se presentó uno de los eventos de El Niño más fuertes del siglo; en ese periodo, la precipitación en México disminuyó en 50% en promedio y hubo pérdidas de más de 2 millones de toneladas de maíz en la República. En total, se estima que el costo de los daños se acercó a los 1.4 miles de millones de dólares (Magaña 1999).

Precisamente en 1997, y hasta el año 2000, decidimos iniciar estudios de caso que nos permitieran profundizar en los estudios de las posibles medidas de adaptación al cambio climático, utilizando a la variabilidad climática asociada al ENOS como base para estudiar las acciones que se desarrollan en el campo mexicano ante estos eventos climáticos. Además, estos estudios nos permitieron iniciar el intercambio de información y experiencias con los sectores afectados por este fenómeno. Seleccionamos el estado de Tlaxcala para realizar estudios de caso en la región central del país, porque ésta resultó ser una de las más vulnerables, según el Estudio de País: México, considerando crecimiento poblacional, erosión, demanda y competencia por el agua y reducción importante de sus ecosistemas forestales. Sin embargo, los modelos de simulación agrícola, apuntaban a un efecto positivo del calentamiento global (Ferrer 1999), pero a una reducción importante si se presentaran condiciones climáticas recurrentes de El Niño (gráficas 1a y 1b).

Indudablemente, uno de los grandes avances de las ciencias atmosféricas a finales del siglo xx es la habilidad para pronosticar la variabilidad climática utilizando el conocimiento de las interacciones océano-atmósfera, y de ahí deducir la posibilidad de que se presente un evento ENOS. Sin embargo, aumentar la habilidad del pronóstico no es la panacea, particularmente porque estos pronósticos tienen asociados ineludiblemente incertidumbres, difíciles de comunicar y que dificultan su inclusión en la toma de decisiones por parte de los productores. Además, la situación de los costos de las semillas, créditos, situación del mercado y competencia, para citar algunos factores, pueden influir de manera determinante en la toma de decisiones, aun cuando se emitiera un pronóstico excelente.

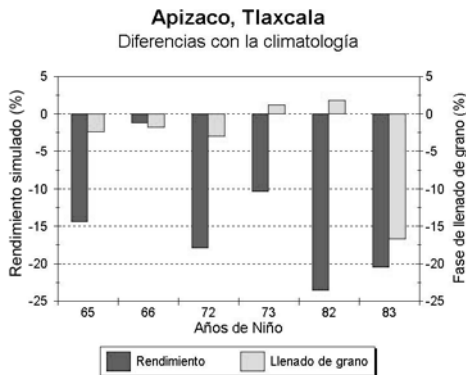
En el estudio desarrollado en el estado de Tlaxcala se entregaron a los productores pronósticos climáticos al inicio de cada año (antes de marzo), esperando que consideraran esta información en la toma de decisiones para los cultivos de ese año. La lluvia esperada por los productores, nosotros la

GRÁFICA 1A. RENDIMIENTOS SIMULADOS PARA DOS SITIOS DEL MUNICIPIO DE APIZACO, TLAX.



Se obtienen incrementos respecto a lo observado en condiciones de cambio climático, para los dos modelos MCG y considerando el efecto fisiológico del CO<sub>2</sub> (EF). Fuente: Ferrer 1999.

GRÁFICA 1B. RENDIMIENTOS SIMULADOS BAJO CONDICIONES DE FUERTES EVENTOS DE EL NIÑO PARA APIZACO, TLAX.



Se observa una reducción respecto a lo esperado en los rendimientos y en el tiempo para la fase de llenado de grano. Fuente: Conde *et al.* 2000.

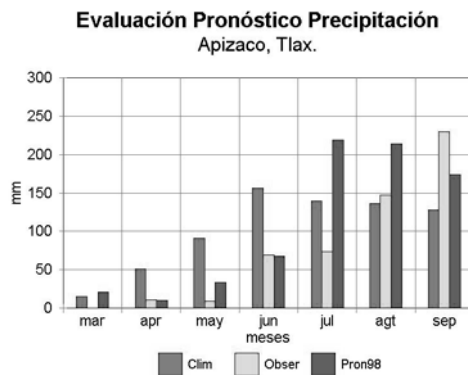


asociamos con la “climatología”; esto es, con el promedio mensual de una serie de 30 años o más.

El pronóstico más exitoso fue el emitido para el año de 1998. “Exitoso” no sólo por lo acertado en cuanto a que la lluvia mensual pronosticada se comportó como la realmente observada posteriormente (gráfica 2), sino también porque la variable “precipitación” es una de las más *relevantes* para la actividad; porque su *temporalidad* fue aceptable, ya que el pronóstico se entregó en marzo, al inicio de las labores del campo; porque la *resolución* espacial (municipio) y temporal (mensual) resultaron pertinentes para los productores involucrados. Finalmente, es importante resaltar la *difusión* dada a los pronósticos, ya que se desarrollaron mesas de discusión y conferencias en diferentes municipios y se distribuyeron trípticos explicando el pronóstico (Stern y Easterling 1999).

Ahora bien, durante el estudio se realizó el análisis de las medidas de adaptación que siguieron los productores (Eakin 1998). Por ejemplo, dada la distribución de las lluvias en los años 1997 y 1998, observamos que, en general, los agricultores esperan el inicio de lluvias regulares (como el inicio de 1997), por lo que retrasan las fechas de siembra. Si el inicio de lluvias se retrasa considerablemente (inicio de 1998) pueden optar por un cambio de variedad a una “violenta”; esto es, con un periodo de crecimiento menor, o bien, pueden optar por el cambio de cultivo (1997, 1998).

GRÁFICA 2. EVALUACIÓN DEL PRONÓSTICO DE LLUVIA PARA APIZACO, TLAX. CLIM SE REFIERE A LOS PROMEDIOS MENSUALES ENTRE 1961 A 1990. OBS SE REFIERE A LO OBSERVADO, Y PRON98 AL PRONÓSTICO ELABORADO EN MARZO DE ESE AÑO, QUE RESULTÓ ACERTADO, EXCEPTO POR JULIO



Si pierden la cosecha por algún siniestro, como una helada temprana o por una *canícula* (sequía intraestival) intensa, como ocurrió a mediados de 1997, pueden optar por cambiar de cultivo, a uno con menor requerimiento de agua y/o periodo de crecimiento menor. Todos los cambios anteriores representan adaptaciones “reactivas”, en tanto que se dan como una acción posterior al evento climático. Nosotros consideramos que los pronósticos climáticos pueden constituirse en una medida adaptativa en sí, que además posibilitaría que las medidas adaptativas enumeradas anteriormente se decidieran de manera anticipada a algunos de los eventos siniestros mencionados, convirtiéndose entonces en parte de una estrategia de adaptación a la variabilidad climática y al posible cambio climático futuro.

Finalmente, consideramos que actualmente es necesario orientar la investigación (Gay *et al.* 2001) para que sea posible entender mejor cómo los procesos socioeconómicos de gran escala y su impacto en las instituciones y políticas del sector agrícola influyen en la vulnerabilidad actual y pueden incrementar la vulnerabilidad futura, cómo pudieran algunas reformas en la actividad agrícola aumentar la capacidad adaptativa o de respuesta actual al riesgo climático, y, muy importante, cómo puede hacerse la investigación del clima y su pronóstico más útil para este sector.

## BIBLIOGRAFÍA

- Conde, C., D. Liverman, M. Flores, R. Ferrer, R. Araujo, E. Betancourt, G. Villarreal y C. Gay. 1997. Vulnerability of rainfed maize crops in Mexico to climate change. *Climate Research* 9: 1-23.
- Conde, C., R.M. Ferrer, V. Magaña, R. Araujo y C. Gay. 2000. Regional Climate Forecast for Summer of 2000 and its application in the Agricultural Activities of Tlaxcala, Mexico. *Proceedings of the International Forum Climate Prediction, Agriculture and Development*, April 26 –28, 2000. Palisades, New York.
- Eakin, H. 1998. *Adapting to climate variability in Tlaxcala, Mexico: Constraints and opportunities for small-scale maize producers*. Masters Thesis. Geography and Regional Development. Tucson: University of Arizona.
- Ferrer, R. 1999. *Impactos del Cambio Climático en la Agricultura Tradicional en el Municipio de Apizaco, Tlaxcala*. Tesis. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

- Flores, E. M., R. Araujo, E. Betancourt y D. Liverman. 1996. Comportamiento de la superficie potencialmente apta para el cultivo del maíz de temporal ante un cambio climático. *Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. México Ante el Cambio Climático*, 8 a 11 mayo, 1996. Pp.179-184. Cuernavaca, Morelos, México.
- Gay, C. (comp.). 2000. *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*. México: INE, SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program.
- Gay, C., et al. 2001. *Integrated Assessment of Social Vulnerability and Adaptation to Climate Variability and Change Among Farmers in Mexico and Argentina*. UNDEP-START Project, Funded by GEF.
- INE-SEMARNAP (Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca). 1997. *Primera Comunicación Nacional Ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: INE-SEMARNAP.
- INE, U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM. 1996. *Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. México Ante el Cambio Climático*, 8 a 11 mayo, 1995, Cuernavaca, Morelos, México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001a. Working Group I. *Newsletter No. 8*. WMO, UNEP.
- . 2001b. *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policy Makers*. Working Group II. IPCC.
- Jones, C. A. and R. Kiriny (eds.). 1986. *CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*. Texas: A & M University Press. College Station.
- Kelly, P. M. y W. N. Adger. 2000. Theory and practice of assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Climatic Change* 47: 325 -352.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez and C. Gay. 1997. Assessment of current and future regional climate scenarios. *Climate Research* 9: 107-114.
- Magaña, V. (ed.). 1999. *Los Impactos del Niño en México*. México: UNAM/CONACYT,SG/IAL.
- O'Brien, K.L. y R.M. Leichenko. 2000. *Global Environmental Change* 10: 221-232.
- Parry, M. 1993. Climate change and the future of Agriculture. *International Journal of Environment and Pollution* 1-3(3): 13-30.
- Petrich, B. 2001. El desastre alimentario de Centroamérica. Desnutrición, cambios climáticos y el proceso globalizador azotan la región. En: *La Jornada*. 2 octubre, 2001. México.

Stern, P. C. y W. E. Easterling (eds.). 1999. *Making Climate Forecasts Matter*. Washington, D.C.: National Academy Press. Disponible en: <http://www.nap.edu>.

## Notas

---

\* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

# Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales

*Lourdes Villers\* e Irma Trejo\*\**

## CONTEXTO GENERAL DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS ECOSISTEMAS

LOS ESTUDIOS DE IMPACTO climático en el ámbito internacional han aumentado considerablemente en los últimos años, debido al reconocimiento científico de las evidencias que muestran la posibilidad real de un cambio climático global. Esto ha tenido repercusión tanto en el ámbito científico, como en el gubernamental y social. Esta situación se refleja en la realización de un creciente número de estudios más precisos sobre este tema, así como en la incorporación de estas discusiones tanto en las negociaciones internacionales, en los programas gubernamentales, como en el incremento en la preocupación y participación de las organizaciones civiles en tópicos como la adaptación y las medidas de mitigación frente al cambio climático.

Estos temas, que anteriormente eran sumamente especulativos, han adquirido veracidad. Como ejemplo, estudios recientes sobre cambio climático regional y global señalan con alto grado de confiabilidad que de manera particular los incrementos de temperatura pueden afectar tanto a los sistemas físicos como a los sistemas biológicos del planeta en distintos niveles (IPCC 1995; y McCarthy *et al.* 2001). La alteración de la temperatura de la atmósfera genera cambios en la dinámica de la misma y, por lo tanto, modifica los patrones de precipitación en el planeta (ver el capítulo *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad climática y el cambio climático en México*, de V. Magaña *et al.*, en esta sección). Este fenómeno tiene repercusiones particularmente graves para los ecosistemas naturales, ya que deriva en la pérdida y degradación de la riqueza biótica del planeta, la erosión de

suelos, cambios en los patrones de evapotranspiración, contaminación de los mantos acuíferos, entre otros.

Cabe hacer la aclaración de que los escenarios de cambio en los patrones climáticos que se proyectaron para las décadas futuras (2025, 2050), exceden la habilidad de muchas especies de adaptarse mediante estrategias como la migración, cambios en el comportamiento o modificaciones genéticas, que normalmente son procesos que requieren cientos o miles de años para llevarse a cabo. Por ello, la condición de cambio climático puede resultar en la reducción de las áreas de distribución de muchas especies, o en la disminución de algunas poblaciones e incluso en la extinción de aquellas especies que resulten más sensibles a los cambios (Smith 1997).

Este tópico ya ha sido documentado con estudios puntuales, en los que se constata que los cambios en los comportamientos de los sistemas biológicos pueden estar relacionados con los cambios regionales de temperatura; tal es el caso de la disminución de la población del sapo dorado (*Bufo periglenes*) y la desaparición de la rana arlequín (*Atelopus varius*) en Costa Rica, después de trastornos climáticos como anomalías en la temperatura y disminución en la precipitación, asociados éstos con la presencia de uno de los eventos de El Niño (El Niño/Oscilación del Sur, ENOS) más fuertes, como lo fue durante el periodo de 1986-1987 (Pounds y Crump 1994); o los cambios en las densidades de poblaciones de pequeños mamíferos en Chile relacionados con las variaciones en la lluvia y la temperatura de la zona (Jiménez *et al.* 1992), en el marco del mismo evento.

Por otra parte se enfrenta la interrogante de saber cómo responderán las diferentes especies ante una atmósfera enriquecida con CO<sub>2</sub>, y que ya se han documentado evidencias de alteraciones a distintos niveles en las plantas, desde modificaciones en la eficiencia fotosintética, en la fenología (comportamiento a lo largo del año), en las tasas de crecimiento, así como en las interacciones en las comunidades y, por lo tanto, en la estructura, dinámica y funcionamiento de los ecosistemas (Mooney *et al.* 1991, Reekie y Bazzaz 1992, Bazzaz, 1998, Corner 1998).

Los posibles efectos que estos cambios en el clima puedan tener en los ecosistemas se han podido percibir debido a la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, que aunque normalmente se presentan en la naturaleza, en los últimos años se han registrado cambios en la frecuencia, intensidad y persistencia de sistemas como son las ondas de calor, precipitaciones intensas, sequías, fuertes huracanes, así como en la intensi-

ficación de los efectos del conocido “El Niño”. Aparentemente y de acuerdo con las investigaciones, estos cambios podrían estar asociados al incremento en la atmósfera de los “gases de efecto invernadero”. Aun cuando la incertidumbre es alta, los estudios apuntan a que es posible que la elevación de la temperatura propicie un incremento en la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales (Walsh y Pittock 1998), lo cual va asociado con lluvias extremas, fuertes vientos e inundaciones en periodos muy cortos; es decir, concentrados en pocos días.

Sin embargo, aunque no se tenga la seguridad de cómo se modificarán los patrones climáticos en el futuro cercano, los eventos “catastróficos” que han afectado diferentes regiones en los últimos años, han funcionado como focos de atención y visiones futuristas de lo que podría suceder si no se toman acciones que mitiguen los efectos del cambio climático (ver el capítulo *México y la participación de países en desarrollo en el régimen climático*, de F. Tudela, en la sección II). Como ejemplos, en México se encuentran los efectos dramáticos del paso de fuertes huracanes como *Pauline* en las costas del Pacífico; *Roxane* en las costas del Golfo, o el *Mitch* en Centroamérica; la fuerte incidencia de incendios tras una sequía prolongada y temperaturas cálidas extremas en 1998, o la sequía prolongada en estados como Zacatecas. Estos eventos pueden ser considerados como experimentos naturales que nos pueden dar indicios y nos alertan sobre lo que pasaría si las tendencias continúan como hasta ahora.

Cabe insistir en que aun cuando éstos fenómenos (huracanes, sequías, incendios) son parte de la dinámica de los ecosistemas (Dittus 1985), la magnitud e intensidad del evento pone en riesgo el mantenimiento de especies o comunidades completas.

El incremento y la acumulación de los gases de efecto invernadero son los responsables del aumento en la temperatura global, y provienen en su mayor proporción de la quema de combustibles fósiles y de los cambios en el uso del suelo. Las transformaciones de la cobertura vegetal, para la realización de distintas actividades humanas como agricultura, ganadería, asentamientos humanos, explotación forestal, etc., incluyen la pérdida de grandes áreas de cobertura de vegetación asociadas con la deforestación, así como la disminución de cualidades que poseen las comunidades e incluso la reducción o pérdida de especies. Particularmente para México, se estima que los cambios en la cobertura del suelo contribuyen en aproximadamente 30 y 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Masera *et al.*

1997) (ver el capítulo *Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México*, de L. G. Ruiz y X. Cruz, en la sección 1).

Aunado a la contribución de la emisión de los gases de efecto invernadero, la reducción en la cobertura vegetal está asociada a la pérdida de los servicios ambientales que ofrecen los ecosistemas (Daily *et al.* 1997). Estos servicios incluyen las condiciones y procesos naturales de los ecosistemas (incluyendo las especies y los genes) por medio de los cuales el hombre obtiene algún tipo de beneficio; mantienen la biodiversidad y la producción de bienes tales como alimento, agua, madera, combustibles y fibras; se incluyen los ciclos de los nutrientes, la degradación de desechos orgánicos, el control biológico de plagas, polinización de plantas, productos farmacéuticos; la formación de suelo y control de la erosión, y el almacenamiento de carbono, entre otros (Dixon *et al.* 1994).

Por tanto, existe una sinergia entre las causas y las consecuencias del cambio climático, ya que si los ecosistemas son almacenes de carbono y éstos se ven disminuidos en superficie y calidad, debido a las actividades humanas, se incrementan las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, lo cual a su vez genera aumento en la temperatura y cambios en los patrones climáticos, que afectan la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas. De esta manera estamos atrapados en un punto en el cual las medidas de mitigación son ahora imprescindibles.

## LOS ESTUDIOS EN MÉXICO SOBRE LA VULNERABILIDAD DE LOS BOSQUES ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Los estudios relacionados con el impacto y vulnerabilidad del Cambio Climático sobre los ecosistemas forestales en México, hasta ahora han sido muy generales. Respecto al ámbito nacional se han aplicado algunos modelos de sensibilidad, así como Modelos de Circulación General en los cuales se considera un doblamiento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera respecto a la línea base, en el contexto del Estudio de País (Gay 2000). Lo que se simula con estos modelos son las condiciones de temperatura y precipitación que imperarían ante esas nuevas condiciones. Concretamente para el país se aplicaron los modelos creados por algunos laboratorios: el Geophysical Fluids Dynamic Laboratory (GFDL-R30), el Canadian Climatic Center Model (CCC), y el modelo de sensibilidad en donde se supone un incremento en la temperatura de +2°C y -10% en la precipitación, todo esto en el marco del Estudio de País.



Los resultados que se obtienen al aplicar los modelos proporcionaron distintos escenarios del impacto sobre los ecosistemas forestales que se distribuyen en el país, así como las posibles modificaciones de la distribución de la vegetación, en el caso de que esta redistribución fuera posible, tal y como se ha mencionado, si el tiempo fuera suficiente para permitir este tipo de adaptaciones. Las predicciones en el cambio de la vegetación se basan en la premisa de que los distintos tipos de vegetación que se reconocen en la actualidad, se relacionan íntimamente con las condiciones climáticas en las que se distribuyen, de forma que conociendo los cambios de temperatura y precipitación que se podrían suscitar, sería posible conocer cuál tipo de vegetación correspondería a esas nuevas condiciones.

CUADRO 1. SUPERFICIE (%) DEL PAÍS AFECTADA POR EL CAMBIO CLIMÁTICO

	MODELO DE SENSIBILIDAD T + 2° CPP - 10 %	MODELO CCCMT + 2.8° CPP - 17 %	MODELO GFDL-R30 T + 3.2 ° CPP +20 %
cambio	52.22	52.00	57.64
no cambio	47.78	48.00	42.36

De acuerdo con los resultados de los estudios de Villers y Trejo (1997), más de la mitad del país (entre 50 y 57%) cambiaría sus condiciones de temperatura y precipitación, con tal magnitud que el tipo de clima que existe hoy podrá ser clasificado como otro subtipo, de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (García 1988) (cuadro 1). Este cambio supone, entonces, que las comunidades que se establecen actualmente en esas áreas, se verían afectadas y, por lo tanto, tendrían que cambiar conforme al nuevo subtipo climático. Los tres modelos aplicados en el estudio prevén un aumento en la temperatura, por lo cual el impacto más significativo ocurriría en las zonas templadas en donde se establecen comunidades vegetales como los bosques de coníferas (pinos, abetos) o latifoliadas (como los encinos), algunos pastizales naturales y matorrales. Todas estas especies que forman este tipo de comunidades no soportan las condiciones cálidas; esto significa que no poseen las adaptaciones para soportar esas temperaturas. Es de suponer que estos cambios en la temperatura tendrían efectos drásticos en la vegetación de esas zonas y su distribución se vería dramáticamente reducida, e incluso en algunos casos desaparecería.

Según el modelo de sensibilidad, un aumento de temperatura y un decremento de la precipitación se verían reflejados en una disminución en la superficie de los bosques templados de coníferas y encinos, así como los pastizales naturales de alta montaña y ciertos matorrales con afinidades templadas que cubren el país, y serían desplazados por elementos con preferencias más cálidas y xéricas (con adaptaciones a la aridez). De hecho se prevé que el límite latitudinal de los bosques espinosos se desplazaría hacia el sur, principalmente en la vertiente del Pacífico.

Cuando se analiza lo que pasaría de acuerdo con el modelo CCCM, éste supone un escenario similar al de sensibilidad, sólo que en este caso el incremento en promedio para el país es de 2.8°C y una disminución de la lluvia en 7%, por lo que en general el resultado es similar a lo descrito anteriormente; es decir, existe una tendencia a la aridez, lo que favorece las condiciones para una ampliación de comunidades como los bosques secos y los bosques tropicales caducifolios, adaptados a estas condiciones, pero en decremento de los bosques templados y comunidades de alta montaña.

El modelo GFDL-R30 es el menos severo de los tres analizados, en el sentido de que en este caso la simulación muestra un escenario en donde la temperatura en promedio se incrementa hasta 3.2°C, pero se tiende a un incremento en 20% de la lluvia respecto a la actual. Con estas condiciones lo que se observa es que las comunidades que se verían favorecidas serían los bosques tropicales, que podrían distribuirse en mayores áreas que las que actualmente ocupan. Los climas áridos templados y semicálidos prácticamente desaparecerían, por lo que los pastizales naturales y los matorrales xerófilos podrían ser reemplazados por bosques espinosos u otro tipo de matorral con mayor afinidad a condiciones más cálidas y más húmedas. Por otro lado, los bosques de coníferas asentados en climas semifríos serían reemplazados por comunidades más templadas, como podrían ser los encinares, que tendrían que establecerse en lugares con mayor altitud de la actual.

En cualquiera de los casos, lo que sugiere la aplicación de los modelos es que ante la posibilidad de un cambio climático, en más de la mitad del país las condiciones climáticas serían distintas a las actuales y, por lo tanto, la vegetación que se establece actualmente tendría que cambiar, tal y como se muestra en el cuadro 2, en donde se detalla cuáles comunidades incrementarían su área de distribución, de acuerdo con cada modelo, y cuáles perderían superficie respecto a lo que deberían ocupar en el presente. Como se mencionó anteriormente, esto supondría la capacidad de las especies de migrar y adaptarse en tiempos muy cortos, lo cual no parece posible (Markham 1996).

CUADRO 2. SUPERFICIE (%) DEL PAÍS CUBIERTA POR LOS DISTINTOS TIPOS DE VEGETACIÓN DE ACUERDO CON LOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL

TIPO DE VEGETACIÓN *	POTENCIAL ACTUAL	MODELO DE SENSIBILIDAD	MODELO CCCM	MODELO GFDL-R30
Bosque tropical perennifolio	9.91	8.64 (-)	8.51 (-)	16.22 (+)
Bosque tropical caducifolio	24.28	24.74 (~)	25.22 (+)	28.77 (+)
Bosque mesófilo	2.1	0.26 (-)	0.54 (-)	1.3 (-)
Bosque de coníferas y encinos	6.36	3.91 (-)	3.65 (-)	3.92 (-)
Bosque de coníferas (zona fría)	2.31	0	0	0
Bosque espinoso	11	19.67 (+)	18.1 (+)	18.38 (+)
Matorral xerófilo	39.54	42.14 (+)	43.99 (+)	31.38 (-)
Pastizal	4.72	0.63 (-)	0	0

\* El tipo de vegetación se infiere del tipo de clima que se establece de acuerdo con las condiciones actuales y según los cambios para cada modelo. Los símbolos a la derecha de cada número indican ganancia (+), pérdida (-) o mantenimiento (~) de la superficie respecto a la potencial actual.

En la figura 1 se observa cuáles son las zonas del país y qué tipo de vegetación (de acuerdo con la clasificación de Rzedowski, 1990) sería el que se vería afectado por el cambio de acuerdo con cada uno de los modelos aplicados.

Es importante mencionar que en este análisis se considera a la cubierta vegetal del país sin tomar en cuenta las alteraciones que se han examinado; esto es, se analiza el cambio partiendo de la distribución potencial de la vegetación; asimismo, se considera qué tipo de vegetación se establecería en las nuevas condiciones. Sin embargo, si se toma en consideración que de acuerdo con la dinámica actual de cambio de uso del suelo en el país, muchas de las áreas que se señalan en el análisis como zonas afectadas por el cambio climático, constituyen zonas que están ya desprovistas de vegetación o que muestran síntomas de deterioro, el escenario sería diferente. Esta última consideración es un factor importante, ya que las comunidades enfrentan no solamente el cambio climático, sino que también están sujetas a una serie de presiones relacionadas con las actividades humanas.

En el estudio antes citado de Villers y Trejo se analiza la distribución actual de los tipos de vegetación, considerando aquellas áreas en las que la cobertura ya ha sido transformada para otros usos, así como su relativo estado de conservación, es decir aquellas áreas en las que la estructura y composición de la vegetación ya ha sido alterada. En el cuadro 3 se puede observar la proporción de cada tipo de vegetación que se ve afectada por el

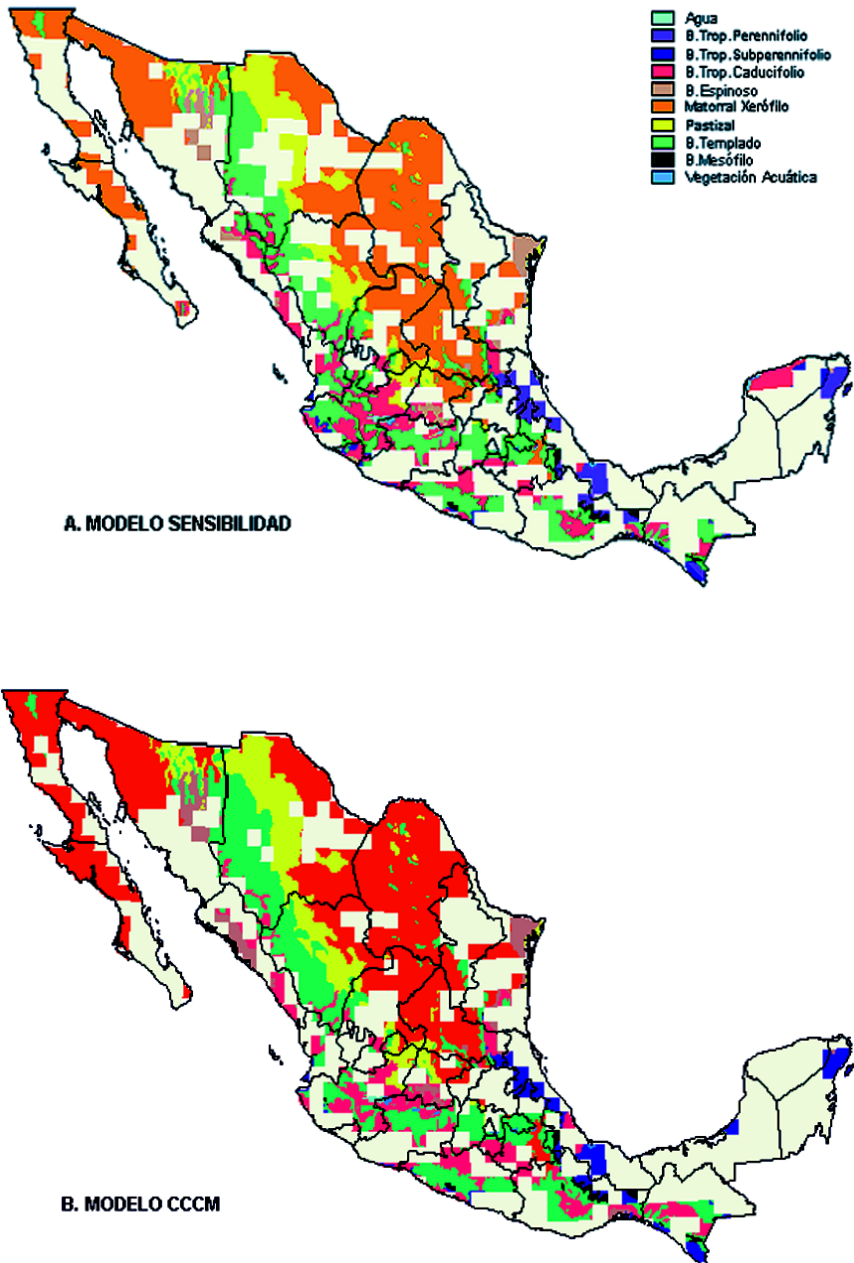


Figura 1. Áreas de vegetación afectadas por el cambio climático. A. Modelo sensibilidad y B. Modelo CCCM.

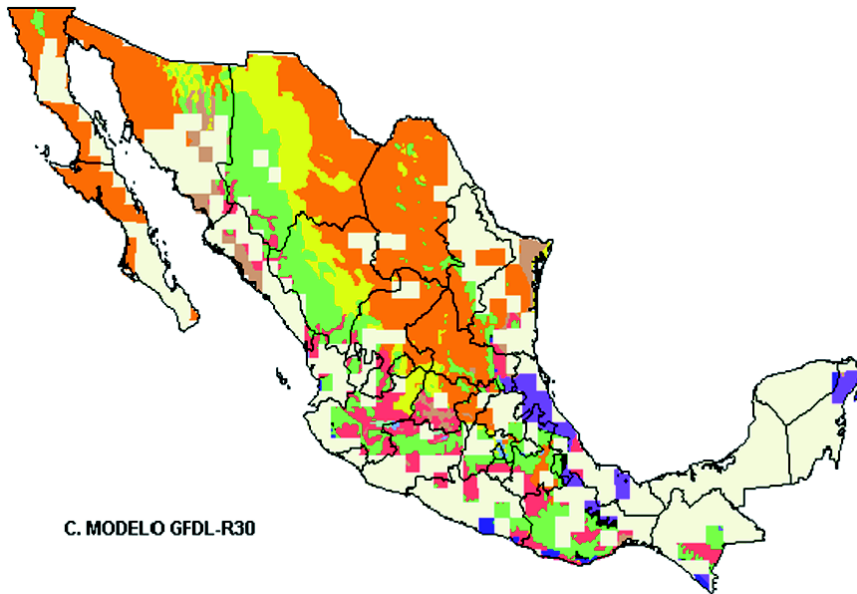


Figura 1. Áreas de vegetación afectadas por el cambio climático (continuación). C. Modelo GFDL-R30.

cambio climático, y de ésta, la proporción que se encuentra en buen estado de conservación, así como aquella que además muestra signos de deterioro a causa de las actividades productivas. Resalta que entre 60 y 70% de los bosques templados se verá afectado por el cambio climático, y porcentajes similares de matorral xerófilo; en contraste, la proporción de bosques tropicales que se ven afectados por el cambio en condiciones climáticas, sobre todo en los tropicales más húmedos, es menor, ya que no alcanza 20%. Sin embargo, la relación de comunidades conservadas respecto a aquellas comunidades que presentan signos de alteración se invierte, y es mayor la proporción de bosques tropicales alterados respecto a la de los bosques templados.

Estos resultados llevan a una reflexión importante: los bosques templados se verán más afectados por el cambio climático, pero los bosques tropicales están siendo más afectados por las actividades humanas, que los están llevando a una reducción inexorable de la superficie que ocupan en el país. La combinación de estos dos factores puede llevar a resultados drásticos en términos de la permanencia de la cobertura vegetal en el territorio. Es de

suponerse que aquellas áreas que se encuentran alteradas y que además estarán afectadas por el cambio climático, disminuyen notablemente su posible capacidad de respuesta para enfrentar los cambios, por lo que su probabilidad de desaparecer se incrementa fuertemente.

En este contexto se analizó también el impacto del cambio climático sobre las principales áreas naturales protegidas terrestres del país (Villers y Trejo, 1998). Los resultados fueron contrastantes dependiendo del modelo aplicado, pero como ejemplo, se encontró que algunos bosques tropicales secos, como los que se encuentran en las reservas de Chamela-Cuixmala, Ría Lagartos y Manantlán, se verían afectados por un aumento de la lluvia y temperatura. Otros casos son las reservas de El Triunfo, Celestún y San Martín, que tendrían que soportar condiciones más secas, de acuerdo con el modelo CCCM. También resultarían afectadas las áreas de El Abra, en San Luis Potosí, y La Mariposa Monarca, ya que estarían sujetas a condiciones más cálidas; todo esto implicaría, desde luego, una presión adicional sobre esas zonas.

Otros estudios realizados por Arriaga *et al.* (2001), basados en la distribución potencial actual de ciertas especies de encinos y pinos (como *Quercus peduncularis*, *Q. laeta*, *Pinus ayacahuite*, *P. chiuhahuana*, *P. durangensis* y *P. hartwegii*), analizados en el escenario de cambio climático según el modelo HadCM2, concluyen que la distribución de estas especies disminuirá en promedio 30% en relación con la superficie que ocupan actualmente (ver el capítulo *Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México*, de L. Arriaga y L. Gómez, en esta sección). Las especies que presentan mayor reducción de su área potencial de distribución actual son: *Pinus hartwegii*, con -49%, y *Quercus laeta*, con -37%. Los resultados de estos estudios apuntan en la misma dirección de los resultados reportados por Villers y Trejo (1997) para el país, pues confirman que especies con afinidades a climas templados, tenderán a reducir su representación en el país.

Por otra parte, en otro estudio realizado por Villers y Trejo (1998) sobre 16 zonas importantes en cuanto a explotación e industria forestal del país, se prevé un impacto significativo sobre esas zonas ubicadas en los estados de Chihuahua, Durango, Jalisco y Michoacán, que corresponden a las áreas en donde se encuentran los principales aserraderos del país y en donde se producen, para consumo nacional, muebles, contrachapados, celulosa y papel, cajas, etc.

CUADRO 3. SUPERFICIE (%) DE CADA TIPO DE VEGETACIÓN ACTUAL AFECTADA POR EL CAMBIO CLIMÁTICO Y % RELATIVO DE SU ESTADO DE CONSERVACIÓN

TIPO DE VEGETACIÓN	MODELO DE SENSIBILIDAD		MODELO CCCM		MODELO GFDL-R30				
	AFECTADA	CONSERVADA	AFECTADA	CONSERVADA	AFECTADA	CONSERVADA			
Bosque tropical perennifolio	18.7	21.3	78.7	19.5	14.8	85.2	19.4	17.8	82.2
Bosque tropical subperennifolio	20.4	30.6	69.4	15.5	25.8	74.2	16.9	29.5	70.5
Bosque tropical caducifolio	48.1	42.4	57.6	42.2	35.7	64.4	42.5	36.7	63.3
Bosque espinoso	28.4	78.0	22.0	37.1	76.0	23.9	37.6	73.0	27.0
Matorral xerófilo	59.5	89.1	10.9	72.9	90.0	10.0	74.2	88.2	11.8
Pastizal	66.1	48.4	51.6	78.1	49.0	51.0	85.5	46.3	53.7
Bosque templado	64.0	71.0	29.0	68.8	72.3	27.7	65.2	73.1	26.9
Bosque mesófilo	52.5	63.2	36.8	57.9	63.1	36.9	46.1	45.5	54.5
Vegetación acuática	24.8	96.5	3.5	29.7	96.7	3.3	25.7	99.5	0.5

## CONSIDERACIONES

Es importante hacer una serie de reflexiones en el sentido de que los ecosistemas terrestres han sido sujetos a muchas presiones, como cambio de uso del suelo, contaminación, explotación inmoderada, ganaderización, introducción de especies exóticas, etc., por lo que el cambio climático se añade como un factor más que puede hacer cambiar o poner en peligro las existencias de estos sistemas.

Estos cambios, que pueden hacerse sentir en pocos años, no se distribuyen homogéneamente en todas las regiones del país. Por ejemplo para el caso de la temperatura, en algunas zonas el incremento podría ser de hasta 4.5°C. La incertidumbre respecto a los cambios en los patrones de la lluvia es muy amplia, fundamentalmente si se considera que uno de los factores importantes a conocer, es como será la distribución de la precipitación a lo largo del año y que tan concentradas podrán ser esas lluvias, ya que probablemente para algunos tipos de bosques tropicales, más que la cantidad de precipitación, la extensión de los periodos secos puede llegar a ser crítica (Condit 1998). Esto es vital para el buen funcionamiento de los ecosistemas. Por ejemplo, estos periodos extendidos de sequía, combinados con la deforestación y la fragmentación de los bosques (la formación de parches y el aislamiento de la vegetación), los expone potencialmente a una mayor incidencia de incendios (Goldammer y Price 1998).

La afectación que se pueda causar en las comunidades vegetales de México relacionada con el cambio climático, así como por otros factores como la reducción en la superficie, la transformación a otros usos, los cambios en la composición de especies, etc., cobra una mayor importancia cuando se considera que la pérdida de estos ecosistemas conlleva a una gran pérdida de la biodiversidad mundial, ya que México está considerado como uno de los países de megadiversidad (Sarukhán y Dirzo 2001), en donde se abarcan todos los niveles, desde la diversidad genética, de especies, hasta la de ecosistemas. Se calcula que en el país existen alrededor de 36 000 especies, lo cual representa 10% de la diversidad florística del planeta (Rzedowski 1993). En nuestro territorio se encuentran varios de los centros de diversidad florística considerados en el mundo (Davis *et al.* 1997) y, de hecho, una de las características sobresalientes del país es que contiene prácticamente todos los ecosistemas presentes en la Tierra (Rzedowski 1992). Asimismo, México tiene un alto grado de endemismo (especies que solo existen en el territorio mexicano)



(Rzedowski 1991), además de ser considerado uno de los centros de domesticación de plantas más importantes del mundo (Hernández-Xolocotzi 1993).

Por ello, se deben tomar medidas que prevengan los daños. Una de estas medidas es llevar a cabo una valoración económica de los múltiples servicios que ofrecen los diversos tipos de bosques, y que de acuerdo con algunas referencias alcanzaría valores muy altos (Dirzo 2001). Esto con la premisa de reconocer su valor total, y tomando en cuenta que los servicios ecológicos son tan importantes para la supervivencia humana como los servicios tecnológicos, y que reemplazar los servicios naturales con tecnología equivalente (sistemas tecnológicos) es un esfuerzo muy grande y costoso, y sabemos que el mantenimiento del planeta es imposible sin los servicios ecológicos (Cairns 1995, Heywood y Watson 1995).

Desde los primeros estudios de Cambio Climático se ha señalado e insistido que el mantenimiento y restauración de los bosques naturales, así como de su biodiversidad, son vitales para la mitigación de los impactos del cambio climático (Markham 1996). De la misma forma se ha puntualizado que los bosques, manejados en forma adecuada, pueden ser útiles como almacenes de carbono y pueden compensar las emisiones del sector energético (Maser *et al.* 1997).

Conservar productivamente los recursos biológicos naturales significa mantener la integridad de los ecosistemas y de todos sus componentes: especies de plantas, animales y microorganismos, y sus interrelaciones.

## ESTUDIOS FUTUROS

Con lo que se conoce hasta ahora sobre los posibles efectos del cambio climático en México, se advierte que las comunidades vegetales del país están expuestas y son muy sensibles ante las modificaciones que podrían darse si la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico continúa en ascenso y los patrones climáticos generales cambian en un futuro cercano.

Es necesario disminuir la incertidumbre que existe respecto a conocer de qué magnitud y en qué sentido podrían modificarse las condiciones actuales, por lo que la aplicación de nuevos modelos que contribuyan a aportar información más precisa, será de gran utilidad en el futuro próximo. En el mismo sentido, se requiere llevar a cabo estudios más particulares, fundamentalmente en las áreas que se han detectado como más sensibles. Es importante para ello realizar estudios regionales que generen mayor información sobre las posibles afectaciones de los ecosistemas ante el cambio climático.

Es indispensable saber como se verá afectado el clima, no sólo en el nivel general, sino también cómo será su comportamiento a lo largo del año, y relacionar esto con los efectos en los ecosistemas, sobre todo si se considera la gran diversidad de comunidades vegetales que se establecen en el país.

Conocer las capacidades de adaptación de las especies y analizar el ámbito de condiciones que pueden soportar, podrá ser utilizado en la planificación de estrategias de mitigación.

Medidas encaminadas a la protección y al mantenimiento de los ecosistemas, desde zonas protegidas, corredores biológicos, manejos forestales adecuados, etc., serán fundamentales y son reconocidas como aspectos imprescindibles que deben ser incorporados en la planificación de las acciones a tomar, encaminadas a resolver el deterioro general del planeta. Es fundamental, para todo esto, reconocer el valor de los ecosistemas en todos sus aspectos y, sobre todo, la participación de todos los sectores de la sociedad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arriaga, C. L., M. L. Gómez y A. T. Feria. 2001. Distribución de especies diagnósticas del bosque de coníferas y encinos bajo escenarios de cambio climático. En: *xv Congreso Mexicano de Botánica*.
- Bazzaz, F.A. 1998. Tropical forests in a future climate: Changes in biological diversity and impact on the global carbon cycle. *Climatic Change* 39: 317-336.
- Cairns, J. 1995. Ecosystem Services: An Essential Component of Sustainable Use. *Environmental Health Perspectives* 103 (6).
- Condit, R. 1998. Ecological implications of changes in drought patterns: shifts in forest composition in Panama. *Climatic Change* 39: 413-427.
- Daily, G., S. Alexander, P. Erfich, L. Goldner, J. Lubchenco, P. Matson, H.A. Mooney, S. Poster, S. Shneider, D. Tilman y G. Woodwell. 1997. Ecosystems services: benefit supplied to human societies by natural ecosystems. *Issues in Ecology* 2: 1-16.
- Davis, S. D., V. H. Heywood, O. Herrera-McBryde, J. Villa-Lobos y A. C. Hamilton (eds.). 1997. *Centres of Plant Diversity. A Guide and Strategy for their Conservation*. vol. 3. The Americas. Oxford: World Wide Fund for Nature and IUCN-The World Conservation Union.
- Dirzo, R. 2001. Forest ecosystems functioning, threes and value: Mexico as a case study. En: *Managing Human-Dominated Ecosystems. Monographs in Systematic*

- Botany from the Missouri. Vol. 84.* Missouri: Botanical Garden. Missouri Botanical Garden Press.
- Dittus, W. P. J. 1985. The influence of cyclones on the dry evergreen forest of Sri Lanka. *Biotropica* 17: 1-14.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler y J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- García, E. 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Cuarta edición. México: Offset Larios.
- Gay, C. (comp.). 2000. *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*. México: INE-SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program.
- Goldammer, J. G. y C. Price. 1998. Potential impacts of climate change on fire regimes in the tropics based on Magic and GISS-GCM Derived Lightning Model. *Climate Change* 39: 273-296.
- Hernández-Xolocotzi, E. 1993. Aspects of plant domestication in Mexico: a personal view. En: T. P. Rammamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (comps.) *Biological Diversity of Mexico. Origins and distribution*. New York: Oxford University Press.
- Heywood V. H. y R. T. Watson. 1995. *Global Biodiversity Assessment*. Cambridge: United Nations Environment Programme.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1995. *Climate Change. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jiménez, J. E., P. Feinsinger y F. M. Jaksic. 1992. Spatio-temporal patterns of an irruption and decline of small mammals in Northcentral Chile. *J. Mamm.* 73(2): 356-364.
- Korner, C. 1998. Tropical forests in a CO<sub>2</sub> richworld. *Climatic Change* 39: 297-315.
- McCarty, J. J., O. Canziani, A. A. Leary, D. J. Dokken y K. S. White (eds.). 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: IPCC. Cambridge University Press.
- Markham, A. 1996. Potential impacts of climate change on ecosystems: a review of implications for policymakers and conservation biologist. CR Special. *Climate Research* 6(2): 179-191.
- Masera O., M.J. Ordoñez and R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long terms scenarios. *Climate Change* 35:265-295.

- Mooney, H. A., B. G. Drake, R. J. Luxmoore, W. C. Oechel y L. F. Pitelka. 1991. Predicting Ecosystem Responses to Elevated CO<sub>2</sub> Concentrations: What has been Learned from Laboratory Experiments on Plant Physiology and Field Observation? *BioScience* 41: 96-104.
- Pounds, J. A. y M. L. Crump. 1994. Amphibian declines and disturbance: the case of the golden toad and the harlequín frog. *Conservation Biology* 1(8): 72-85.
- Reekie, E.G. y F.A. Bazzaz. 1992. Phenology and Growth in Four Annual Species Grown in Ambient and Elevated CO<sub>2</sub>. *Can. J. Bot.* 69: 2475-2481.
- Rzedowski, J. 1990. Vegetación Potencial. *Atlas Nacional de México, Sección Naturaleza*. Hoja IV.8.2. Vol II. Mapa escala: 1:4,000 000. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- . 1991. El endemismo en la flora fanerogámica mexicana: una apreciación analítica preliminar. *Acta Botánica Mexicana* 15: 47-64.
- . 1992. Diversidad del Universo Vegetal de México: Perspectivas de un Conocimiento Sólido. Pp. 251-258. En: J. Sarukhán y R. Dirzo (comps.) *México ante los retos de la Biodiversidad*. México: CONABIO.
- . 1993. Diversity and origins of the Phanerogamic Flora of Mexico. En: T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (eds.). *Biological diversity of Mexico. Origins and distribution*. Nueva York: Oxford University Press.
- Sarukhán, J. y R. Dirzo. 2001. Biodiversity-Rich countries. En: S. A. Levin (ed.) *Encyclopedia of Biodiversity*. San Diego: Academic Press.
- Smith, J. B. 1997. Setting priorities for adapting to climate change. *Global Environmental Change* 7 (3): 252-264.
- Villers, R. L. e I. Trejo-Vázquez. 1997. Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research Vol. 9*: 87-93.
- e I. Trejo-Vázquez. 1998. Climate Change on Mexican Forests and Natural Protected Areas. *Global Environmental Change Elsevier Science* 2(8): 141-157.
- Walsh, K. y A.B. Pittock. 1998. Potential changes in tropical storms, hurricanes and extreme rainfall as a result of climate change. *Climate Change* 39: 199-213.

## Notas

---

\*Centro de Ciencias de la Atmósfera.

\*\* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

# Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México

*Laura Arriaga y Leticia Gómez\**

## INTRODUCCIÓN

EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL es una consecuencia del aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), resultado principalmente de la quema de combustibles fósiles que ha provocado un cambio en las condiciones atmosféricas globales. México se encuentra entre los 70 países con mayores emisiones de GEI per cápita, ya que emite 0.96 toneladas anuales de Carbono a la atmósfera. Esta cantidad, sin embargo, se encuentra muy por debajo de las emisiones de los países desarrollados; Estados Unidos, por ejemplo, emite 5.6 toneladas anuales (INE-SEMARNAP 1997). En el caso de México, 30.5% de las emisiones de GEI están fuertemente relacionadas con las actividades de cambio de uso del suelo, asociadas a su vez con procesos de deforestación (ver los capítulos *Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México*, de L. G. Ruiz, y *Registro histórico de los principales países emisores*, de J. L. Arvizu, en la sección 1).

En este sentido, las especies animales y vegetales del país, hasta ahora amenazadas por la presión de las actividades humanas, también lo estarán por efectos del cambio climático. El *Estudio de País*, presentado en la Primera Comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1997 (INE-SEMARNAP 1997), considera supuestos de un incremento de 2°C en temperatura y una disminución de 10% en la precipitación anual para generar distintos escenarios de cambio climático (INE-SEMARNAP 1997). Con base en estas diferencias en los valores de temperatura y precipitación, se estima que los tipos de vegetación más afectados en México serán los bosques templados, los bosques tropicales y

los bosques mesófilos de montaña (Villers y Trejo 1998) (ver el capítulo *Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales*, de L. Villers, en esta sección), lo que implicará un cambio en la distribución de las especies que habitan en esos ecosistemas. Se sabe que una modificación en el área de cobertura de los tipos de vegetación, ya sea una contracción o una expansión, necesariamente traerá como consecuencia una nueva distribución espacial de las especies, así como cambios en la abundancia de aquellas más susceptibles (Peterson *et al.* 2001 y Peterson *et al.* 2002).

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), como institución nacional encargada del impulsar el conocimiento, la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad en México, está desarrollando un proyecto para determinar los posibles escenarios del cambio climático en la distribución de especies indicadoras de diversos tipos de vegetación. Asimismo, es de interés evaluar la vulnerabilidad de las especies a los cambios en los componentes del clima. Este estudio, enmarcado en el contexto de Estudio de País sobre biodiversidad y en los foros internacionales referentes a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, pretende contribuir a señalar los tipos de vegetación susceptibles de sufrir cambios en su superficie y, por tanto, en la distribución de sus especies. Con ello se podrán prever algunas medidas tendentes a la conservación *ex-situ* y al fortalecimiento de bancos de germoplasma para las especies susceptibles.

## MÉTODOS

Para analizar los cambios en la distribución de la vegetación por la influencia del cambio climático es necesario partir de la distribución actual de los tipos de vegetación, y de las especies que habitan en ellos. Asimismo, es necesario contar con otros parámetros físicos adicionales al clima que pueden afectar la distribución de una especie tales como la altitud, el aspecto, la pendiente y la radiación solar estacional. Este tipo de cambios se puede simular por medio de modelos predictivos como son los algoritmos genéticos que utiliza el programa GARP (Algoritmos Genéticos para el establecimiento de Reglas de Predicción, por sus siglas en inglés), que incluyen tanto variables climáticas como otras del medio físico. Este programa también utiliza los sitios de colecta de los ejemplares de la especie que se desee analizar, ya que cada ejemplar está asociado a características ecológicas determinadas

del sitio el en que se colectó; estas características las utiliza el programa para generar otras áreas de similitud ecológica en donde potencialmente se podrá distribuir la especie en cuestión (Stockwell y Noble 1992; Stockwell y Peters 1999).

El programa GARP se utilizó conjuntamente con el resultado de varias consultas que se hicieron a las bases de datos del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad de la CONABIO –SNIB-CONABIO– sobre los sitios de colecta de ejemplares de algunas especies de aves y plantas. Se seleccionaron dos especies de aves, 17 especies de pinos y 17 de encinos. Las aves seleccionadas fueron dos especies de crácidos cuyo rango de distribución actual es contrastante: una especie (*Ortalis wagleri* Gray G.R.) es de amplia de distribución, en tanto que la otra (*Oreophasis derbianus* Gray) presenta una distribución geográfica muy restringida. Las especies vegetales se seleccionaron en función de su distribución tanto en ambientes húmedos y fríos como en templados y subhúmedos (cuadro 1). Los sitios de colecta fueron validados en función de la distribución de los tipos de vegetación registrados por el Inventario Nacional Forestal (SEMARNAP-INEGI-UNAM, 2001), agrupándose éstos en clases genéricas.

Para evaluar la distribución de especies en un escenario de cambio climático, se utilizó el modelo general de circulación HadCM2, que incluye dos escenarios: HHGGAX50 (el menos conservador) y HHGSDX50 (el conservador), que asume un incremento de 0.5% de CO<sub>2</sub> por año (IS92d) e incorpora el forzamiento de sulfatos por aerosoles, estima las diferencias entre los promedios comprendidos entre 1961-1990 y 2040-2069 y presenta valores cercanos al escenario base para México ([http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru\\_data/examine/HadCM2\\_info.html](http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/cru_data/examine/HadCM2_info.html)). Se extrajeron los cambios de temperatura y precipitación y se reticularon a una resolución de 0.5° x 0.5° de latitud y longitud, respectivamente, mediante la incorporación de los mapas de temperatura y precipitación de García (1997a y b, 1998a y b). Este modelo de cambio climático estima para México un aumento de la temperatura entre +1.7 y +3.0°C, y una disminución de la precipitación de entre -10 a -365 mm.

Los resultados del GARP se procesaron en un formato de malla de resolución de 4 x 4 km para obtener las superficies de los escenarios base y de cambio climático para cada especie. Posteriormente se realizó una superposición geográfica de cada escenario con la cobertura de los tipos de vegetación de acuerdo con el Inventario Nacional Forestal antes mencionado. Esto

se hizo para evitar obtener distribuciones potenciales en áreas que actualmente no presentan este tipo de vegetación y donde la especie no puede habitar. Asimismo se calcularon las áreas de distribución de la cada especie para los dos escenarios (actual y considerando el cambio climático) por tipo de vegetación.

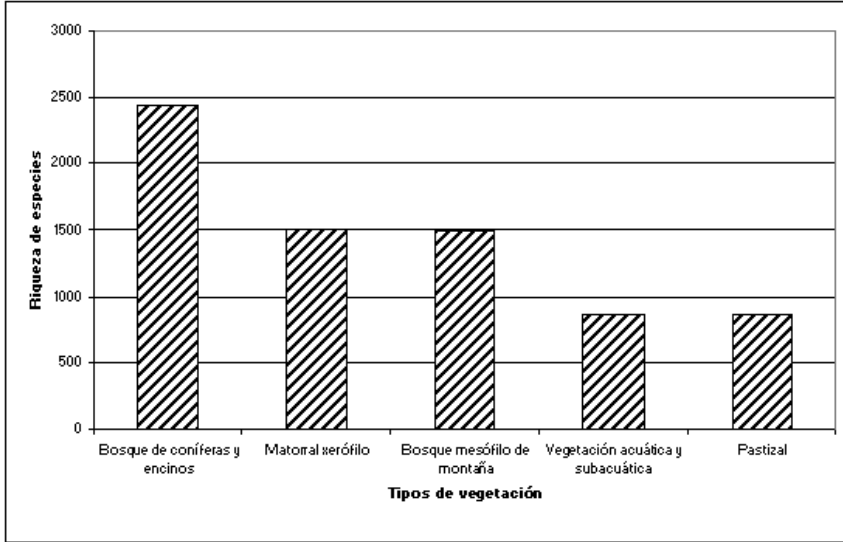
## RESULTADOS

### Estimación del número de especies que se verán afectadas por el cambio climático

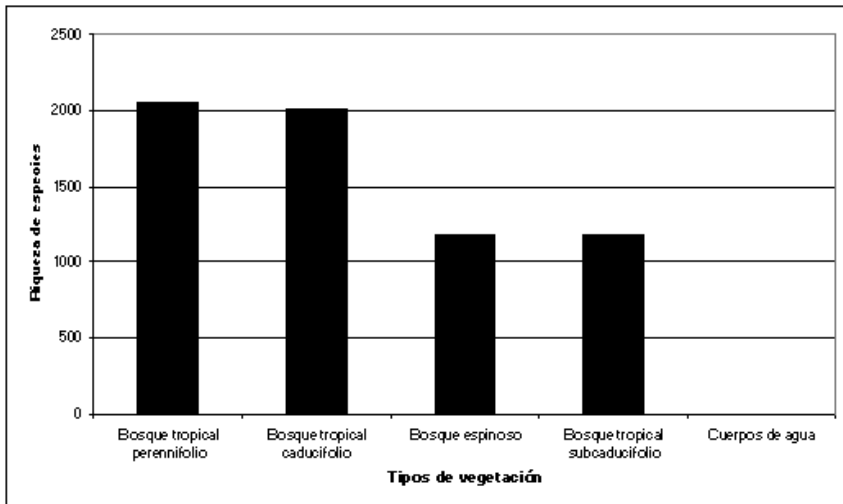
Los resultados muestran que los tipos de vegetación que se verán más afectados por el cambio climático global, de acuerdo con Villers y Trejo (1998) serán los bosques de coníferas y encinos, seguidos del matorral xerófilo, el bosque mesófilo de montaña, la vegetación acuática y subacuática y el pastizal. El modelo predice una disminución en la superficie actual de los tipos de vegetación antes mencionados, por lo que las especies que se desarrollan en éstos también se verán afectadas. En la figura 1a se presenta la riqueza de especies total asociada a cada uno de estos tipos de vegetación de acuerdo con los datos del SNIB-CONABIO. A pesar de que en lo individual los bosques tropicales son más ricos en número de especies, la gran heterogeneidad topográfica, fisiográfica y climática en la que se desarrollan los bosques de coníferas y encinos de México, hace que este tipo de vegetación en su conjunto sea el más diverso del país (Rzedowski 1998) y el que reporta un mayor riesgo por el efecto del cambio climático (figura 1a).

Por otra parte, los tipos de vegetación que el modelo predice que aumentarán su superficie respecto a la actual, son el bosque tropical perennifolio, el bosque tropical caducifolio y subcaducifolio, y el bosque espinoso (figura 1b). Un hecho importante que vale la pena resaltar es que estos escenarios no consideran las altas tasas de deforestación que ocurren en los sistemas naturales, por lo que las modificaciones en superficie no incluyen el efecto antrópico asociado al desmonte; por lo mismo, las estimaciones de pérdida anual de la cobertura vegetal no están modeladas. Por ejemplo, aunque de acuerdo con los modelos y escenarios de cambio climático global se predice un incremento en la superficie original del bosque tropical perennifolio (Villers y Trejo 1998), éste es uno de los tipos de vegetación que está sufriendo mayor deforestación en México. Lo mismo





a) Tipos de vegetación que disminuirán su superficie



b) Tipos de vegetación que aumentarán su superficie

Figura 1. Riqueza de especies total de acuerdo con los tipos de vegetación potencial de Rzedowski (1990) y en función de los escenarios de cambio climático.

puede aplicarse a las áreas con bosque mesófilo de montaña, las cuales cubren una superficie muy pequeña en el país.

### Efectos del cambio climático sobre especies con rangos de distribución contrastantes

Los resultados obtenidos para las dos especies de aves muestran comportamientos interesantes en función de la distribución geográfica de las especies seleccionadas para el análisis. La chachalaca, *Ortalis wagleri*, es una especie de amplia distribución (Texas, EUA-Argentina) y es un ejemplo de aquellas especies que probablemente verán ampliada su distribución por el tipo de vegetación en el que se desarrollan. En México, esta especie habita preferentemente en los bosques tropicales caducifolios de la vertiente Pacífico norte (figura 2); bosques que, de acuerdo con los modelos predictivos, serían uno de los tipos de vegetación que podrían incrementar su superficie (figura 1b). En tanto que el pavón, *Oreophasis derbianus*, es una especie de distribución restringida que sólo se encuentra en los bosques mesófilos de montaña de México y Guatemala, cuyas poblaciones son pequeñas, están fragmentadas y en decremento. El pavón actualmente se encuentra en peligro de extinción de acuerdo con la lista de la UINC (International Union for

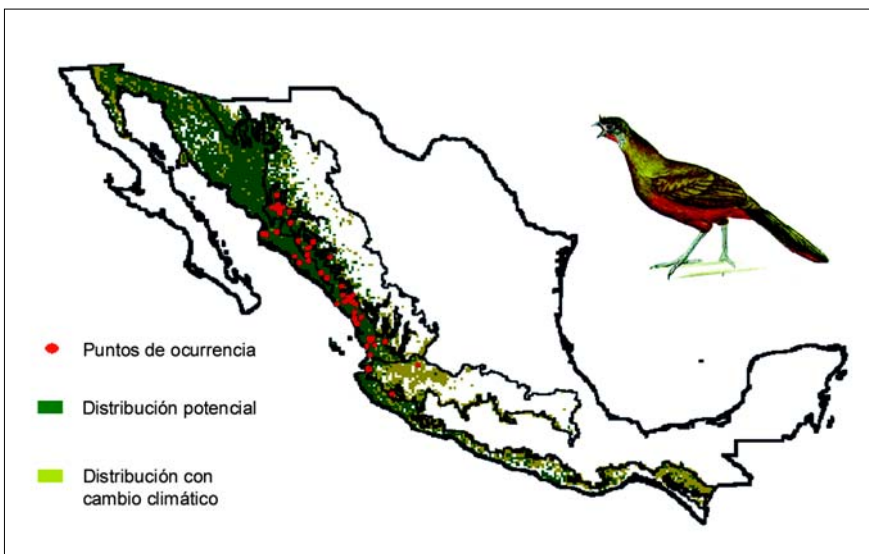


Figura 2. Áreas de similitud ecológica de distribución de la chachalaca *Ortalis wagleri* en distintos escenarios climáticos.

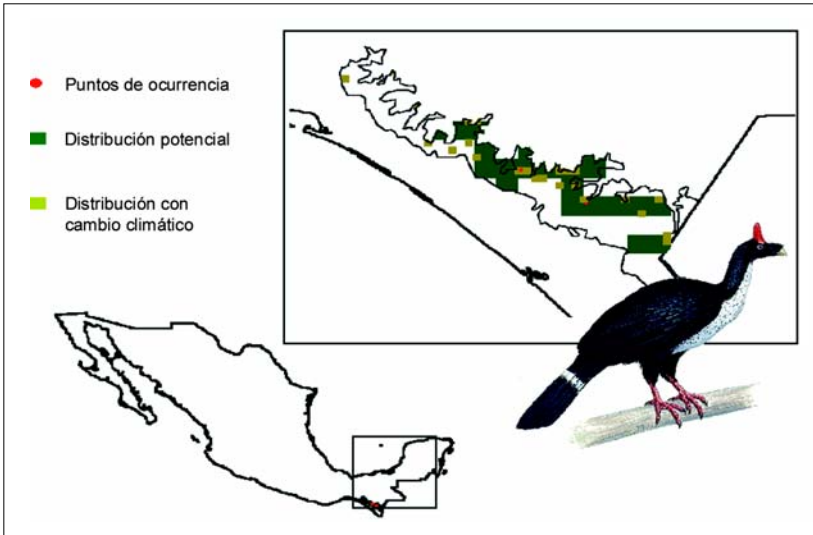


Figura 3. Áreas de similitud ecológica de distribución del pavón *Oreophasis derbianus* bajo distintos escenarios climáticos.

Conservation of Nature and Resources) (Hilton-Taylor 2000) y de la NOM-059-ECOL-2001 (DOF 2002). Esta especie probablemente sufrirá una mayor reducción de su hábitat (figura 3). Tras el cambio climático, el escenario de su distribución en 50 años refleja una dramática disminución de las áreas cubiertas por bosques mesófilos en Chiapas y, por lo mismo, una reducción considerable del rango de distribución de esta especie en México, así como una mayor susceptibilidad de riesgo que la actualmente definida.

#### Distribución de especies diagnósticas en bosques de coníferas y encinos

Como se mencionó anteriormente, los bosques de coníferas y encinos serán algunos de los tipos de vegetación que se verán desfavorecidos por el cambio climático. Por lo mismo, algunas de las especies más afectadas por estos cambios serán las especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*. Las especies diagnósticas que se seleccionaron de estos géneros para el análisis se consideraron en función de los límites de tolerancia ecológica en los cuales se desarrollan. Este conjunto de especies presenta una distribución tanto en ambientes húmedos y fríos como en templados y subhúmedos (cuadro 1).

CUADRO 1. EJEMPLO DE ESPECIES DE PINOS Y ENCINOS QUE CAMBIARÁN SU DISTRIBUCIÓN ACTUAL EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO USANDO EL MODELO HADCM2

ESPECIE	SUPERFICIE (% DE CAMBIO)	ESPECIE	SUPERFICIE (% DE CAMBIO)
<i>Pinus hartwegii</i>	-41,49	<i>Quercus mexicana</i>	-52,76
<i>Pinus herreraei</i>	-33,05	<i>Quercus laurina</i>	-46,17
<i>Pinus ayacahuite</i>	-29,98	<i>Quercus scytophylla</i>	-32,93
<i>Pinus durangensis</i>	-18,40	<i>Quercus rugosa</i>	-25,70
<i>Pinus arizonica</i>	-10,85	<i>Quercus sideroxyla</i>	-9,75
<i>Pinus douglasiana</i>	-10,74	<i>Quercus segoviensis</i>	-7,68
<i>Pinus montezumae</i>	-10,59	<i>Quercus peduncularis</i>	-7,47
<i>Pinus culminicola</i>	-9,51	<i>Quercus eduardii</i>	1,76
<i>Pinus teocote</i>	-9,27	<i>Quercus durifolia</i>	4,84
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-0,65	<i>Quercus crassifolia</i>	17,05
<i>Pinus rudis</i>	0,19	<i>Quercus elliptica</i>	21,12
<i>Pinus cembroides</i>	0,21	<i>Quercus laeta</i>	31,50
<i>Pinus chihuahuana</i>	2,46	<i>Quercus magnolifolia</i>	35,05
<i>Pinus patula</i>	20,42	<i>Quercus obtusata</i>	39,62
<i>Pinus strobiformis</i>	26,93	<i>Quercus castanea</i>	49,33
<i>Pinus oocarpa</i>	30,48	<i>Quercus crispipilis</i>	61,81
<i>Pinus leiophylla</i>	35,46	<i>Quercus acutifolia</i>	122,31

De acuerdo con los escenarios actuales y de cambio climático analizados para las 17 especies de pinos y las 17 de encinos, se observa que las especies de pinos que actualmente se localizan en climas fríos o semifríos y húmedos o subhúmedos, disminuyen su área de distribución (cuadro 1). Por ejemplo, *Pinus hartwegii* que es una especie que crece en bosques de coníferas y de coníferas y encinos, que habita en las partes altas de las zonas montañosas (entre los 2,500 y 4,000 msnm), en climas fríos o semifríos y húmedos y subhúmedos†disminuye su distribución en -41.5% de su superficie actual, en el escenario de cambio climático global considerado (figura 4). En dicha figura se observa la contracción de la superficie en donde actualmente se encuentra distribuida esta especie, en relación con la generada simulando el cambio climático.

Un ejemplo intermedio es *P. duranguensis*; esta especie habita en bosques de coníferas y encinos que disminuirán su área de distribución en -18.4%. *P. duranguensis* se distribuye en la Sierra Madre Occidental y crece en climas tanto semifríos y subhúmedos, como templados y subhúmedos. En tanto que las especies que incrementarán su área de distribución son

aquellas que actualmente se presentan en climas templados y secos, como *P. oocarpa*. Esta especie de distribución principal en bosques de coníferas y encinos de climas semicálidos subhúmedos y templados subhúmedos, podría incrementar su área de distribución en +30.5% (cuadro 1), de acuerdo con los escenarios predictivos generados con el modelo GARP.

Para el caso de los encinos, que son especies de mayor distribución que los pinos, ya que suelen habitar tanto en climas semifríos como templados, se observa que un mayor número de especies tenderá a incrementar sus áreas de distribución, dado que en un escenario de cambio climático se favorecerán los climas templados y cálidos. Por ejemplo: *Quercus rugosa* de distribución restringida y que requiere mayor humedad que las otras especies seleccionadas porque habita en bosques de coníferas y de coníferas-encinos en climas templados subhúmedos y semifríos subhúmedos, disminuirá su área de distribución en -25.7%. La especie *Q. laurina*, de amplia distribución en el país y que crece en climas de tipo templado subhúmedo y templado húmedo, en bosques de coníferas y encinos, bosque de coníferas y bosque de encinos, disminuirá su distribución en -46.2%. Finalmente, dentro del grupo de especies que el modelo predice que aumentarán su

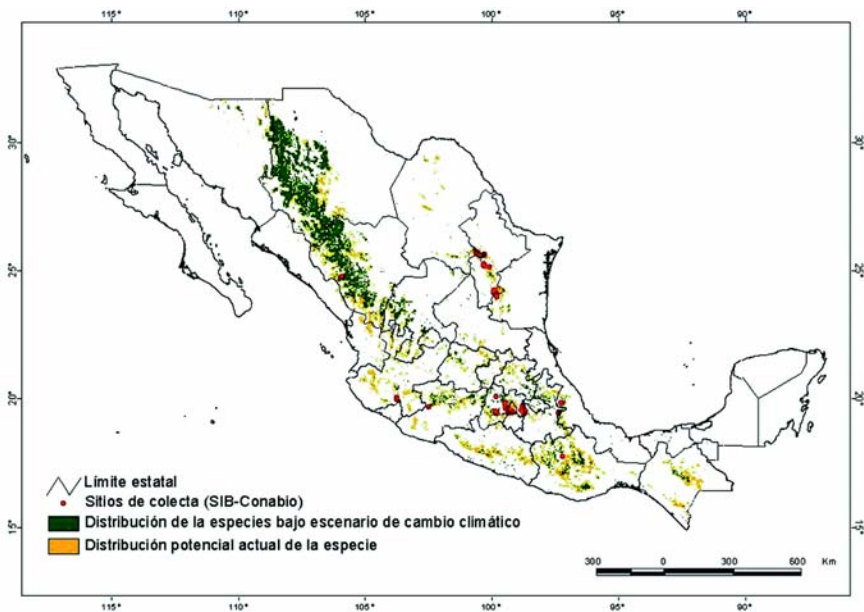


Figura. 4. Distribución potencial y en escenario de cambio climático global utilizando el modelo HadCM2 para *Pinus hartwegii*.

distribución en un +30.5% se encuentra *Q. laeta*, especie que habita en bosques de coníferas y encinos, bosques de encinos y medianamente en chaparrales y matorrales con climas de tipo templado subhúmedo.

Ante estos escenarios, aún no definitivos, se debe resaltar que al igual que los escenarios climáticos, los de la distribución futura de las especies, así como de la superficie ocupada por los distintos tipos de vegetación en México, tienen una gran incertidumbre. El aumento de las superficies de determinados tipos de vegetación no necesariamente se relaciona con el aumento en la abundancia o poblaciones locales de las especies que viven en él, ya que cada especie responderá de acuerdo con su capacidad de adaptación a los cambios climáticos y a la resiliencia de los ecosistemas en donde se distribuye.

Los aspectos coincidentes en los distintos ejercicios predictivos (Villers y Trejo 1998; y Peterson *et al.*, 2001 y 2002) realizados generando distintos escenarios sobre el cambio climático global en la biodiversidad de México, son que los tipos de vegetación más afectados negativamente serán los bosques de coníferas y encinos y los bosques mesófilos de montaña. Por lo anterior, es necesario empezar a diseñar estrategias para evitar la pérdida de la riqueza de especies que se mantiene en estos sistemas ecológicos de México.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Susana Valencia y José Delgadillo por sus comentarios en relación con la distribución actual de algunas especies de encinos y pinos, así como a Patricia Feria por su colaboración en algunos de los análisis espaciales de aves. Este trabajo se realizó con financiamiento parcial del CONACYT por medio del proyecto DAJ-J002/0728/99.

## BIBLIOGRAFÍA

- DOF (*Diario Oficial de la Federación*). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Publicado el 6 de marzo de 2002.
- García, E. 1997a. *Temperaturas máximas promedio*. Cartografía Digital. Escala 1:1,000,000. México: CONABIO.

- 1997b. *Temperaturas mínimas promedio*. Cartografía Digital. Escala 1:1,000,000. México: CONABIO.
- 1998a. *Isotermas medias anuales*. Cartografía Digital. Escala 1:1,000,000. México: CONABIO.
- 1998b. *Isoyetas medias anuales*. Cartografía Digital. Escala 1:1,000,000. México: CONABIO.
- Hilton-Taylor, C. (comp.). 2000. *2000 IUCN Red List of Threatened Species*. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: IUCN.
- INE- SEMARNAP (Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1997. *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México.
- Peterson, T., V. Sanchez-Cordero, J. Soberón, J. Bartley, R. Buddemeier y A. Sánchez-Navarro. 2001. Effects of global climate change on geographic distributions of Mexican Cracidae. *Ecological Modeling* 144: 21-30.
- , M. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sánchez-Cordero, J. Soberón, R. Buddemeier y D. Stockwell. 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature* 416: 626-628.
- Rzedowski, J. 1990. Vegetación potencial. IV.8.2. *Atlas Nacional del México*. Vol. II escala 1:4 000 000. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- 1998. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. En: T. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (comps.). *Diversidad Biológica de México. Orígenes y Distribución*. México: Instituto de Biología, UNAM.
- SEMARNAP-INEGI-UNAM (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Geografía. 2001. *Inventario Nacional Forestal*. Escala 1:250,000. México: SEMARNAP-INEGI-UNAM.
- Stockwell, D. y D. Peters. 1999. The GARP modeling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science* 13: 143-158.
- Stockwell, D. y R. Noble. 1992. Induction of sets of rules from animal distribution data a robust and informative method of data analyst. *Mathematics and Computers in Simulation* 33: 385-390.
- Villers, L. e I. Trejo. 1998. El impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia* 23: 10-19.

## Notas

---

\*Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.





# Los asentamientos humanos y el cambio climático global

*Adrián Guillermo Aguilar\**

## LA URBANIZACIÓN Y EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

LOS EFECTOS QUE EL cambio climático puede tener en los asentamientos humanos son particularmente importantes para México, debido a la rapidez con la que nos hemos convertido en un país predominantemente urbano. Actualmente el número de ciudades en el país es muy alto, y entre ellas encontramos no sólo las grandes metrópolis que son centros económicos de enorme importancia, sino además ciudades chicas y medianas vinculadas con actividades manufactureras, turísticas, petroleras y de prestación de servicios que desempeñan un rol productivo, comercial y de servicios muy relevante en las diferentes regiones del país.

A la vez que los centros urbanos son centros neurálgicos de la concentración económica y poblacional, son un ejemplo claro de las desigualdades socioeconómicas y las deficiencias de infraestructura que están presentes en nuestra sociedad. El acelerado proceso de urbanización que México experimentó en la última mitad del siglo veinte no permitió que la política urbana dotara al mismo ritmo de empleos y de servicios públicos (vivienda, drenaje, agua entubada etc.) a la población urbana. De esta forma, estas mismas deficiencias incrementan la vulnerabilidad de las ciudades a los probables cambios climáticos como se tratará de explicar más adelante.

El crecimiento de la población y su tendencia a concentrarse en ciudades es uno de los factores más importantes que propician la emisión de gases que aumentan la temperatura global del planeta, y que dan lugar al llamado “efecto invernadero” (ver el capítulo *¿Qué es el efecto invernadero?*, de R. Garduño, en la sección 1). El proceso de urbanización y las actividades eco-

nómicas asociadas a él, como la industria, la generación de electricidad o el transporte, crean en diferentes grados prácticamente todos los tipos de gases con efecto invernadero. De hecho, el bióxido de carbono es el gas que más se genera, y es producido sobre todo por el sector energético, que incluye toda la actividad industrial y el transporte, así como los usos residenciales y comerciales (ver los capítulos *Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México*, de L.G. Ruiz X. Cruz, y *Los principales países emisores, emisiones históricas*, de J. L. Arvizu, en la sección I).

De acuerdo con lo anterior, en cada país es necesaria una política para reducir la emisión de gases de efecto invernadero con el objeto de contribuir a disminuir los efectos de un cambio climático. Las acciones locales y de cada asentamiento cobran una gran importancia para mitigar los efectos del cambio climático (ver los capítulos de la sección IV).

## EL SISTEMA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS EN MÉXICO

La distribución de población en el nivel de localidad se ha caracterizado principalmente por: i) un notable incremento en el número de localidades predominantemente rurales que ha dado lugar a una gran dispersión de población; ii) una pérdida relativa de población rural que ha intensificado la concentración urbana; iii) la consolidación muy reciente de un cada vez más numeroso conjunto de ciudades intermedias receptoras de población metropolitana y de la actividad manufacturera que ha perdido la ciudad de México, y iv) el predominio de unas cuantas aglomeraciones metropolitanas que ocupan los primeros lugares del sistema urbano nacional (Aguilar y Graizbord 2002).

La distribución de población en el nivel de localidad rural en nuestro país se ha caracterizado por su dispersión atendiendo a la existencia de gran número de asentamientos humanos de pequeñas dimensiones. Del total de localidades rurales en 1995, que era de 199,768 asentamientos, que además representaban 99% del total de asentamientos en el país, 76% eran menores de 100 habitantes.

Nada más de 1970 a 1995, el número de localidades con menos de 2,500 habitantes aumentó a más del doble al pasar de 95,410 a 198,311; sin embargo, la población que concentraban esas mismas localidades disminuyó notablemente al pasar de casi 20 millones de personas en 1970, 41% del total nacional, a poco más de 12 millones de habitantes en 1995, 14% del total nacional. Es decir, aparentemente aumentó la dispersión de localidades, pero disminuyó la concentración de población en ese universo rural.

Para apreciar de manera más clara las diferencias en la distribución de población en el sistema urbano nacional es necesario distinguir al menos tres tamaños de centros urbanos: ciudades pequeñas (de 15 mil a 99 mil habitantes); ciudades intermedias (de 100 mil a 999 mil habitantes), y ciudades grandes (mayores a un millón de habitantes).

Es a partir de 1970 cuando esos asentamientos de dimensiones pequeñas incrementan su importancia, al grado de que en ese año llegaron a 218 (tres veces más que en 1950) y su población representó 14.4% del total. Para los siguientes 25 años, esos centros urbanos mantuvieron su importancia, y aunque su porcentaje de población disminuyó ligeramente (un punto porcentual), su número aumentó a 373.

Las ciudades intermedias, particularmente las de mayor tamaño, son cada vez más numerosas. El número de ciudades de 100 mil a menos de un millón de habitantes se incrementó de 32 en 1970 a 101 en 1995; pero la más marcada expansión se dio en los centros intermedios más grandes (entre 500 mil y un millón de habitantes), que pasaron de dos a 21 en el periodo, recibiendo mucho del impacto de la desconcentración y del acelerado crecimiento de la población urbana. En general, esas ciudades han mostrado una tasa de crecimiento promedio superior a las ciudades mayores de un millón de habitantes.

Durante muchas décadas, el término de “ciudad grande” estuvo asociado sin lugar a dudas a la gran aglomeración de la ciudad de México, pero sobre todo a partir de 1970, otras ciudades se han incorporado a esta categoría al sobrepasar el millón de habitantes y constituirse en indiscutibles metrópolis regionales, tal es el caso de Guadalajara, Monterrey y Puebla. Para 1995 ya existen en el país siete ciudades de esa dimensión. Un rasgo característico de esas ciudades en los últimos años es que su ritmo de crecimiento ha disminuido respecto a las ciudades intermedias. Sin embargo, su peso absoluto ha aumentado respecto al total del país: en 1970, la población que vivía en localidades mayores de un millón de habitantes, considerando toda su área metropolitana, representaba 24% de la población nacional, y para 1995 en ellas residía más de 30% de la población total del país.

## ELEMENTOS NO CLIMÁTICOS QUE AFECTAN LA VULNERABILIDAD

Existen varias tendencias socio económicas y ambientales que son características del desarrollo y transformación de los asentamientos humanos que

interactúan con los impactos del cambio climático y que pueden exacerbar o mitigar los efectos del cambio climático. El cambio climático, en sí mismo, no es probable que sea mucho más importante que otro tipo de factores de naturaleza económica o tecnológica; es la combinación con otros elementos de presión, como el crecimiento poblacional, lo que puede ocasionar que el cambio climático exacerbe la vulnerabilidad de un contexto sujeto a varios elementos de presión.

Entre los factores no climáticos que pueden afectar la vulnerabilidad de los asentamientos humanos podemos mencionar los siguientes:

1. *El crecimiento demográfico.* La mayor parte de las regiones y de los asentamientos en México se espera que sigan experimentando un crecimiento demográfico. Naturalmente, los ritmos de crecimiento son mayores al promedio para los centros urbanos que para el resto de las localidades, además de que ciertas regiones muestran crecimientos más rápidos; tal es el caso, por ejemplo, de la Región Centro, la Región Fronteriza del norte, y aquellos asentamientos vinculados con la actividad turística, la petrolera, la agricultura de exportación, y la manufacturera.

2. *Urbanización.* Este proceso se refiere a la proporción de población que vive en localidades urbanas (mayores a 15,000 habitantes). Actualmente más de 60% de la población nacional vive en centros urbanos, y esta misma tendencia hacia una sociedad predominantemente urbana indica que los probables cambios climáticos afectarán crecientemente a centros urbanos.

Las tendencias recientes señalan que los crecimientos más rápidos están sucediendo en ciudades medias de 100 mil a menos de un millón de habitantes y en una gran cantidad de ciudades chicas. Sin embargo, las ciudades más grandes del país: la ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, han alcanzado un tamaño sin precedentes y son el centro de enormes aglomeraciones metropolitanas.

3. *Niveles de pobreza.* La tendencia reciente muestra que la población que vive por debajo de la línea de pobreza se ha venido incrementando en el país. Una creciente proporción de esa población pobre se localiza en las áreas urbanas, y en números absolutos tiende a superar a aquella que se localiza en asentamientos rurales. En general, dicha población pobre no sólo obtiene un ingreso muy bajo, sino que, además, no tiene acceso a bienes

básicos como vivienda y servicios urbanos básicos. Una situación de pobreza reduce la capacidad de la población de tomar algún tipo de acción para adaptarse al cambio climático, e incluso puede exacerbar sus efectos.

4. *Sistemas de energía.* Estos sistemas muestran importantes cambios en años recientes. Cada vez más, el uso de combustibles naturales, como el carbón vegetal, es menos frecuente y es notable el incremento del consumo de energía eléctrica en la mayor parte de las actividades que se desarrollan en los asentamientos urbanos. Un calentamiento climático incrementaría la demanda por sistemas de enfriamiento, los cuales primeramente funcionan a partir de electricidad. Más que el sector residencial, es el sector comercial el que, por ejemplo, ha incrementado mayormente su demanda de sistemas de aire acondicionado.

5. *Sistemas de transporte y consumo de combustibles.* El transporte de personas y mercancías y su correspondiente consumo de combustibles fósiles se ha incrementado notablemente en el país (ver el capítulo *Opciones para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte*, de D. H. Cuatecontzi, J. Gasca y V. González, en la sección IV). Sobre todo a partir del acuerdo comercial con Estados Unidos, la cantidad de bienes que se transportan por carretera ha aumentado sensiblemente, junto con el número de carreteras pavimentadas y autopistas. Asimismo, la tenencia de automóviles continúa aumentando, particularmente en los centros urbanos, y seguramente contribuirá ampliamente a la contaminación atmosférica, que se puede agravar en episodios calurosos, y a la emisión de gases de tipo invernadero.

6. *Capacidad de los gobiernos locales.* La solución de muchos de los más graves problemas que se presentan sobre todo en los principales centros urbanos depende de la capacidad financiera y administrativa de un gobierno local. Entre estos problemas se pueden mencionar: el abastecimiento de agua, la construcción y mantenimiento de servicios públicos, la contaminación atmosférica, o la atención de emergencias urbanas. La capacidad de gobierno y unas finanzas sanas son factores importantes para mitigar efectos climáticos adversos.

## LOS IMPACTOS Y LA VULNERABILIDAD DE LOS ASENTAMIENTOS

Esta sección enfatiza dos aspectos importantes. En primer lugar, los sectores o componentes de los asentamientos humanos que se pueden ver impactados por un cambio climático; y en segundo lugar, el tipo de vulnerabilidad que se puede presentar en tales asentamientos.

Los impactos de un cambio climático en los asentamientos humanos está muy en función de la localización específica de cada localidad. Por lo mismo, es importante establecer una clasificación de asentamientos de acuerdo con el tamaño y también de acuerdo con la región, como, por ejemplo, asentamientos dependientes de la explotación de recursos naturales en zonas áridas; en zonas costeras, relacionados con la actividad turística; y urbanos y rurales.

La vulnerabilidad nos indica qué tan susceptible es un sistema a un cierto riesgo o peligro. En este caso, la vulnerabilidad define el grado en el que el cambio climático puede dañar un sistema. Este daño depende no sólo de la sensibilidad del sistema sino también de su habilidad para adaptarse a nuevas condiciones climáticas. Tanto la magnitud como el ritmo de cambio climático son importantes en la determinación de la sensibilidad, adaptabilidad y vulnerabilidad de un sistema.

En muchos casos, el impacto del cambio climático en un centro urbano dependerá más de la vulnerabilidad de los sistemas sociales que se ven afectados que de la propia magnitud física de los cambios ambientales. El cambio climático tendrá impactos diferenciales en distintas ciudades y regiones porque los diversos grupos sociales y los lugares serán en mayor o menor medida vulnerables a él. De aquí la necesidad de desagregar el análisis del cambio climático por zonas y por grupos sociales para evaluar en qué medida ciertos grupos sociales y lugares se verán afectados más amplia y rápidamente que otros (Liverman 1992).

Para explicar la mayor o menor vulnerabilidad es necesario referirse a las condiciones políticas, sociales y económicas de una sociedad. Es decir, condiciones de desarrollo desigual de cualquier ciudad o región contribuyen a que cierta población tenga peores condiciones de vida y a que ciertos lugares tengan un entorno más precario y frágil y, por tanto, a que ambos sean ambientalmente más vulnerables. La heterogeneidad que presenta el paisaje urbano en términos de condiciones físicas y niveles socioeconómicos hace que la evaluación de la vulnerabilidad sea una tarea difícil cuando se

toma en cuenta toda una área urbana. Dicho de otra manera, los grupos más vulnerables no siempre están en los lugares más vulnerables; por ejemplo, grupos pobres (socialmente muy vulnerables por falta de servicios y vivienda) pueden vivir en zonas poco vulnerables; y viceversa, población de alto nivel socioeconómico con alta capacidad de adaptación (dinero y tecnología) puede vivir en un ambiente frágil. Naturalmente, las condiciones más críticas estarán donde encontremos a la población más empobrecida que vive en ambientes ecológicamente muy frágiles.

A fin de definir de una manera más clara los elementos que se ven impactados, y el tipo de vulnerabilidad que se puede encontrar en los asentamientos humanos se presenta la figura 1. Este diagrama propone dirigir la atención a seis principales componentes de los asentamientos humanos que pueden ser particularmente vulnerables a un cambio climático:

*1. Espacio construido e infraestructura.* El espacio construido puede ser particularmente vulnerable si no cuenta con un diseño arquitectónico adecuado, por ejemplo, para zonas muy cálidas o de mucho viento; o presenta carencias de infraestructura o una distribución desigual de servicios básicos como drenaje y abasto de agua, lo cual en precipitaciones extremas puede incrementar el riesgo de inundaciones y deslizamientos de tierra. Asimismo, es necesario contar con grandes obras de infraestructura para drenaje pluvial del área urbana, para transporte público, o para zonas portuarias, particularmente en el caso de un eventual aumento en el nivel del mar.

*2. Alta concentración poblacional.* La vulnerabilidad a un cambio climático es baja cuando las densidades, o concentraciones de población por unidad de superficie, también son bajas. Frente a una eventualidad o cambio climático, una alta concentración poblacional incrementa la vulnerabilidad al aumentar el número de víctimas por unidad territorial; al aumentar el número de víctimas se incrementa el costo social de un cambio climático. Naturalmente que una alta vulnerabilidad estaría asociada a un mayor tamaño de asentamientos humanos, en los cuales se localiza un gran número de unidades industriales, viviendas y vehículos automotores (Scott, *et al.* 1996). Asimismo, los incrementos de población implican una demanda potencial de una serie de satisfactores básicos, algunos de los cuales dependen indirectamente de las variaciones climáticas; en este caso estarían los abastecimientos de agua, de energía y de alimentos.

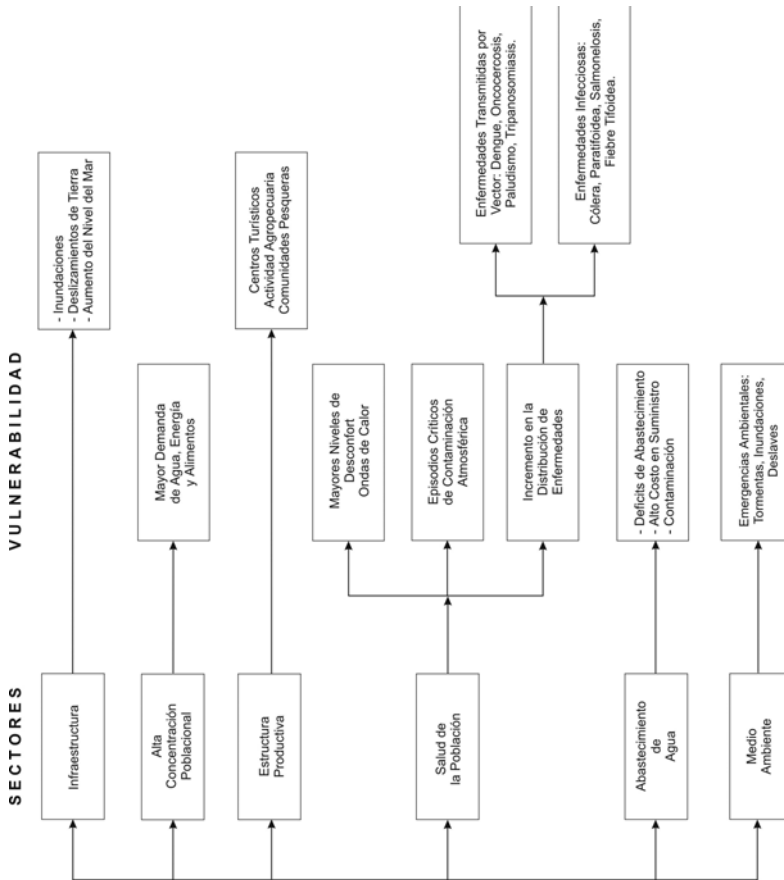


Figura 1. Impactos y vulnerabilidad en asentamientos humanos



3. *Estructura productiva*. Un cambio climático puede tener efectos negativos en actividades productivas que se desarrollan en ciertos asentamientos, debido a su estrecha relación con el paisaje o los elementos del medio natural. Los ejemplos más representativos serían las comunidades que para su subsistencia dependen de la caza y la producción agrícola, lo cual indirectamente afecta en varias circunstancias la producción de alimentos y los medios de vida de esa población; una situación similar sucede con las comunidades pesqueras, o los centros turísticos, que se pueden ver afectados por un cambio en el régimen de precipitación o un incremento en el nivel del mar.

4. *Condiciones de salud*. De existir un calentamiento generalizado de la atmósfera, los mayores impactos se manifestarán en tres aspectos: primero, aumento en los niveles de *desconfort* debido a ondas cálidas; en el caso de México hay estudios que reportan variaciones en el índice de *confort* para la ciudad de México, que se puede agravar con un cambio climático (véase Jáuregui y Tejeda 1999). Segundo, más probabilidad de episodios críticos de contaminación atmosférica con un aumento en los niveles de ozono. Y tercero, un incremento en la distribución de varias enfermedades transmitidas por vector e infecciosas, algunas de las cuales se desplazarán hacia latitudes superiores.

En cuanto a dispersión de las enfermedades, hay que diferenciar dos grupos de enfermedades de acuerdo con la forma de transmisión: en el primer grupo, la transmisión a la población se realiza por medio de un agente intermedio infeccioso, generalmente un insecto (vector) que se desarrolla en ciertas condiciones de temperatura, humedad y presencia de cuerpos de agua. El segundo grupo se refiere a enfermedades infecciosas que se relacionan directamente con la distribución y calidad del agua superficial; en este caso habrá condiciones propicias en zonas de inundaciones o en áreas con servicios de drenaje deficiente.

Una alta vulnerabilidad urbana a las enfermedades relacionadas con el clima necesariamente combinará las siguientes condiciones: mayor precipitación, mayor humedad, temperaturas más cálidas, así como condiciones sanitarias deficientes. Una mayor precipitación puede causar la obstrucción de redes de drenaje, inundación de vías de comunicación y, en general, inundaciones y estancamientos de agua que seguramente tendrán efectos negativos en la salud humana. Si a lo anterior se agregan áreas de asentamientos popu-

lares con graves carencias de servicios públicos, se crea un ambiente propicio a la expansión de enfermedades infecciosas relacionadas con el agua, como cólera o paratifoidea, así como aquellas transmitidas por vector, como el dengue o el paludismo. Estas últimas son el típico ejemplo de enfermedades que se podrían desplazar de latitudes tropicales hacia zonas más templadas.

5. *Abastecimiento de agua.* La disponibilidad del recurso agua está en relación directa con las condiciones climáticas, específicamente con el mayor o menor volumen de precipitación. Con una población más numerosa y con ciudades más grandes, el consumo de agua por habitante se incrementará sustancialmente en el futuro cercano. Algunos estados con altas densidades de población o con presencia de grandes ciudades, como el Distrito Federal, Estado de México, Jalisco o Nuevo León, registrarán los consumos de agua por habitante más altos en el país, ade proximadamente 350 litros diarios.

Esta situación puede ser particularmente crítica si en el centro del país el clima se vuelve más seco, con temperaturas más cálidas y con más bajos niveles de precipitación. Y si a lo anterior agregamos una alta concentración poblacional, tendremos como resultado asentamientos altamente vulnerables, con enormes dificultades para obtener futuros suministros de agua por el enorme costo que significará la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento. A lo anterior hay que agregar que las inundaciones pueden contaminar la fuentes de abastecimiento e incluso las plantas de tratamiento de agua.

6. *Medio ambiente.* Algunas características del medio natural pueden dar lugar a emergencias ambientales y agravar las condiciones de vulnerabilidad. Las condiciones de riesgo más evidentes son las que se crean a partir del relieve, que pueden agravar deslizamientos de tierra; y la configuración de los cauces naturales que en combinación con lo anterior pueden favorecer las inundaciones; también las fuentes de abasto de agua pueden volverse escasas en un escenario de menor precipitación. En ciertas condiciones climáticas extremas se suceden ciertos eventos ambientales también extremos que causan no sólo una disrupción de la vida urbana sino además la pérdida de vidas humanas y bienes materiales. Es probable que estos eventos aumenten su frecuencia y su intensidad en condiciones de cambio climático.

## POLÍTICAS DE MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN

La administración y el gobierno local de los asentamientos deben de coadyuvar a reducir los riesgos medioambientales, incluyendo aquellos que se derivan de un cambio climático. Este tipo de medidas deben de incluirse en planes de desarrollo integrales que incluyan impactos ambientales. En esencia es necesario construir capacidad institucional para el manejo ambiental.

Deben de existir planes de acción para cada tipo de problema ambiental, pero las soluciones deben de estar interconectadas y no plantearse de manera aislada. Estos planes deben de ser participativos e incorporar a todos los actores sociales posibles. La disseminación de información a todo público es esencial.

Es necesario ampliar el análisis de casos de estudio empíricos sobre los impactos del cambio climático y de las posibles respuestas para tener un mejor entendimiento de esta relación. Estos casos de estudio deben ser representativos de asentamientos rurales y urbanos, y de diferentes condiciones climáticas, húmedas, áridas, costeras, etc.

En términos más específicos se pueden señalar políticas de mitigación como las siguientes: una política de disminución y/o reorientación de flujos migratorios, así como estrategias económicas para redistribuir población a zonas menos vulnerables. Acciones para establecer un sistema de monitoreo de morbilidad para la vigilancia del comportamiento epidemiológico de las diversas enfermedades relacionadas con el clima, en un seleccionado grupo de asentamientos. Estrategias orientadas a evitar el desperdicio del recurso agua, y a disminuir los niveles de consumo del mismo. La recurrencia de las emergencias ambientales hace necesario controlar los asentamientos en zonas no aptas para la urbanización, y construir las obras adecuadas de drenaje y contención para mitigar estos posibles efectos. En el nivel local es recomendable la construcción de infraestructura en las zonas más vulnerables, la cual es generalmente de alto costo; por ejemplo, para inundaciones o aumento del nivel del mar, algún tipo de barreras o diques, o sistemas de bombeo de agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, A. G. 2000. Los asentamientos humanos y el cambio climático en México. Un escenario futuro de vulnerabilidad regional. En: C. Gay (comp.) *México: una*

- visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*, México: INE, SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program.
- 1995. El cambio climático global y la vulnerabilidad de asentamientos humanos en México ante el cambio climático. En: *Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. México ante el cambio climático*. Pp. 203-211. INE, U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM, 18 al 22 de abril de 1994, Cuernavaca, Morelos, México.
- y B. Graizbord. 2002. Concentración y dispersión de la población en México, 1940-1995. En: J. Zubieta y B. Graizbord (eds.) *Concentración y dispersión de la población en México, 1940-1995* (título provisional). México: UNAM- Instituto de Investigaciones Sociales, El Colegio de México, CONAPO.
- Jáuregui, E. y A. Tejada. 1999. Un escenario de las condiciones bioclimáticas en la ciudad de México. Pp. 195-211. En: C. Gay (comp.) *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*. México: INE, SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program.
- Liverman, D. 1992. Global change and México. *Newsletter College of Earth and Mineral Science* 60: 71-76.
- Sánchez, R. 1994. Cambio climático y sus posibles consecuencias en las ciudades de México. Pp. 213-220. En: *Primer Taller de Estudio de País: México ante el cambio climático*. Cuernavaca, Morelos, México.
- Scott, M. y A. G. Aguilar. 1996. Human settlements in a changing climate: impacts and adaptations. Pp. 399-426. En: R. T. Watson (eds.) *Climate change 1995: impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analysis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- , y S. Gupta. 2001. Human settlements, energy and industry. Pp. 383-416. In: J. J. McCarthy *et al.* (eds.) *Climate change 2001: impacts, adaptations and vulnerability*. Cambridge: IPCC, Cambridge University Press.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 2000. *Estrategia Nacional de Acción Climática*. Documento para Consulta Pública. México: SEMARNAP.

## Notas

---

1. Investigador titular, Instituto de Geografía, UNAM. El autor agradece la colaboración de la Mtra. Irma Escamilla en la recopilación documental y el procesamiento estadístico.

# La variabilidad climática en los registros instrumentales de México

*Ernesto Jáuregui\**

## INTRODUCCIÓN

LAS PRIMERAS OBSERVACIONES instrumentales del clima en México fueron hechas por el jesuita Antonio Alzate en la ciudad de México en el año 1769. Dichas observaciones (de temperatura y precipitación) duraron solamente 9 meses de ese año (Mosiño y Leyva 1997). En la primera mitad del siglo XIX se realizaron en el valle de México observaciones de precipitación que se prolongaron por varios años. No fue sino hasta el último tercio de dicho siglo cuando se estableció una red de observatorios que comprendió gran parte del país (Jáuregui 1979). Al principiar el siglo XX aparecieron los primeros trabajos que resumen el clima y sus variaciones extremas en el país. Así, Escobar R. (1903) fue el primer meteorólogo que intentó hacer un análisis de las tendencias de la precipitación en México. Escobar encontró que durante 1878-1901, el periodo más seco en el centro y norte del país correspondió a los años de 1892-1896. Escobar concluyó que “la causa de la disminución de las lluvias en el periodo estudiado debe haber sido una extraña a la acción del hombre”. Otro climatólogo de aquel tiempo, Manuel Moreno (1894) al reseñar las lluvias en Tacubaya, señalaba que “entre los años analizados figura el de triste memoria de 1892, año escasísimo en lluvias en casi todo el país”. Al finalizar el siglo XIX y principios del siguiente, Puga (1895) documentó una serie de 16 tormentas de fin del invierno ocurridas al final del siglo XIX (1878-1895) que vinieron acompañadas de descenso marcado de temperatura, lluvias, granizo, vendavales y en algunos casos de nevadas en las montañas. Esta condición de clima extremo está asociada a penetraciones profundas de masas de aire polar en los trópicos

que ocurrieron con mayor frecuencia en aquel periodo y que parecen haber estado ligadas a las condiciones de sequía que prevalecieron entonces (Jáuregui 1997).

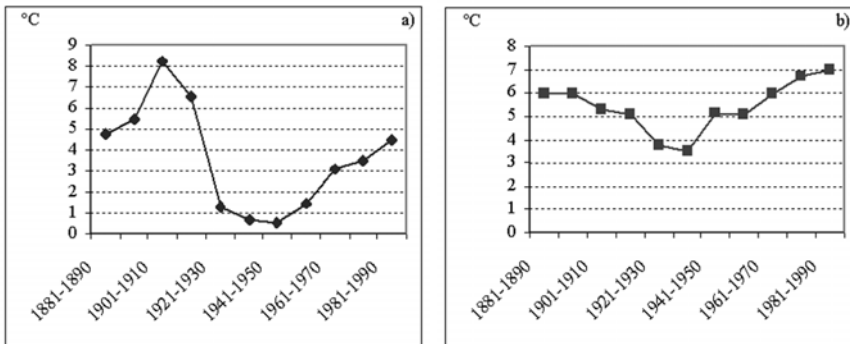
En relación con el quinquenio 1892-1896, los boletines del Observatorio Meteorológico consignan, por ejemplo, que “en junio de 1892 la sequía fue tan prolongada que mucho ganado murió en el norte”. También en el año seco de 1894 hubo escasez en el campo y se importaron granos de los Estados Unidos. Simultáneamente con la deficiencia de lluvias en verano se observaron en la última década del siglo XIX inviernos más crudos, además de en el valle de México, en gran parte del país. Por citar algunos ejemplos, en 1881 las invasiones de aire polar ocasionaron heladas en Ozuluama, Veracruz, sobre la planicie costera. Esta tormenta invernal produjo también nevadas en Ciudad Victoria y en Zacatecas, y aun en Oaxaca (Noble y Lebrija 1957). En febrero de 1896 cayó una fuerte nevada en Zacatecas (de una vara de altura); un año después, las nevadas se abatieron sobre Monterrey, Saltillo y Laredo. Estas penetraciones anormalmente intensas de aire polar en los trópicos son características de una marcada circulación meridional que prevaleció al finalizar el siglo XIX en el hemisferio norte y que en el Atlántico norte se manifestó por una baja frecuencia de tipos sinópticos (de superficie) llamados del ‘Oeste’ (Lamb 1966).

#### LA VARIABILIDAD DE LAS SERIES DE TEMPERATURA DE LARGO PERIODO DEL SIGLO XX EN MÉXICO

Lamb (1966) advirtió asimismo un cambio aparente en la circulación a escala hemisférica que prevaleció en los años de la década de 1960 que se caracterizó según lo dicho por el autor, por un desplazamiento de los sistemas atmosféricos de gran escala como son los ‘Oestes’ del Noratlántico y correspondientes a celdas anticiclónicas semipermanentes. A escala de la América tropical, Sánchez y Kutzbach (1974) encontraron anomalías negativas de temperatura y precipitación (con relación al periodo de referencia 1931-1960) en la década de los sesenta, para México y Centroamérica, que ellos atribuyeron a un corrimiento hacia el sur de los sistemas hemisféricos de circulación atmosférica. Usando datos del viento máximo invernal en estaciones costeras (Tampico, Veracruz), Jáuregui (1997) detectó un incremento de los vientos máximos del norte en la década de los sesenta sugiriendo una mayor presencia de las invasiones de aire polar en dicho perio-

do en la vertiente del Golfo de México y, en consecuencia, la ocurrencia de temperaturas invernales anormalmente bajas. Tanto el periodo frío de finales del siglo XIX como el de la década de los sesenta han sido documentados recientemente para Norteamérica por Díaz y Bradley (1995), señalándose una alta relación entre la variabilidad climática de invierno en dicha región y la correspondiente en nuestro país. Sin embargo, el periodo de inviernos fríos de los años 1920 a 1940 detectados en el centro de México (gráfica 1) no tienen una correspondencia con los cambios a escala del continente de Norteamérica. Lo anterior hace ver que las variaciones climáticas a escala local o regional no necesariamente reflejan siempre las correspondientes a una mayor escala.

GRÁFICA 1. VARIACIÓN DECENAL DE LA TEMPERATURA MÍNIMA MEDIA DE ENERO DURANTE 1881-1990 EN A) GUADALAJARA Y B) TACUBAYA, D.F.



Los estudios sobre variabilidad climática arriba mencionados han sido posibles una vez que se ha contado con series climatológicas suficientemente largas. Desafortunadamente, la red climatológica del Servicio Meteorológico Nacional iniciada formalmente en la década de 1920 comenzó a reducirse a partir de 1980 y sólo se mantienen en funcionamiento y sin interrupciones, un número limitado de estaciones climatológicas y observatorios.

Según las estimaciones de escenarios de cambio climático propuestas para México por Magaña *et al.* (1999), el clima del país al mediar el presente siglo será en términos muy generales más cálido (2 a 3°C) y algo más seco sobre todo en la región norte y centro del país donde prevalecen los climas

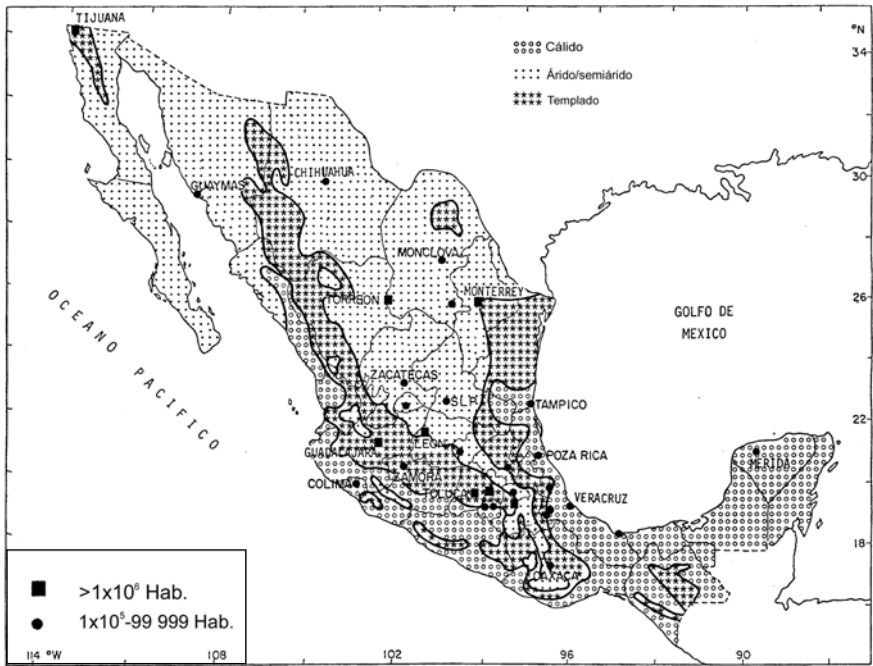


Figura 1. Los climas y las zonas metropolitanas de México.

áridos y semiáridos (figura 1). Estos cambios se prevén para cuando se dupliquen los niveles de concentración de los gases de efecto invernadero (ver el capítulo *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad climática y el cambio climático en México*, de V. Magaña *et al.*, en esta sección). Si bien ya hay algunas señales del impacto de este cambio gradual en el ámbito rural (en las actividades agrícolas y en los bosques) al correspondiente impacto en las ciudades se suma el efecto de la urbanización. El resultado es que el calentamiento del aire en las áreas urbanas está ocurriendo con mayor rapidez que el originado por el efecto invernadero como se verá más adelante.

#### LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX

La figura 1 muestra la variabilidad decenal de la temperatura mínima de enero durante el siglo xx (y desde finales del xix) para las dos ciudades más grandes del país. En ambas curvas se advierte, en primer lugar, que el perio-



do más frío ocurrió entre 1920-1950 y, en segundo lugar, el de los inviernos fríos de fines del siglo XIX (véanse las curvas de Guadalajara, figura 4k, y de Puebla, figura 4j). A esta escala de variabilidad por décadas no se percibe el periodo frío ocurrido en los años sesenta, cuando por otro lado comenzaba ya la urbanización creciente a afectar los registros de temperatura.

## LAS VARIACIONES CLIMÁTICAS EN MÉXICO EN LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XX

Al mediar el siglo XX se intensificaron los movimientos migratorios del campo a la ciudad, y en las últimas décadas se experimentó un proceso de redistribución de la población urbana, desplazándose a algunas ramas industriales del centro hacia el occidente y norte del país. El resultado ha sido que las grandes ciudades disminuyeron su crecimiento, mientras que las ciudades intermedias experimentaron crecimientos considerables (CONAPO 2000). En el año 2000, el país contaba con 364 ciudades de más de 15,000 habitantes. De este total de ciudades se identificaron 31 con características metropolitanas que albergaban 42.3 millones de mexicanos (figura 1). De estas cifras se desprende la relevancia que tiene el estudio del impacto que tendrá el cambio climático en el conjunto de la población urbana del país (ver el capítulo *Los asentamientos humanos y el cambio climático global*, de G. Aguilar, en esta sección).

En la misma gráfica 1 se advierte el aumento de la temperatura a partir de los años cincuenta en las metrópolis de Guadalajara y el D.F., a medida que dichas ciudades crecieron.

Es un hecho establecido que la sustitución de suelo natural por elementos urbanos como calles, banquetas, edificios, etc., modifica el clima, volviendo al aire urbano más tibio y, en general, más seco que el del entorno rural. De modo que mientras más extensa sea la ciudad mayor será el contraste térmico urbano/rural. Este fenómeno se conoce como la isla de calor. En un área urbana tan extensa como la de la capital del país, el aire tibio puede tener una temperatura hasta 8°C más elevada en el centro histórico que la correspondiente a la del entorno rural en una mañana fría (figura 2).

Este contraste térmico alcanza su máximo valor al amanecer, para luego decrecer a un mínimo en las horas de la tarde. El fenómeno se refleja en un aumento continuo de la temperatura urbana a través de los años (de 1.5°C en la temperatura media anual durante el siglo XX; Jáuregui 1995) y a medida

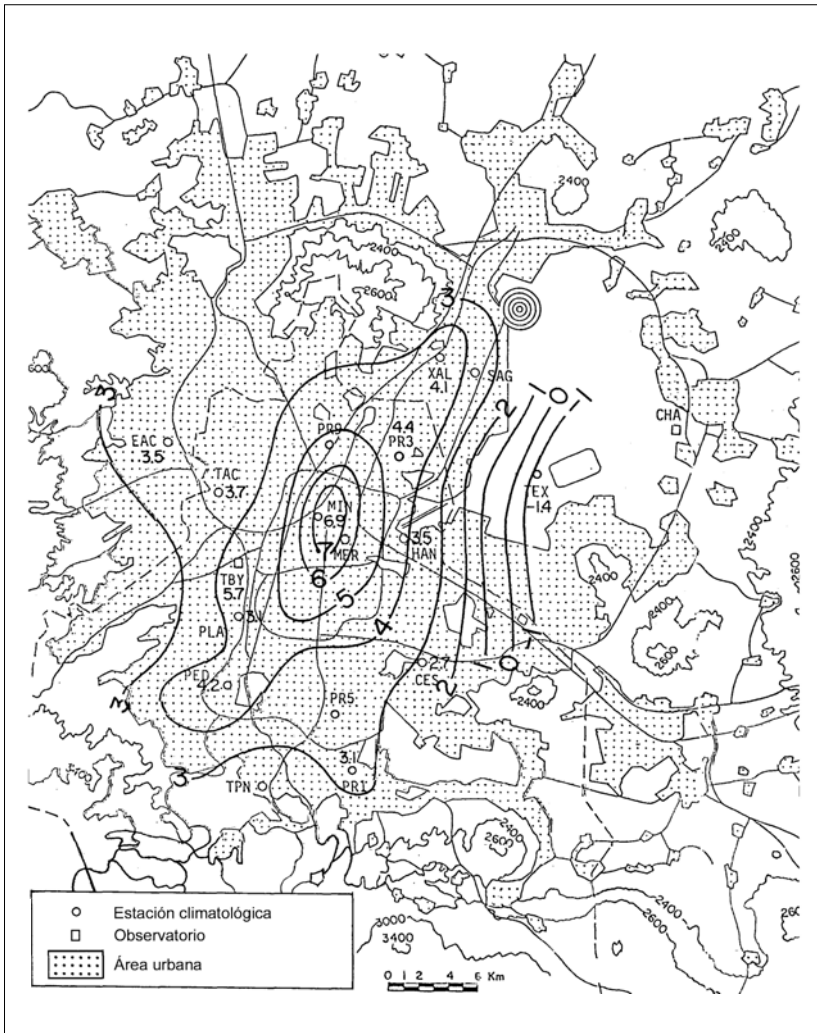
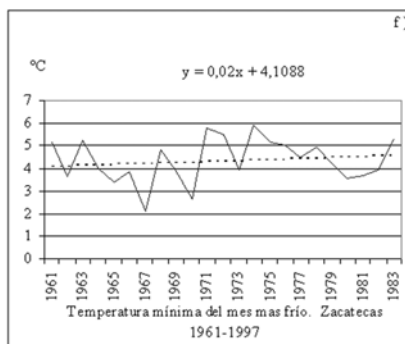
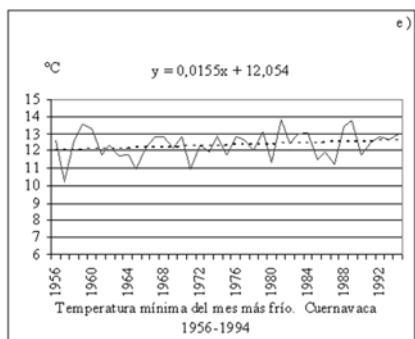
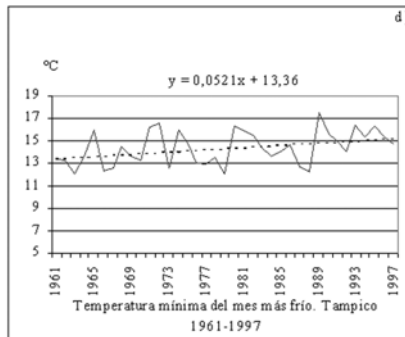
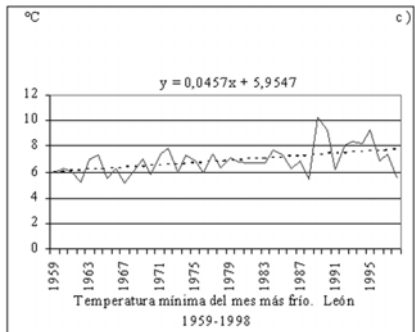
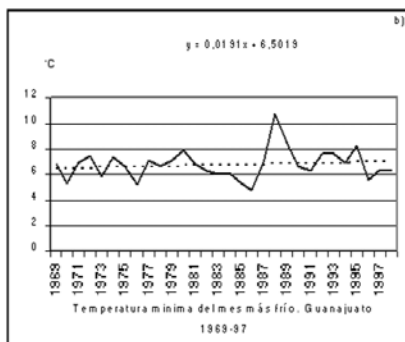
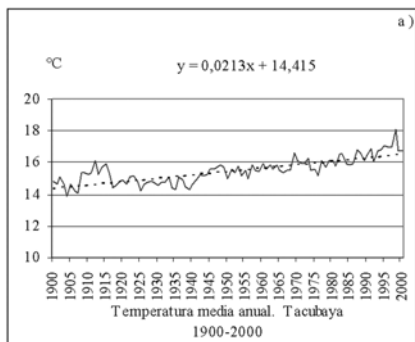
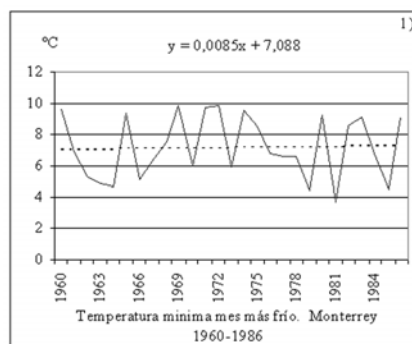
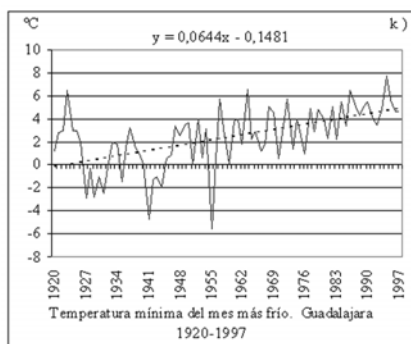
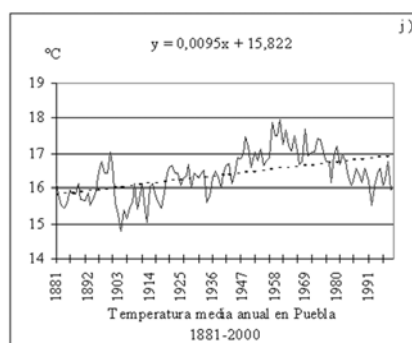
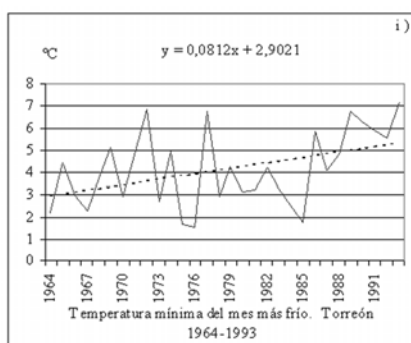
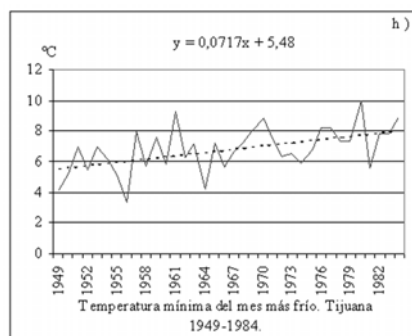
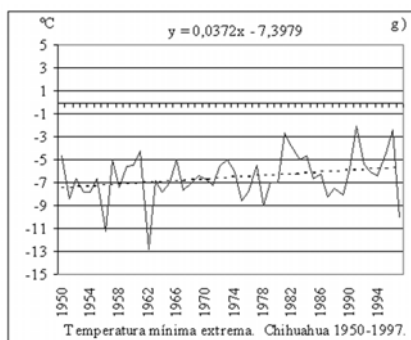


Figura 2. La isla de calor en la ciudad de México (°C), 13 de enero de 1997 a las 6 pm.

que crece la ciudad, enmascarando el incremento térmico (más gradual) de escala global originado por el efecto invernadero (ver el capítulo *¿Qué es el efecto invernadero?*, de R. Garduño, en la sección 1). Estos dos componentes antropogénicos se suman a la variabilidad natural del clima (ver el capítulo *El cambio climático global: comprender el problema*, de V. Magaña *et al.*, en sección 1). De modo que dicha variación natural se manifiesta en general en los escasos registros instrumentales disponibles que comprenden la prime-

GRÁFICA 2. VARIACIONES DE LA TEMPERATURA DURANTE EL SIGLO XX EN ALGUNAS CIUDADES MEDIAS Y GRANDES DE MÉXICO





ra mitad del siglo xx, cuando la urbanización se limitaba a unas cuantas ciudades de mediana extensión. Es así que mediante estos registros se han podido detectar los periodos de inviernos fríos mencionados con anterioridad, los cuales reflejaron en mayor medida una manifestación de la variabilidad climática natural ocurrida en el pasado reciente en el país.

Ya en la segunda mitad del siglo xx, la tendencia al calentamiento del aire urbano se percibe también en otras ciudades medias y grandes del país de rápida expansión urbana, como se ilustra en la gráfica 2. La rapidez de dicha elevación de temperatura se debió (entre otros factores) a la velocidad con la que se extendió el tejido urbano en cada caso, así como a la actividad industrial y vehicular. Conviene tener presente que dicho incremento de temperatura (expresado en °C/año en el coeficiente de x en la ecuación de regresión adjunta a cada gráfica) es casi siempre mayor que el atribuido al efecto invernadero, el cual junto, con la variabilidad natural, forma parte del calentamiento del aire urbano ilustrado en las curvas de la figura 4.

## DISCUSIÓN

En el presente capítulo se han examinado brevemente las variaciones del clima termal ocurridas en México durante el periodo de observaciones instrumentales sistemáticas que generalmente abarcan de fines del siglo xix hasta finales del xx. Los periodos fríos documentados corresponden: el primero a finales del siglo xix, el segundo y el más extremo ocurrió en las décadas 1920, 1930 y 1940. Un último se presentó en la década de los años sesenta. La creciente urbanización del país en décadas recientes se ha reflejado en una tendencia generalizada al calentamiento del aire en las ciudades medias y grandes. Esta tendencia que incluye el calentamiento originado a escala global por el efecto invernadero tiende a incrementar su variabilidad, por lo que es probable que las ondas de calor aumenten su frecuencia e intensidad en los centros urbanos. Además, es probable que su impacto sea mayor en las ciudades del centro y norte semiárido/árido del país donde la temperatura de los meses del verano es ya de por sí agobiante. Si a esta condición de altos niveles de temperatura se suma la tendencia de las lluvias a decrecer en el norte del país, según prevén los modelos de escenarios climáticos, la situación podrá tornarse crítica y dar lugar a una mayor incidencia de casos de insolación, o *heat strokes*, de enfermedades cardiovasculares y de padecimientos gastrointestinales por la ingesta de agua contaminada.

Los estudios de variabilidad climática y su tendencia sólo son posibles cuando se cuenta con información climatológica confiable generada por la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Es de lamentar que a partir de la década de los ochenta, dicha red haya sufrido un deterioro considerable en cuanto al número de estaciones en operación. Es inútil decir que la continuidad y calidad de las observaciones meteorológicas que se llevan a cabo en la red nacional del SMN es requisito indispensable para realizar (entre otros) los estudios de variabilidad climática en México. La suspensión del funcionamiento de una estación climatológica implica la pérdida irreparable de la información que se dejó de generar. Sin embargo, esto no debe ser obstáculo para iniciar un programa de renovación y modernización de la red meteorológica nacional.

En resumen, mediante los registros de temperatura de largo periodo se han podido identificar las variaciones climáticas ocurridas en México desde finales del siglo XIX al presente. Cabe señalar la tendencia generalizada en décadas recientes al calentamiento del aire urbano en las ciudades grandes del país. Finalmente, y a la luz de los resultados aquí presentados, conviene destacar que si las ciudades son los puntos donde se gasta la mayor cantidad de energía, el sistema urbano interactúa tanto con el clima regional como a la escala global, como lo señala Oke (1993).

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Elda Luyando y Mario Casasola por el apoyo en el procesamiento de datos y gráficas. Alfonso Estrada realizó los dibujos. El autor agradece al Servicio Meteorológico Nacional por haber proporcionado la información climatológica.

## BIBLIOGRAFÍA

- CONAPO (Consejo Nacional de la Población). 2000. *La distribución territorial de la población en México*. Disponible en: <http://www.conapo.gob.mx>.
- Díaz, H. y R. Bradley. 1995. Documenting Natural Climatic Variations; How different is the Climate of the xxth Century from that of Previous Centuries? Pp. 17-31. En: *Natural Climate Variability on Decade-Century Time Scales*. National Academy Press.
- Escobar, R. 1903. El régimen de las lluvias en México. *Boletín Mensual Observatorio Meteorológico Central de México* 9: 536.

- Jáuregui, E. 1979. Algunos aspectos de las fluctuaciones pluviométricas en México, en los últimos 100 años. *Boletín del Instituto de Geografía* 9: 39-64.
- 1995. Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la ciudad de México debidas a la urbanización. *Boletín de Investigaciones Geográficas* 31: 9-43.
- 1997. Climate changes in Mexico during the historical and instrumented periods. *Quaternary Int. Pergamon Elsevier Science, Engl.* 43: 7-17.
- Lamb, H. (1966). Climate in the 1960's. *Geographical Journal* 2(132): 183-212.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez y C. Gay. (1999). Evaluación de escenarios climáticos regionales de clima actual y de cambio climático en México. Pp. 1-39. En: C. Gay (comp.) *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*. México: INE-SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program.
- Moreno, M. 1894. Las lluvias en Tacubaya. *Bol. Observatorio Astronómico* 1: 324.
- Mosiño, P. y A. Leyva. 1997. Observaciones meteorológicas en la Cd. de México durante 1769. Pp. 149-165. En: C. Noriega, J. Vidal y G. Rodríguez (eds.) *Memorias del VII Congreso Nacional de Meteorología*. México.
- Noble y M. Lebrija. 1957. La sequía en México y su previsión. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística* 2(84): 1-3.
- Oke, T. R. 1993. Global change and urban climates. Pp. 123-134. En: *Proceed. 13<sup>th</sup> Int. Congress Biometeorology*, September 12-18, 1993. Calgary, Canada.
- Puga, G. 1895. *Tempestades de fin del invierno en el valle de México*. México: Tipografía Secretaría de Fomento.
- Sánchez, W. y J. Kutzbach. 1974. Climate of the American Tropics in the 1960's. *Quart. Research* 4: 128-135.

## Notas

---

\* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.





# Evaluación de la vulnerabilidad en zonas industriales

*María Teresa Sánchez-Salazar\**

## MARCO DE REFERENCIA

LA INDUSTRIA HA SIDO un sector poco estudiado en términos de su sensibilidad climática, en virtud de la percepción de su relativamente baja sensibilidad y de su gran poder de adaptación al cambio climático (Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming *et al.* 1992). La mayor parte de los estudios corresponden a los países desarrollados y se refieren, sobre todo, al tema de la adaptación y mitigación de los impactos del cambio climático (Lindh 1992, Georgas y Perissoratis 1992, Acosta y Skea 1994, Kashiwagi 1994, Romero 1995, y IPCC 2001). Asimismo, aún se percibe una ausencia y dispersión de estudios regionales que asocien las tendencias del clima con los impactos de este fenómeno en la población y en las actividades económicas (Smith *et al.*, 2001); lo anterior también se aplica a nuestro país (ver el capítulo *Los asentamientos humanos y el cambio climático global*, de G. Aguilar, en esta sección).

Por otra parte, la literatura antes citada, en su análisis de los impactos potenciales del cambio climático, considera solamente el comportamiento actual de las actividades y hace abstracción de las tendencias de transformación de la economía mundial y de la multiplicidad de factores que la afectan, aun cuando la mayoría de los países se encuentran, hoy día, insertos en el proceso de globalización económica, la cual ha provocado situaciones recesivas en diversos sectores económicos, en particular el industrial, sobre todo en los países en vías de desarrollo, lo cual forzosamente limita su capacidad de inversión y de adaptación al cambio climático.

De ahí que los objetivos del estudio que se hizo sobre la vulnerabilidad de la industria destacan los factores que inciden en la sensibilidad climática

de las distintas ramas industriales y su nivel de incidencia; y determinan, para el caso de México, las diferencias territoriales en la vulnerabilidad de dichas ramas, frente a una situación de cambio global, aplicando los modelos CCCM y GFDL-R30 (Sánchez-Salazar *et al.* 1995, Sánchez-Salazar 1995, y Sánchez-Salazar y Martínez 1999).

Aun cuando la industria sea considerada poco vulnerable en comparación con otros sectores de la economía, al interior de ella se aprecia que las diversas ramas industriales tienen entre sí diferencias relativas notables en su grado de sensibilidad climática (cuadro 1). Ello se debe a una serie de factores de diversa índole (económicos y derivados del cambio climático), entre los que se pueden mencionar: la importancia económica de la rama (participación en el PIB); su contribución a la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera; el tamaño de la empresa; la dependencia de recursos naturales sensibles al clima; las necesidades de la cadena productiva en cuanto a consumos de energía y agua, y la integración de procesos de calentamiento o enfriamiento; la competencia por ambos recursos con otras actividades; y los mercados sensibles al clima y la ubicación geográfica costera o ribereña (por el peligro a la inundación o al ascenso del nivel del mar). Todos ellos van a influir necesariamente en su nivel de vulnerabilidad frente al cambio climático. Con base en ello, las industrias mexicanas pueden clasificarse en los siguientes grupos:

*A) Industrias que dependen de recursos naturales sensibles al clima: agropecuarios, forestales, marinos, agua y energía:* la alimentaria, la de bebidas y tabaco, la textil, la de celulosa y papel, la maderera y la de energéticos renovables.

*B) Industrias cuyo proceso es directamente sensible al clima:* generación de electricidad (termoeléctricas e hidroeléctricas), extracción de petróleo y gas, industria siderometalúrgica, alimentaria y textil.

*C) Industrias cuya localización es vulnerable ante el cambio climático (costas o ribera de ríos susceptible a inundaciones):* industrias petrolera, petroquímica y química; siderúrgica, pesquera, centrales eléctricas y algunos ingenios azucareros.

*D) Industrias cuyos mercados son sensibles al cambio climático global:* producción de energía e industrias del aire acondicionado, vestido y bebidas (Sánchez-Salazar y Martínez 1999).

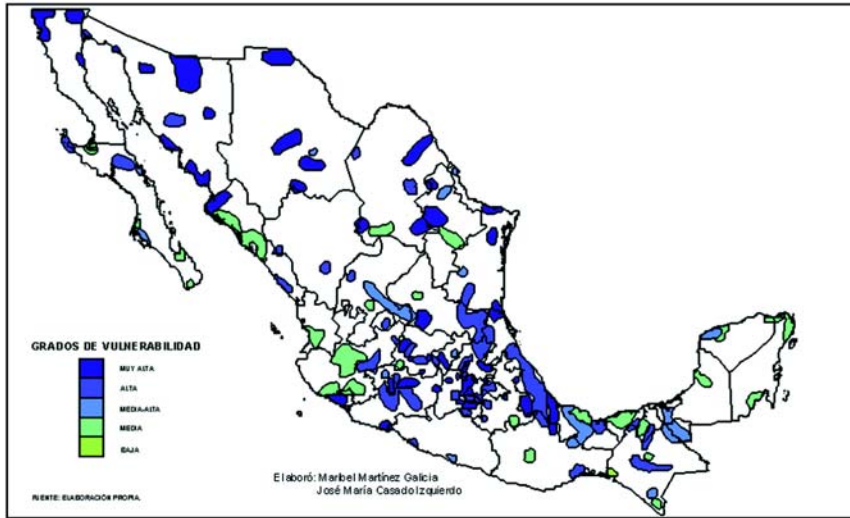


Figura 1. Grados de vulnerabilidad en el sector industrial Modelo CCCM.

El cuadro 1 señala los sectores y subsectores más sensibles al clima. Por ejemplo, la generación de electricidad y la industria petrolera son altamente sensibles al cambio climático porque en ellas se suman varios factores; las centrales eléctricas más vulnerables son las que utilizan el agua como insumo, como las termoeléctricas e hidroeléctricas. La industria de transformación parece ser menos sensible que la pesada, porque en esta última tienden a predominar los grandes establecimientos y los consumos de agua y energía son superiores; en la de transformación el número de factores que inciden en la vulnerabilidad es mayor, pero los consumos de materias primas y energía son inferiores, lo que presumiblemente explica que la vulnerabilidad sea menor. Finalmente, dentro de las ramas de la industria pesada las más sensibles al clima son la petroquímica, la química y la siderometalúrgica, en tanto que las ramas papelera, alimentaria y textil lo son dentro de la industria de transformación.

En 1999, el sector industrial participaba con 21.4% del PIB total nacional (INEGI 2000). De este último, la rama manufacturera representaba 80.7% del PIB industrial, la petrolera participaba con 9.5%, la minería con 5% y la industria eléctrica con 4.8% (INEGI 2000). Desde el punto de vista espacial, la industria, *grosso modo*, se distribuye en las áreas señaladas en las figuras 1 y 3 o 2 y 4, y descritas en los cuadros 2 y 3.

CUADRO 1. FACTORES Y GRADOS DE SENSIBILIDAD CLIMÁTICA DE LAS RAMAS INDUSTRIALES

FACTORES DE VULNERABILIDAD	PROCESOS INDUSTRIALES SENSIBLES AL CLIMA							UBICACIÓN SENSIBLE AL CLIMA			GRADOS DE VULNERABILIDAD		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	12
	RAMAS INDUSTRIALES												
2.1 Industria pesada	a	a	a		a	a	a	-	m	m	b	alta	
Industria petrolera	A	A			A	A	A		A	A	MUY ALTA		
Electricidad	B	A	A	A	A	A	A		M	A	MUY ALTA		
Hidroeléctrica	B		B	A		A	A			A	ALTA		
Termoeléctrica	B	A	A	A	A	A	A	-	A	A	MUY ALTA		
Ciclo combinado	B	M	M	M	M	M	M	-		M	MEDIA		
Turbogas y diesel	B	M	B	B	M	B	B	-	M	B	BAJA		
Carboeléctrica	B	A	A		A	A	A	-		A	MUY ALTA		
Geotérmica	B	M		M	B			-		M	MEDIA BAJA		
Nuclear	B	M			M	A	B	-	A	M	MEDIA		
Energías renovables	B		A	A					M	B	MEDIA		
Siderúrgica y metalúrgica	M	A	A		A	A	A	-	M	M	ALTA		
Minería	B	M	A		A	A	A	-	B		MEDIA ALTA		
Petroquímica y química	A	A	B		A	A	A		A	A	ALTA		
Maquinaria y equipo (a. acondic.)	A	M	B		M	M	A		B	A	MEDIA ALTA		
Metalmecánica	A	M	B		M	M	A		B		MEDIA		
2.2 industria de transformación	a	b	m	a	m	a	a		m	m	b	bmedia alta	
Alimentaria	A	B	B	A	B	M	A		A	M	B	B MEDIA ALTA	
Empacadora de granos	A	B	B	M	B	B	B					BAJA	
Alimentos balanceados	A	B	B	M	B	M	B					MEDIA BAJA	
Empacadoras de frutas	A	B	B	A	B	M	A		A			MEDIA ALTA	
Empacadoras de hortalizas	A	B	B	A	B	M	A		A			MEDIA ALTA	
Azucarera	A	A	M	M	A	A	A			M		MEDIA ALTA	
Bebidas	A	B	M	M	M	M	A		A	M	M	MEDIA	
Pesquera	A	B		A	B	M	M		A	A		MEDIA ALTA	
Textil, cuero y vestido	M	A	A	M	B	A	A		M	M	M	MEDIA ALTA	
Madera	B	B	B	A	B	B	B					BAJA	
Papel y celulosa	M	A	M	A	A	A	A			M		ALTA	

Grados de sensibilidad climática:

A = Alta; M = Media; B = Baja; - = Disminución de la sensibilidad ante un cambio climático

Factores de sensibilidad climática:

- |   |                             |                               |
|---|-----------------------------|-------------------------------|
| 1. PIB  | 5. Consumo de energía       | 10. Ubicación costera         |
| 2. Influencia en el cambio climático global             | 6. Consumo de agua          | 11. Ubicación junto a ríos    |
| 3. Clima  | 7. Competencia por el agua  | 12. Mercado sensible al clima |
| 4. Dependencia de recursos naturales sensibles al clima | 8. Proceso de calentamiento |                               |
|   | 9. Proceso de enfriamiento  |                               |

Fuentes: Acosta y Skea 1994, Kashiwagi 1994, Sánchez-Salazar 1995 y Sánchez-Salazar y Martínez 1999.

CUADRO 2. VULNERABILIDAD DE LA INDUSTRIA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO  
 APLICANDO EL MODELO CCCM

NIVELES DE VULNERABILIDAD	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS INDUSTRIALES (FIGURAS 1 Y 3)
Muy alta	<p>ZM Torreón-Gómez Palacio, entre Durango y Coahuila; corredor industrial Saltillo-Monterrey, entre Coahuila y Nuevo León; ZM de San Luis Potosí; corredor Pánuco-Tampico-Ciudad Madero-Altamira, entre Veracruz y Tamaulipas; Lázaro Cárdenas, Michoacán; corredor Querétaro-San Juan del Río, Querétaro; Tula, corredor Pachuca-Tulancingo, Ciudad Sahagún, Hidalgo; ZM de la ciudad de México; Teziutlán, Puebla (industria siderúrgica, metalúrgica, metalmecánica, química y petroquímica); corredor Cuernavaca-Cuatla, Morelos (industria metalmecánica y alimentaria); corredor Ensenada-Tijuana y Mexicali, B.C. (industria alimentaria, textil y maquiladora); Ciudad Juárez, Camargo, Chihuahua; San Fernando y Matamoros, Tamaulipas (industria química y maquiladora); Cuauhtémoc, Chihuahua (industria papelería); Puerto Peñasco, Caborca, Guaymas, Ciudad Obregón y Navojoa, Sonora; región Topolobampo-Los Mochis-El Fuerte, Sinaloa (industria alimentaria); Los Reyes, Zitácuaro y corredor Morelia-Zacapu, Michoacán; corredor Tuxtepec-cuenca del Papaloapan, Veracruz (industria alimentaria y papelería); León, Salamanca y Celaya, Guanajuato (industria química, petroquímica y alimentaria); Manzanillo, Colima (industria alimentaria y minería); región Cananea-Nacozari y Sahuaripa, Son.; Parral, y las demás áreas mineras de Chihuahua; San Felipe, B.C. Lampazos, N.L.; región Sabinas-Nava-Piedras Negras, Coah. (minería); Córdoba-Orizaba, Veracruz (industria textil y alimentaria); Centrales termoeléctricas e hidroeléctricas de Sonora y Sinaloa; centro y norte de Chihuahua y Coahuila; y norte de Baja California y Tamaulipas.</p>
Alta	<p>Isla Cedros y corredor Guerrero Negro-San Ignacio-Santa Rosalía, Baja California Sur; Tayoltita y Durango, Durango; Hércules y Monclova, Coahuila; distritos mineros de Guanajuato, Querétaro e Hidalgo (minería e industria papelería); corredor Tepeji-Cruz Azul, entre México e Hidalgo (industria cementera); ZM de Coatzacoalcos-Minatitlán-Cosoleacaque; Salina Cruz, Oaxaca; corredor Cactus-Nuevo Pemex, y Macuspana, Tabasco (industria petrolera y petroquímica); corredor Puebla-San Martín Texmelucan, Puebla, Toluca, México; y ZM de San Luis Potosí (industria siderúrgica, metalúrgica y metalmecánica); corredor Guadalajara-Ocotlán-La Barca, y Lagos de Moreno, Jalisco; Aguascalientes, Aguascalientes (industria textil); Zacatepec, Morelos; Izúcar, Puebla; corredor Tuxpan-Tierra Blanca, Veracruz; Golfo de Santa Clara y Hermosillo, Sonora; Mazatlán, Sinaloa; corredor de la Huasteca (industria alimentaria y centrales hidroeléctricas y termoeléctricas); corredor Tuxtla-San Cristóbal y Comitán, Chiapas (centrales hidroeléctricas); y corredor del Bajío, Guanajuato (industria química, petroquímica y alimentaria).</p>
Media alta	<p>Sabinas Hidalgo, Nuevo León; Nuevo Laredo y San Carlos, Tamaulipas (industria química y maquiladora); Isla del Carmen y San Carlos, Baja California</p>

**Cuadro 2.** *Continúa*

NIVELES DE VULNERABILIDAD	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS INDUSTRIALES (FIGURAS 1 Y 3)
Media	<p>Sur; corredor Fresnillo-Zacatecas-Real de Ángeles, Zacatecas; Maconí, Querétaro (minería); Poza Rica, Veracruz (industria petrolera); Delicias, Chihuahua; Zamora, Michoacán; Acapulco y la Cuenca del Balsas, Guerrero (centrales hidroeléctricas); corredor Pachuca-Texcoco-oriente del Distrito Federal (centrales termoeléctricas); Los Tuxtlas-Acayucan, Veracruz; Huixtla, Chiapas; región Tenosique-Balancán, Tabasco; Campeche, Campeche; corredor Celestun-Progreso, Yucatán (industria alimentaria).</p>
Baja	<p>Charcas, San Luis Potosí; Pachuca, Hidalgo; Autlán, Jalisco (minería); Ciudad Guzmán, Ameca y ZM de Guadalajara, Jalisco; áreas que colindan con el corredor Bajío, Guanajuato; corredor Monterrey-Linares, Nuevo León; Tehuacán, Puebla (industria básica y diversas de transformación); plataformas petroleras de la Sonda de Campeche; Valle de Santo Domingo, Baja California Sur; corredor Topolobampo-Culiacán, Sinaloa; corredor Viesca-Parras, Coahuila; Jerez, Zacatecas; corredor Tepic-San Blas, Nayarit (industria alimentaria); sur del Distrito Federal; Oaxaca, Oaxaca; La Chontalpa y Villahermosa, Tabasco; Mérida, Yucatán; La Paz y Cabo San Lucas, Baja California Sur; costa de Quintana Roo y Chetumal (turismo); Cuenca del río Santiago (centrales hidroeléctricas).</p>
Muy baja	<p>Distritos ferríferos del sur de Jalisco. Zonas industriales de Arriaga, Chiapas, Tulancingo, Hidalgo; y Pénjamo, Guanajuato (industria alimentaria).</p> <p>Corredor Mérida-Izamal, Yuc., y Campeche, Camp. (industria textil y alimentaria).</p>

CUADRO 3. VULNERABILIDAD DE LA INDUSTRIA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO  
APLICANDO EL MODELO GFDL-R30

NIVELES DE VULNERABILIDAD	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS INDUSTRIALES (FIGURAS 2 Y 4)
Muy alta	Corredor Tijuana-Ensenada-Tecate, San Felipe y Mexicali, Baja California; Golfo de Santa Clara, Sonora; Monclova, Coahuila; corredor Sabinas Hidalgo-Nuevo Laredo, entre Nuevo León y Tamaulipas; ZM de la Ciudad de México y Pachuca; Coatzacoalcos-Minatitlán, Veracruz; Cactus-Nuevo Pemex, entre Tabasco y Chiapas (industria siderúrgica, metalúrgica, química, petroquímica y alimentaria).
Alta	Chihuahua-Santa Eulalia, Chihuahua; corredor Sabinas-Nava-Piedras Negras, Coahuila; Lampazos, Nuevo León (minería); San Luis Río Colorado, Baja California (industria alimentaria); San Carlos, Baja California Sur (central termoeléctrica); Tula, Hidalgo, Salina Cruz, Oaxaca y Poza Rica, Veracruz (industria petrolera); Viesca, Frontera-Cuatro Ciénegas, Coahuila; corredor Chapala, Jalisco; León y Salamanca, Guanajuato; Tampico, Tamaulipas; corredor Puebla-Atlixco, Puebla (industrias de transformación diversas); Tuxtepec, Oaxaca; Campeche, Campeche; corredor Celestum-Progreso, Yucatán (industria alimentaria); Puerto Juárez-Cancún-Cozumel, Quintana Roo (turismo).
Media alta	Cananea y Nacoziari, Sonora; Fresnillo y Real de Ángeles, Zacatecas (minería); Hermosillo, Sonora; Ciudad Juárez, Chihuahua; Gomez Palacio-Torreón; corredor Saltillo-Monterrey-Linares; Reynosa, Matamoros, San Fernando, Tamaulipas; Pánuco, Veracruz; Lázaro Cárdenas, Michoacán; Corredor Bajío, Guanajuato; Querétaro-San Juan del Río, Querétaro; corredor Cuautla-Cuernavaca, Morelos; área aledaña a la ZM de la Ciudad de México; Ciudad Sahagún-Tulancingo, Hidalgo; San Martín Texmelucan, Puebla (industria química, siderúrgica, metalúrgica, metalmecánica); corredor Córdoba-Orizaba, Veracruz (industria textil y alimentaria); Ciudad Obregón, Sonora; Los Mochis y Culiacán, Sinaloa; Parras, Coahuila; Ciudad Mante-Xicoténcatl, Tamaulipas; corredor del norte de Michoacán; y Alvarado, Veracruz; Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; Mérida, Yucatán, zona aledaña a Campeche, Campeche (industria alimentaria); Cozumel y Chetumal, Quintana Roo (turismo).
Media	La mayor parte de los distritos mineros y zonas industriales del centro-norte y noroeste del país. Cedros, Guerrero Negro y San Ignacio, Baja California Sur; Sahuaripa, Sonora; Unidad Bismarck, Naica y Parral, Chihuahua; Tayoltita y Durango, Durango; Hércules, Coahuila; Sombriete, Zacatecas; zona manganesífera de Molango, Hidalgo; Maconí-El Doctor, Querétaro; Autlán, Jalisco (minería); Tula, Hidalgo; plataformas marinas de la Sonda de Campeche (industria petrolera); corredor Guadalajara-Zapotlanejo, y Ciudad Guzmán, Jalisco; corredor Puebla-Tlaxcala; Tehuacán, Puebla. (industrias de transformación diversas); No-

**Cuadro 3. Continúa**

NIVELES DE VULNERABILIDAD	DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ZONAS INDUSTRIALES (FIGURAS 1 Y 3)
	gales, y Navojoa, Sonora (industria maquiladora); Topolobampo, El Fuerte, y región costera central, de Sinaloa; Huasteca potosina y veracruzana; corredor Martínez de la Torre-Jalapa, Veracruz; corredor Tequila-Ameca, Jalisco (industria alimentaria); Manzanillo-Colima, Colima (industria alimentaria y minería); Cuauhtémoc, Chihuahua (industria papelera); corredor Uruapan-Los Reyes, Michoacán; Zacatepec, Morelos e Izúcar, Puebla; La Paz y Cabo San Lucas, Baja California Sur (turismo).
Baja	Playa del Carmen, Baja California Sur; Guanajuato, Guanajuato; Zimapán, Hidalgo; Real del Monte, Hidalgo (minería); parte del corredor Guadalajara-Ocotlán; Apizaco-Calpulalpam, Tlaxcala (industrias de transformación diversas); Valle de Santo Domingo, Baja California Sur; Guaymas, Sonora; corredor Camargo-Delicias, Chihuahua; Jerez, Zacatecas; corredor Zamora-Sahuayo-Jiquilpan, Michoacán; Los Tuxtlas, Veracruz; La Chontalpa, Villahermosa, Tenosique-Balancán, Tabasco; San Cristóbal, Comitán y Huixtla, Chiapas (industria alimentaria); Aguascalientes, Aguascalientes (industria textil).
Muy baja	Tapachula, Chis. y Oaxaca, Oax., el sureste de Veracruz y la cuenca del Grijalva en Chiapas (industria alimentaria). Corredor San Carlos-Villa Constitución, Baja California Sur, corredor Navojoa a San Ignacio, en Sonora y Sinaloa.

Fuente: Sánchez Salazar *et al.* 1995.

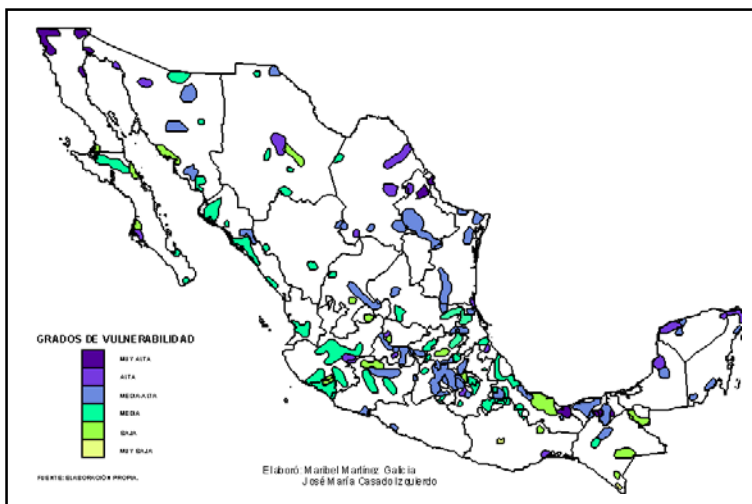


Figura 2. Grados de vulnerabilidad en el sector industrial Modelo GFDL.



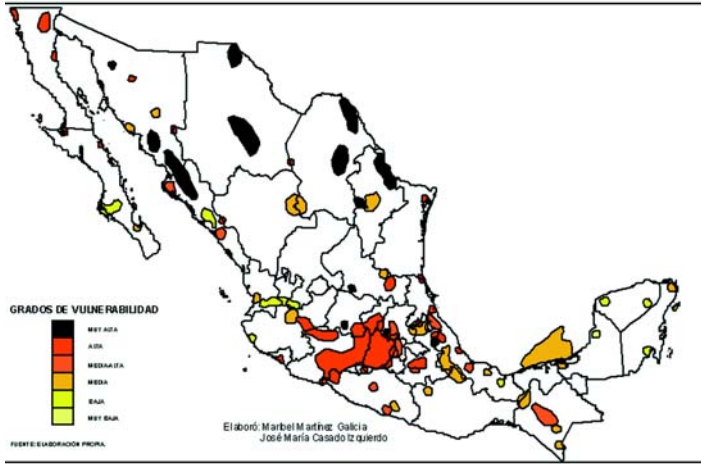


Figura 3. Grados de vulnerabilidad en el sector energético Modelo CCCM.

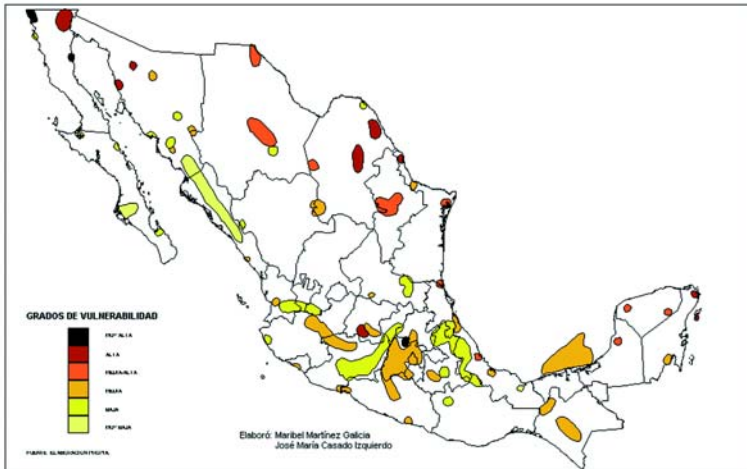


Figura 4. Grados de vulnerabilidad en el sector energético Modelo GFDL.

## VULNERABILIDAD DE LA INDUSTRIA A PARTIR DE LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CCCM Y GFDL-R30

Las diferencias entre los grados de sensibilidad climática se combinan entre sí sobre el territorio de manera más o menos compleja, pues existen ramas industriales cuya distribución geográfica es dispersa, en tanto que otras tienden a combinarse entre sí concentrándose en zonas urbanas. La combinación territorial de ramas industriales y sus diversos grados de sensibilidad de cara al cambio climático, provoca diferencias geográficas marcadas a las escalas regional y local, en términos de la vulnerabilidad.

La aplicación del modelo CCCM deja ver aumentos en la temperatura y un descenso en la precipitación a niveles más bajos que los actuales, para la mayor parte del país, lo que se refleja en niveles altos de vulnerabilidad relativa para la mayor parte de las zonas industriales del país, a excepción de las ubicadas en el sureste y el centro-occidente, en las que los aumentos de temperatura coinciden con un incremento variable en las precipitaciones (cuadro 2, Sánchez-Salazar y Martínez 1999). Por su parte, la aplicación del modelo GFDL-R30 se traduce en aumentos de temperatura, pero también de precipitación, en forma notable, para la mayor parte del país, sobre todo el sureste, sur y centro-occidente, de ahí que las vulnerabilidades para las distintas ramas industriales se atenúan (cuadro 3), aunque ello implica también el aumento en la frecuencia de los eventos extraordinarios generadores de inundaciones.

En suma, la determinación de la vulnerabilidad hacia el cambio climático es un asunto complejo para el caso de la industria, tanto por la enorme gama de modalidades que se presentan en este sector, como por la multiplicidad de factores que inciden en su vulnerabilidad. Asimismo, aunque se considere menos vulnerable que otros sectores económicos, al interior del mismo existen diversos matices de vulnerabilidad relativa.

## CONCLUSIONES

Las tendencias en los estudios de vulnerabilidad de la industria al cambio climático en América Latina se enfocan hacia varios temas: uno es la relación entre la adaptación potencial de esta actividad y la vulnerabilidad. En los países en vías de desarrollo, la capacidad adaptativa de las industrias ante los eventos extremos derivados de la variabilidad climática, en términos económicos, es muy limitada, y por ende su vulnerabilidad es alta (IPCC 2001).

Otros estudios analizan los impactos económicos del ascenso en el nivel del mar sobre la pesca, el turismo o la infraestructura costera, como resultado de las inversiones requeridas para la protección, relleno y estabilización de las playas para que éstas no sean afectadas por los procesos erosivos resultantes. En este sentido, se señala que América Latina podría ser severamente afectada por el cambio climático.

También existe interés sobre las variaciones en la disponibilidad de agua para diversos usos, entre ellos el industrial, en particular en las zonas áridas y semiáridas de Latinoamérica, pues se estima que gran parte de la población urbana y de sus actividades, entre ellas las industriales, se verán afectadas por la reducción en el abastecimiento de agua en el primer cuarto del siglo XXI (IPCC 2001).

En México se necesitan estudios de vulnerabilidad de las zonas industriales costeras, y sus costos de adaptación; otros más que analicen los efectos de los ciclones y las inundaciones que provocan sobre la infraestructura industrial y los costos que implica la adaptación y la mitigación de los daños; también algunos sobre las implicaciones del cambio climático en los costos del agua y la energía en las zonas industriales ubicadas en climas secos y semisecos, y los conflictos que se generan por la presión sobre dichos recursos, así como los referentes a la manera de mitigar los efectos. En suma, se requiere investigar los aspectos inherentes a la vulnerabilidad, adaptación y mitigación en relación con el cambio climático, en lo particular, para las distintas ramas industriales, y en el nivel regional, para las zonas industriales más importantes tanto por la concentración de industrias y otras actividades, como por la diversificación y complejidad que presentan.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, R. y J. Skea. 1994. *Industry, Energy and Transportation Impacts and Adaptation*. IPCC Working Group II: Subgroup A.
- Georgas, D. y C. Perissoratis. 1992. Implications of future climatic changes on the Inner Thermaikos Gulf. En: L. Jeftic *et al.* (ed.) *Climatic Change and the Mediterranean*.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO-UNEP.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2000. *Banco de información económica, 1999*. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx>.

- Kashiwagi, T. 1994. *Mitigation options, Industry*. IPCC Working Group II: Subgroup A.
- Lindh, G. 1992. Hidrological and water resources impact of climate change. Pp. 58-93. En: L. Jeftic *et al.* (ed.) *Climatic Change and the Mediterranean*.
- Mulás del Pozo, P., A. Reinking, C. Vélez, G. Bazán y M. E. Nava. 2000. *Compendio de información del sector energético mexicano, 2000*. México: UNAM-Coordinación de la Investigación Científica-Programa Universitario de Energía.
- Panel on Policy Implications of Greenhouse Warming. 1992. *Policy implications of greenhouse warming. Mitigation, adaptation and the science base*. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Romero, J. 1995. Energía, emisiones y precios relativos. En: *Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México. México ante el cambio climático*. INE, UNAM, U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, 8 a 11 mayo, 1995, Cuernavaca, Morelos, México.
- Sánchez-Salazar, M. T. 1995. Marco de referencia sobre la vulnerabilidad de los sistemas energéticos y la industria ante el cambio climático global: el caso de México. En: *Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. México ante el cambio climático*, INE, U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM, 18 al 22 de abril de 1994, Cuernavaca, Morelos, México.
- y M. Martínez. 1999. Energía e Industria. En: C. Gay (comp.) *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*. México: INE, SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program.
- , M. Martínez y N. Martínez. 1995. *Informe final. Proyecto Estudio de País: México. Área vulnerabilidad. Sub-área: sistemas energéticos e industria*. México.
- SENER (Secretaría de Energía). 2000. *El sector energía en México. Análisis y prospectiva*. México: Secretaría de Energía.
- SEMIP (Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal). *Consumo de energía en la industria*. México: SEMIP/Comisión de las Comunidades Europeas.
- Smith J., H. J. Schellnhuber y M. M. Qader Mirza. 2001. Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis. En: IPCC. *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO. UNEP.

## Notas

---

- \* Instituto de Geografía, UNAM. Se agradece a Maribel Martínez Galicia y a José María Casado Izquierdo su colaboración en la elaboración de los mapas incluidos en este trabajo.

# Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación

*Oralia Oropeza Orozco\**

## INTRODUCCIÓN

LA DESERTIFICACIÓN ES un fenómeno muy complejo que se relaciona con el deterioro de los ecosistemas, la reducción del potencial biológico y la pérdida de la productividad del suelo, debido, fundamentalmente, a las variaciones climáticas y las actividades humanas en las zonas áridas<sup>1</sup> del planeta. Este fenómeno constituye un problema ambiental de gran importancia mundial y, desde luego, para México que, a su vez, se vincula con otros de carácter global como son el cambio climático, la disminución de la biodiversidad y la captura de carbono, la poca disponibilidad de recursos hídricos, y el empobrecimiento y la migración de la población, por mencionar los más significativos.

A escala mundial, más de 3,500 millones de hectáreas, en aproximadamente 100 países, son afectadas por diversos procesos de desertificación. Asimismo, la desertificación perjudica directamente a más de 250 millones de personas e indirectamente a alrededor de 750 millones de personas.

En el Estudio de País: México ante el cambio climático, coordinado por el Instituto Nacional de Ecología en 1995 (INE 1995), se señala que la vulnerabilidad a la degradación de tierras en nuestro territorio es alta en 48.05% y moderada en 48.93% de la superficie total, lo cual significa que, por su posición geográfica, relieve, inclinación del terreno, clima, características de los suelos, y condiciones socioeconómicas, el país muestra una gran susceptibilidad a ser afectado por diversos procesos que conllevan a la desertificación, particularmente en las zonas áridas. Por otra parte, se crearon los escenarios actuales y futuros con los modelos de cambio climático

Geophysical Fluids Dynamics Laboratory (GFDL) y Canadian Climate Center Model (CCCM), mediante índices climáticos de degradación de suelos y los resultados indican que, en el caso del riesgo por erosión hídrica (uno de los principales procesos de la desertificación) ésta se incrementará.

Las estimaciones más recientes refieren que en 64.03% del país se manifiesta alguno de los procesos de desertificación, y de este porcentaje, sólo en 9.31% se presenta un deterioro de moderado a fuerte. Cifras que difieren, con mucho, respecto a lo reportado en trabajos anteriores.

## ¿QUÉ ES LA DESERTIFICACIÓN?

El interés mundial por definir la desertificación surgió a partir del gran desastre provocado por la serie de sequías en el Sahel, África, durante 1968-1973, que se describió en el seno de la Conferencia sobre Desertificación de las Naciones Unidas, en 1977 (UN 1978). Desde entonces, el concepto ha generado controversia, por lo que continuamente se ha revisado en los sectores académicos. La definición más reciente de la desertificación, aceptada por consenso internacional, es la siguiente: “degradación de tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, entre los cuales figuran las variaciones climáticas y las actividades humanas” (ver el capítulo *Lucha contra la desertificación y lucha contra el calentamiento global*, de G. Chapela, en la sección 1).

La degradación de tierras se refiere a la reducción del potencial de productividad biológica y económica de las tierras agrícolas de secano, las tierras con cultivos de riego, los pastizales y bosques, ocasionada por un proceso o una combinación de procesos, entre los cuales cabe citar:

1. El desplazamiento de los materiales de los suelos debido a la erosión del viento y el agua.
2. El empobrecimiento interno de los suelos ocasionado por procesos físicos y químicos, salinización, acidificación, encostramiento y compactación, entre otros.
3. La pérdida de la vegetación natural.

Entre las variaciones climáticas, la sequía es la de mayor relevancia; ésta se considera como una deficiencia constante de la precipitación que afecta amplias zonas de una determinada región y se traduce en un periodo de

clima anormalmente seco y lo suficientemente prolongado como para que la escasez de agua dé lugar a un agudo desequilibrio hídrico (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente-ORPALC, 1993, citado en Oropeza y Alfaro 1994) (ver el capítulo *Sequía Meteorológica*, de M. E. Hernández y G. Valdez, en esta sección).

De alguna manera, esta definición es limitativa, pues el fenómeno de la desertificación involucra numerosas causas y procesos concatenados, así como consecuencias ambientales y socioeconómicas que tienen amplias repercusiones y que no quedan expresados en el concepto.

Por otra parte, la interpretación que se hace del término es muy variada: puede ser sólo la degradación del suelo, sentido más restrictivo que el de degradación de tierras; o bien, de manera aislada, la erosión hídrica, o la eólica en pastizales y tierras de temporal, un cambio climático que provoca la desecación de los cuerpos de agua, la salinización de las tierras irrigadas, la improductividad de los ecosistemas debido a la acción humana, entre otras. Todos estos aspectos, y muchos más, interactúan conjuntamente en una serie de intrincadas relaciones, quizá por esta complejidad, la desertificación en el contexto global es difícil de analizarse y aún más cuando se le relaciona con otros aspectos de escala mundial, como el cambio climático y la pérdida de la biodiversidad.

Las áreas más vulnerables a la desertificación son las áridas, semiáridas y subhúmedas secas, que abarcan una tercera parte de la superficie continental del planeta y en ellas, el fenómeno tiene repercusiones directas e indirectas en más de un millón de habitantes. Respecto a las áreas urbanas en dichas zonas, las partes densamente pobladas dependen de la agricultura de riego, en donde aproximadamente 30% de las tierras irrigadas (43 millones de hectáreas) tiene uno o más procesos de degradación. De los 457 millones de hectáreas con agricultura de temporal, 47% está degradado, y de las áreas destinadas a la ganadería extensiva y al pastoreo, 73% (más de tres millones de hectáreas) muestran algún grado de deterioro, (Williams y Balling 1996, Middleton y Thomas 1997).

## INTERACCIONES DESERTIFICACIÓN-CAMBIO CLIMÁTICO: CAUSAS Y EFECTOS

Como se menciona en la definición, las causas fundamentales de la desertificación son de carácter natural y antropogénico. La sequía es el fac-

tor natural que más actúa como detonador o acelerador de la desertificación, aunque existen otros fenómenos atmosféricos que también influyen, como huracanes, granizadas y heladas.

De los factores antropogénicos relevantes que pueden derivar en un proceso de desertificación existe una gran variedad que depende de las diferentes sociedades y culturas; entre ellos cabe citar: la agricultura de riego y temporal (uso inadecuado de tecnologías, mal manejo del riego y drenaje, abuso de plaguicidas y fertilizantes o carencia de fertilizantes orgánicos, pérdida de control de fuego en labores agrícolas, reducción del tiempo de barbecho de las tierras cultivadas, conflictividad por el uso y tenencia de la tierra); la ganadería y el pastoreo (uso descontrolado del fuego para la regeneración de pastos, sobrepastoreo); la actividad forestal (extracción excesiva de madera y leña, pérdida de la cubierta vegetal, incendios forestales); el desarrollo urbano e industrial (asentamientos humanos sobre suelos fértiles, contaminación del suelo y agua), y los cambios de usos del suelo.

Los procesos de la desertificación también son muy diversos; sin embargo, por lo común se dividen en dos grupos: el primero considera la erosión hídrica y eólica, la degradación de la cubierta vegetal y la salinización; el segundo, la disminución de la materia orgánica, el encostramiento, la compactación del suelo y la acumulación de sustancias tóxicas.

Generalmente, la desertificación constituye un riesgo de dinámica retardada, pues es un proceso paulatino muy complejo y sus consecuencias muchas veces no se observan a corto plazo; por ello, en ocasiones resulta un fenómeno poco evidente, hasta cuando sus efectos son prácticamente irreversibles (Oropeza y Alfaro 1994); además, continuamente se está retroalimentando. Las consecuencias o efectos más frecuentes se reconocen en: la disminución de los rendimientos agrícolas, pecuarios y forestales; la disminución de la diversidad biológica y alteración de los ecosistemas; disminución del secuestro de carbono; el empobrecimiento y endeudamiento nacional e internacional, desintegración familiar, migración rural y marginación de la población, y conflictos bélicos por la apropiación de los recursos. Por lo anterior, este fenómeno tiene implicaciones de carácter global que dependen de factores naturales, socioeconómicos y políticos.

Es evidente que existe una respuesta multidireccional respecto al impacto generado por la interacción de los procesos de la desertificación y el cambio climático; sin embargo, en la actualidad aún es difícil detectar la influencia de las actividades humanas en la degradación de las zonas áridas a



escala de cambio climático mundial. Es decir, las consecuencias climáticas debidas a la desertificación todavía no se aprecian a dicha escala; más bien se manifiestan a escala local o regional dependiendo del área desertificada, y según Williams y Balling (1996), es muy poco probable que en este siglo los cambios inducidos por el hombre en dichas zonas sean detectados en los análisis climáticos de escala global (ver el capítulo *Lucha contra la desertificación y lucha contra el calentamiento global*, de G. Chapela, en la sección II).

Algunos de los efectos más importantes de los procesos antropogénicos de la desertificación que impactan en el clima están relacionados, por ejemplo, con la deforestación, pues al dejarse el suelo sin la cubierta vegetal aumenta la radiación reflejada a la atmósfera (albedo), reduciéndose la formación de nubes y a la vez la precipitación; además se incrementa la evaporación y disminuye la humedad del suelo, y todo esto crea desequilibrios en los balances energéticos de la superficie terrestre y la atmósfera, que, por tanto, modifican el clima. Un impacto más lo constituye la emisión de gases y partículas derivadas de la quema de biomasa (Williams y Balling 1996, OMM 2001).

Por el contrario, el impacto del clima en las zonas áridas es mucho mayor, pues éstas son muy sensibles a las variaciones climáticas, particularmente a las sequías (entre otros efectos, se ha observado que las sequías múltiples y prolongadas son las principales causantes de la mortalidad y, consecuentemente, de las fluctuaciones en las poblaciones de ganado en zonas áridas) (Oba 2001). Como ya se mencionó, otros eventos climáticos, como los huracanes y fenómenos asociados, de alguna manera contribuyen a la desertificación; ejemplo de ello fue el huracán Gilbert, que en 1988 destruyó selvas en Quintana Roo, y al siguiente año, los restos de la vegetación (hojarasca, troncos y ramas caídos, etc.) sirvieron de combustible para los incendios que cubrieron una gran extensión. Las lluvias torrenciales que se precipitaron en Chiapas en 1998 sobre terrenos con fuerte pendiente, erosionados y deforestados, causaron deslizamientos y flujos de lodo, sepultando con bastantes sedimentos e inundando cultivos de frutales lo que provocó la muerte de los árboles por asfixia y anegamiento. Este tipo de desastres retroalimenta la degradación de las tierras.

Asimismo, la vulnerabilidad inherente de los suelos (poca materia orgánica, bajos niveles de actividad biológica, poca estabilidad de los agregados); la escasa cubierta vegetal, que favorece y acelera la erosión hídrica y eólica; la

variación de los regímenes hídricos de los flujos superficiales, y el uso del suelo, de cuyas estrategias de manejo depende el alcance de la productividad agrícola y pecuaria, son aspectos determinantes del cambio climático y los procesos de desertificación, (Williams y Balling 1996, OMM 2001).

## VULNERABILIDAD DEL PAÍS ANTE LA DESERTIFICACIÓN Y TENDENCIAS DEL PROCESO

En el Estudio de País: México ante el cambio climático, coordinado por el Instituto Nacional de Ecología y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (INE, 1995), se llevó a cabo un análisis semicuantitativo para conocer el grado de vulnerabilidad global a la desertificación que tiene el territorio nacional. En una primera etapa se determinó la “vulnerabilidad inherente” que presentan las variables consideradas, tales como: posición geográfica, relieve e inclinación del terreno, condiciones climáticas, propiedades físico-químicas y morfológicas de los suelos, y uso del suelo y geosistemas; en la siguiente etapa se integraron los resultados en un mapa de vulnerabilidad global, donde se muestra que, debido a las características fisicogeográficas y socioeconómicas, no solamente las zonas áridas son vulnerables, sino que prácticamente todo el país (96.98%) es susceptible de ser afectado por uno o varios procesos de degradación de tierras en grado alto (48.05%) y moderado (48.93%) (figura 1).

Por otra parte, se elaboraron los escenarios base del riesgo actual a la desertificación, y también ante un posible cambio climático causado por una duplicación de bióxido de carbono (escenarios futuros 2025). Se trabajó con los modelos de circulación general GFDL y CCCM. Los escenarios del riesgo actual y futuro se crearon mediante índices climáticos de degradación de suelos (erosividad hídrica y eólica, salinización y alcalinización, degradación química y degradación biológica). Estos índices tienen aplicación a escala mundial, sobre todo para países que no cuentan con información detallada ni con un monitoreo sistemático de la degradación del suelo, como es el caso de México. Respecto al riesgo por erosión hídrica, uno de los principales procesos de la desertificación, las estimaciones indican que éste se incrementará según dichos modelos, en la figura 2 se observan las zonas donde aumenta el riesgo por erosión hídrica de acuerdo con el modelo GFDL.

Aun cuando la definición de la desertificación señala como principales zonas vulnerables a las áridas, semiáridas y subhúmedas secas, en nuestro país es un hecho que la degradación de tierras ha rebasado el límite de éstas,



Figura 1. Vulnerabilidad global a la desertificación, 1995. Fuente: INE 1995.

extendiéndose a otras áreas climáticas como consecuencia de la deforestación, los cambios de uso del suelo, el sobrepastoreo y, en general, la explotación excesiva de los recursos naturales.

De acuerdo con el tercer informe del IPCC (2001), en América Latina la tendencia general de la vulnerabilidad y el riesgo a la desertificación indica que el fenómeno seguirá incrementándose en este siglo y los impactos aumentarán en intensidad y frecuencia debido a eventos extremos como las sequías (éstas se asocian al fenómeno de El Niño para varios países, incluyendo México). Además, se prevé una reducción general de la disponibilidad de agua para la población y la disminución del potencial agrícola de las zonas áridas, entre otros aspectos. Según la Comisión Nacional Forestal, actualmente, 60% de las grandes ciudades del país tiene problemas de abasto de agua potable (Cynetic 2003). Aproximadamente 54.43% de la población mexicana habita en zonas áridas, y en éstas 24.38% de los habitantes se asienta en las zonas subhúmedas secas, por lo que incrementan su vulnerabilidad (Cedillo 2003).

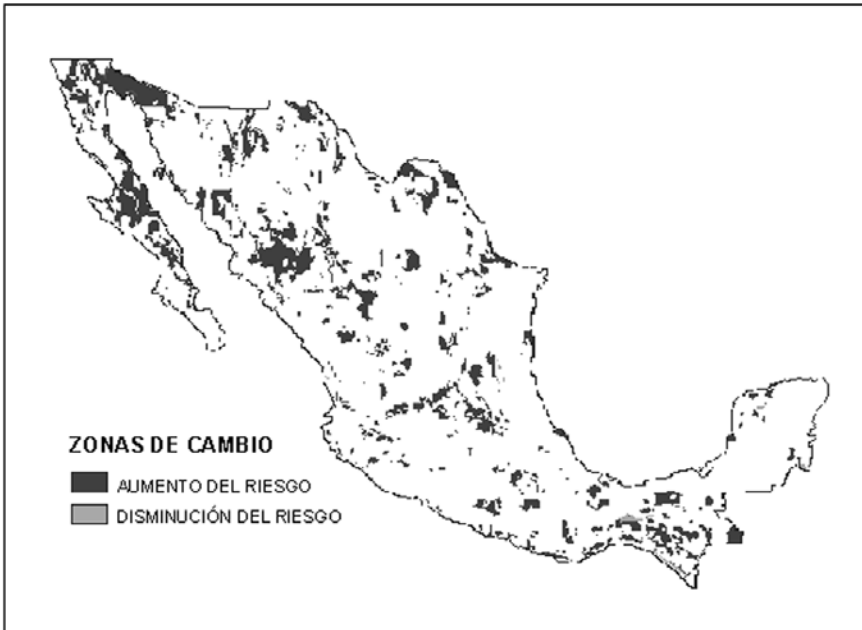


Figura 2. Variación del riesgo por erosión hídrica del modelo GFDL respecto al escenario base. Fuente: INE 1995.

## EVALUACIÓN DE LA DESERTIFICACIÓN EN MÉXICO

Desde hace ya varias décadas ha sido una preocupación nacional evaluar la situación que presenta el país frente a la desertificación. Los estudios se han enfocado principalmente a la cuantificación de la erosión hídrica, la eólica y la salinización; sin embargo, en la actualidad el problema se está abordando de manera interdisciplinaria e integral, considerándose las diversas causas y procesos naturales y antropogénicos que provocan el fenómeno, así como sus múltiples consecuencias.

No obstante lo anterior, se observan varios problemas que deben corregirse en futuras evaluaciones. Existen diferencias conceptuales y metodológicas; la delimitación de las zonas áridas cambia según el autor y criterio (a esto se agrega la variabilidad intrínseca en la distribución temporal y espacial de la precipitación, lo cual dificulta aún más la delimitación); el inventario y cartografía de los recursos naturales aún es deficiente, y en ocasiones no está actualizado o disponible; las escalas de trabajo también son muy

variables; las bases de datos son inconsistentes e insuficientes, pues no hay monitoreos sistemáticos, por tanto, los resultados son muy heterogéneos, de tal forma que las interpretaciones pueden resultar erróneas y también dificultan las comparaciones con otros países.

Baste citar los siguientes ejemplos; el porcentaje de superficie con tierras áridas del país es de 77.4%, según el índice de Thornthwaite (Hernández y García 1997); 66.27% es reportado en Dregne y Chou (1992); 52.8% de acuerdo con el Sistema Modificado de Köppen (García 1988, citado en Hernández y García 1997), y 47.5% es definido por la SEMARNAP (1999, citado en INEGI-INE 2000).

En cuanto a las evaluaciones de la desertificación, a escala nacional, Estrada y Ortiz (1982) señalan una afectación por erosión hídrica de 99.83% desde la clase ligera hasta la severa; la Comisión Nacional de Zonas Áridas menciona que más de 97% del país muestra algún proceso de degradación de tierras, y de este porcentaje, más de 60% manifiesta una degradación severa o extrema (CONAZA-SEDESOL 1994, citado en Oropeza y Alfaro 1994). Dregne y Chou (1992) informan 55.65% considerando los rangos de moderada a extrema. Las estimaciones más recientes realizadas por la SEMARNAP (1999), aplicando la metodología GLASOD (Global Assessment of Soil Degradation, dentro del proyecto internacional que constituye un primer paso para estimar la degradación de tierras a la escala mundial), indican que en 64.03% del país se desarrolla alguno de los procesos de desertificación, y de este porcentaje, sólo en 9.31% se presenta un deterioro de moderado a fuerte. Como puede observarse, es difícil determinar cuáles cifras se aproximan a la realidad del país.

## MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN

Actualmente, las políticas de adaptación y mitigación de la lucha contra la desertificación se enmarcan en el desarrollo sustentable y tienen enfoques integrales. Entre los objetivos prioritarios se encuentra la recuperación de tecnologías tradicionales, pues desde tiempos remotos la adaptación a la sequía y a la desertificación ha sido un reto para los campesinos, por ello muchos países Latinoamericanos (Brasil, Perú, Chile, Bolivia, Ecuador, Argentina, Venezuela, México, Cuba, Guatemala y Nicaragua, entre otros) están rescatando los conocimientos y las tecnologías que se estaban perdiendo. Otras formas de adaptación se relacionan con la protección del suelo mediante el

control de la erosión hídrica y eólica; la conservación del agua superficial y subterránea, reduciendo la demanda y mejorando el suministro; y la búsqueda de cultivos tolerantes a las sequías y al uso eficiente de la energía, particularmente la relacionada con la leña. Asimismo, varios de estos países cuentan con sus Programas de Acción Nacional (PAN) como herramientas para combatir la desertificación. No obstante lo anterior, aún falta mucho por hacer.

## CONCLUSIONES

Dado el deterioro ambiental que está ocurriendo por los procesos de la desertificación, no sólo en México sino en todo el mundo, actualmente también se le considera un problema global, a la misma altura de otros temas como son el cambio climático y la pérdida de la diversidad biológica; por ello es fundamental que se realicen investigaciones permanentes que permitan conocer con mayor detalle la variabilidad climática que ocurre en las zonas áridas, a fin de prevenir desastres.

El análisis de la vulnerabilidad y el riesgo a la desertificación realizado para el Estudio de País, constituye una de las primeras aproximaciones cuya interpretación tiene fundamentalmente un carácter regional, por lo que es necesario continuar con investigaciones sistemáticas para mejorar los pronósticos a corto, mediano y largo plazos y, de esta manera, proporcionar alertas tempranas para que la población se prepare y desarrolle estrategias para enfrentar las sequías y la desertificación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Cedillo, F. Y. 2003. *La desertificación relacionada al cambio climático en México*. Tesis de maestría. México: UNAM, Facultad de Filosofía y Letras.
- Cynetic (Servicios Informáticos). 2003. En los últimos 50 años México ha perdido la mitad de sus bosques y selvas. *Periódico Electrónico de México*, 11 de julio de 2003. Mexico.
- Dregne, H. E. y N.-T. Chou. 1992. *Global Desertification Dimensions and Costs In: E. Harold and H. Dregne (eds.) Degradation and Restoration of Arid Lands*. Lubbock, Texas: International Center for Arid and Semiarid Lands Studies, Texas Tech University.
- Estrada, B. W. J. y S. C. Ortiz. 1982. Plano de erosión hídrica del suelo en México. *Revista Geografía Agrícola, Análisis regional de la agricultura* 3: 23-27.

- Hernández, Ma. E. y E. García. 1997. Condiciones Climáticas de las Zonas Áridas de México. *Geografía y Desarrollo* [Revista del Colegio Mexicano de Geografía, A.C.] 15: 5-16.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 1995. *Estudio de País: México ante el Cambio Climático*. Informe Técnico. México: U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM-Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- INEGI-INE (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-Instituto Nacional de Ecología). 2000. *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*. México: Aguascalientes.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge: Cambridge University Press.
- Middleton, N. y D. Thomas. 1997. *World Atlas of Desertification*. London: Arnold.
- Oba, G. 2001. The effect of multiple droughts on cattle in Obbu, Northern Kenya. *Journal of Arid Environments* 49 (2): 375-386.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2001. La Meteorología y la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertización. *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial* 50 (2):119-127.
- Oropeza, O. y G. Alfaro. 1994. Marco teórico metodológico de la vulnerabilidad a la desertificación. *Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México. México ante el cambio climático*. Pp. 121-130. México: INE, U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 1999. *Resultados de la evaluación de la degradación del suelo en la República Mexicana*. México: SEMARNAP.
- UN (United Nations). 1978. *United Nations Conference on Desertification, Round-up Plan of Actions and Resolutions, August 29–September 9, 1977*. New York.
- Williams, M. A. J. y R. C., Balling Jr. 1996. *Interactions of Desertification and Climate*. World Meteorological Organization and United Nations Environment Program.

## Notas

---

\* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

1. En este texto, con el nombre de zonas áridas se engloba a las áridas, semiáridas y subhúmedas secas; se excluyen las hiperáridas.





# Sequía meteorológica<sup>1</sup>

*María Engracia Hernández Cerda  
y Gonzalo Valdez Madero\**

## INTRODUCCIÓN

LAS FLUCTUACIONES CLIMÁTICAS intraestacionales y de largo plazo que se han observado en diversas regiones de la Tierra, han comenzado a ser objeto de interés, debido principalmente a su impacto directo en la producción agrícola y en la incidencia de desastres.

Los últimos estudios basados sobre modelos climáticos sugieren que el ciclo hidrológico se verá mas afectado tanto en la distribución de lluvias intensas como en la frecuencia de entradas de condiciones atmosféricas extremas húmedas y secas (IPCC 2001).

Un buen ejemplo de estas variaciones climáticas en México son las frecuentes sequías severas que se presentaron en la década pasada y la tendencia a un aumento de lluvia en el noroeste en la época invernal, así como variaciones en la lluvia en el nivel regional, tanto en el sur de nuestro país como en América Central.

También del análisis de escenarios de cambio climático se han obtenido resultados que sugieren que el clima de México será más seco y más caliente, y que varias cuencas hidrológicas en la región del centro de México serán altamente vulnerables a estos cambios.

En el Estudio de País: México ante el cambio climático, coordinado por el Instituto Nacional de Ecología en 1995 (INE 1995), se analizó la sequía desde el punto de vista meteorológico, y se definió como una función del déficit de precipitación con respecto a la precipitación media anual o estacional de largo periodo, y su duración en una determinada región.

El objetivo principal fue evaluar la vulnerabilidad del país ante un evento atmosférico extremo como es la sequía meteorológica, en condiciones actuales y ante un cambio climático, por medio de métodos cartográficos.

Para el desarrollo del trabajo se estimó el Índice de Severidad (IS) actual y el correspondiente a dos escenarios de cambio climático actual para las estaciones seleccionadas, que resultan de la aplicación de dos modelos que parten del supuesto de que el contenido del bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera se duplicará entre los años 2025 y 2050. Estos modelos, basados en la circulación general de la atmósfera, son el modelo GFDL-R30 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) y el CCCM (*Canadian Climate Center Model*).

Se utilizaron datos de precipitación media mensual de 284 estaciones meteorológicas, tomadas de la base de Douglas adaptada por la línea de escenarios físicos (Magaña *et al.* 1997). Se incluyeron cuatro estaciones más, localizadas en la frontera noroeste con Estados Unidos, para obtener información de esa área del país. El periodo de años de observación de las estaciones es variable, por lo que sólo se consideró de 1950 a 1980.

El cálculo del índice de severidad para cada año en el periodo estudiado se realizó a partir de los datos de precipitación, comparados con sus respectivas medias (Tinajero *et al.* 1986; y Sancho y Cervera *et al.* 1980), y se tomaron los valores absolutos. Por último, se obtuvo el promedio de los índices de severidad del periodo estudiado.

Con el índice de severidad obtenido para todas las estaciones se generó el mapa de escenario actual, mediante el trazo de isolíneas, trabajandose con un mapa escala original 1:8 000 000.

El índice de severidad de la sequía meteorológica se clasificó en siete grados: extremadamente severo (mayor de 0.8), muy severo (0.6 a 0.8), severo (0.5 a 0.6), muy fuerte (0.4 a 0.5), fuerte (0.35 a 0.4), leve (0.2 a 0.35) y ausente (<0.2) (Sancho y Cervera *et al.* 1980).

Los datos de precipitación media mensual fueron ajustados a los cambios planteados por los modelos GFDL-R30 y CCCM para simular los efectos de una posible duplicación en la concentración de  $\text{CO}_2$ . Esto se hizo multiplicando los registros de precipitación media mensual de enero a diciembre de los treinta años estudiados por los cambios en porcentaje propuestos en condiciones de  $2X \text{CO}_2$ .

De esta forma se obtuvo un archivo con datos de precipitación simulados, que se importaron a la base de datos para calcular el índice de severidad (IS) de la sequía meteorológica.

Con los IS modificados obtenidos para todas las estaciones se generaron los mapas de los escenarios futuros según los modelos CCCM y GFDL-R30, mediante el trazo de isóneas.

Por último, para la digitalización, medición y sobreposición de los mapas resultantes se utilizó el sistema de información geográfica ILWIS (Integrated Land and Water Information System, ITC, ILWIS System. Versión 1.3).

Los resultados de la medición de las áreas con los diferentes grados de severidad en condiciones actuales, y de acuerdo con los modelos CCCM y GFDL-R30, se encuentran concentrados en el cuadro 1.

En el mapa correspondiente al escenario actual (figura 1), se muestra que la sequía está presente en la mayor parte del país.

Por lo que respecta al índice de severidad designado como leve, se localizan tres áreas: la primera sobre la llanura tabasqueña, que comprende sur de Veracruz, norte de Oaxaca, la mayor parte de Tabasco y sur de Campeche; la segunda, en el extremo oriente de la cuenca del Balsas, y la tercera en el Bajío, donde abarca parte del estado de Jalisco y noroeste de Michoacán.

Por otro lado, cinco áreas del país presentan sequía severa: la de mayor extensión se ubica sobre el noreste y norte de México y se prolonga hasta el estado de Guanajuato; otra zona se localiza en el centro norte del estado de Sonora; una más sobre la costa oriente de Baja California Sur, las otras dos áreas, de menor extensión, se ubican sobre la costa oaxaqueña y en la costa noreste del estado de Yucatán.

Las áreas que presentan un índice de severidad fuerte, que también comprenden 24.4% del territorio nacional, se ubican en la mitad sur del país, y en una pequeña porción del norte del estado de Sinaloa.

CUADRO 1. SUPERFICIE DEL PAÍS AFECTADA POR SEQUÍA DE ACUERDO CON LOS ESCENARIOS ACTUALES, CCCM Y GFDL-R30

ÍNDICE DE SEVERIDAD DE LA SEQUÍA METEOROLÓGICA	ESCENARIO ACTUAL		MODELO CCCM		MODELO GFDL-R30	
	KM <sup>2</sup>	%	KM <sup>2</sup>	%	KM <sup>2</sup>	%
Leve	123 411.8	6.3	8 287.081	0.4	84 857.15	4.4
Fuerte	474 841.7	24.4	212 044.8	10.9	123 631.3	6.4
Muy fuerte	644 707.6	33.2	915 025.6	47.1	743 596.6	38.2
Severa	474 908.5	24.4	582 501.5	30.0	765 511.7	39.4
Muy severa	156 730.4	8.1	151 022.1	7.8	143 572.1	7.4
Extremadamente severa	70 196.42	3.6	75 901.21	3.9	83 611.83	4.3



Figura 1. Escenario actual del Índice de Severidad de la sequía meteorológica.

Las áreas que presentan un índice de severidad muy fuerte se localizan principalmente en la parte central del país, y se prolongan hacia el norte a todo lo largo de la sierra Madre Occidental. También en las costas de los estados de Oaxaca, Guerrero y Michoacán, así como de los estados de Campeche y Yucatán.

La sequía extremadamente severa se presenta únicamente en la península de Baja California y noroeste del estado de Sonora.

De la comparación de los escenarios futuros con el actual se plantea lo siguiente: con el modelo CCCM se presentarían tres cambios en la distribución espacial de la sequía meteorológica (figura 2) respecto al escenario actual.

Primero: desaparecerían dos de las tres áreas identificadas con un IS leve en el escenario actual; la tercera, localizada en el estado de Jalisco, se reduciría en extensión.

Segundo: el área identificada con IS muy fuerte en el escenario actual aumentaría 13.9% de acuerdo con el modelo CCCM, ya que mayor superficie con IS fuerte incrementaría su intensidad, abarcando casi en su totalidad al oeste, centro y sur del país.

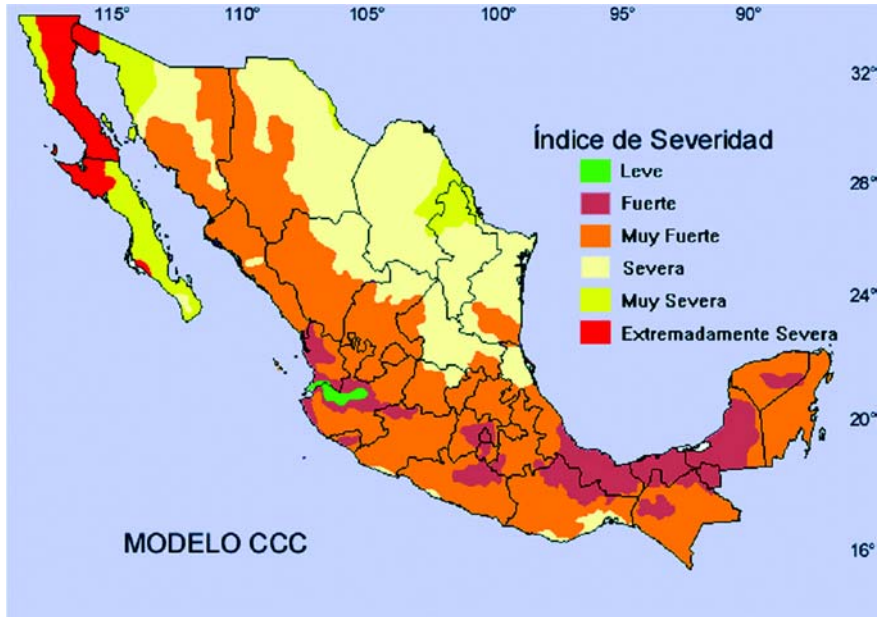


Figura 2. Modelo CCCM del Índice de Severidad de la sequía meteorológica.

Tercero: la superficie de la zona identificada con un IS severo en el escenario actual, aumentaría en 5.6% de acuerdo con el modelo CCCM.

El área identificada en el escenario actual con IS extremadamente severo, casi no presentaría modificaciones, ya que de acuerdo con el modelo CCCM comprendería 3.9% de la superficie nacional, lo que representa un aumento de 0.3% de la superficie respecto al escenario actual (cuadro 1).

Por lo que respecta al modelo GFDL-R30, los cambios son muy contrastantes, ya que se mantendría el área con IS leve localizada sobre la costa del Golfo de México, e incluso se extendería hasta el paralelo 21° latitud norte, pero desaparecerían las situadas en la cuenca del Balsas y en los estados de Jalisco y Michoacán.

La zona con IS severo se extendería a casi todo el norte del país, prolongándose sobre la costa del Pacífico hasta el paralelo 24° latitud norte, así como sobre las costas de los estados de Guerrero, Oaxaca y noroeste de Yucatán. También aumentarían en 5.0% las áreas con sequía muy fuerte, debido a la disminución de las áreas afectadas con sequía fuerte (cuadro 1).

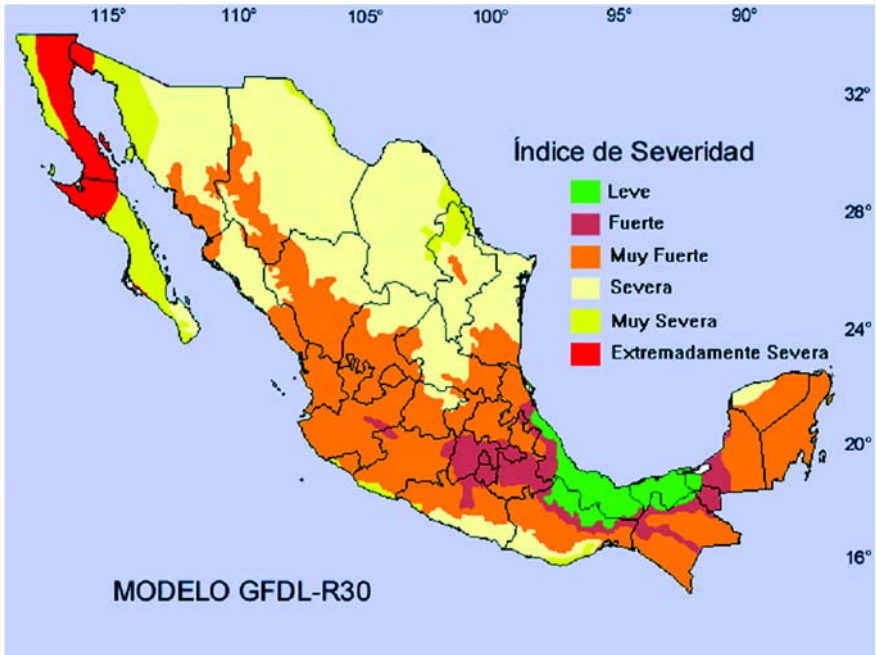


Figura 3. Modelo GFDL-R30 del Índice de Severidad de la sequía meteorológica.

Los resultados de la sobreposición de los mapas correspondientes a los modelos CCCM y GFDL-R30 con el escenario actual, se presentan en los cuadros 2 y 3, respectivamente.

En ellos se indican los cambios en forma numérica, tanto positivos como negativos, que sufren las áreas definidas en el escenario actual, ante un cambio climático según los dos modelos utilizados.

Los mapas resultantes de esta comparación (figuras 4 y 5) muestran las áreas donde aumentaría y disminuiría la severidad de la sequía meteorológica.

De la sobreposición de los mapas escenario Actual/CCCM (figura 4), los cambios más importantes se dieron en las zonas con índices de severidad leve y fuerte, pues en la primera, 85.4% de su superficie pasó a la categoría de fuerte, y de esta última, 78.7% de su área aumentó a muy fuerte (cuadro 2).

En general se puede decir que las áreas más afectadas por un aumento en la severidad de la sequía meteorológica se localizan principalmente en el centro y sur del país, así como en la mitad oriental de la península de Yucatán. Todas ellas abarcan un total de 36.4%.

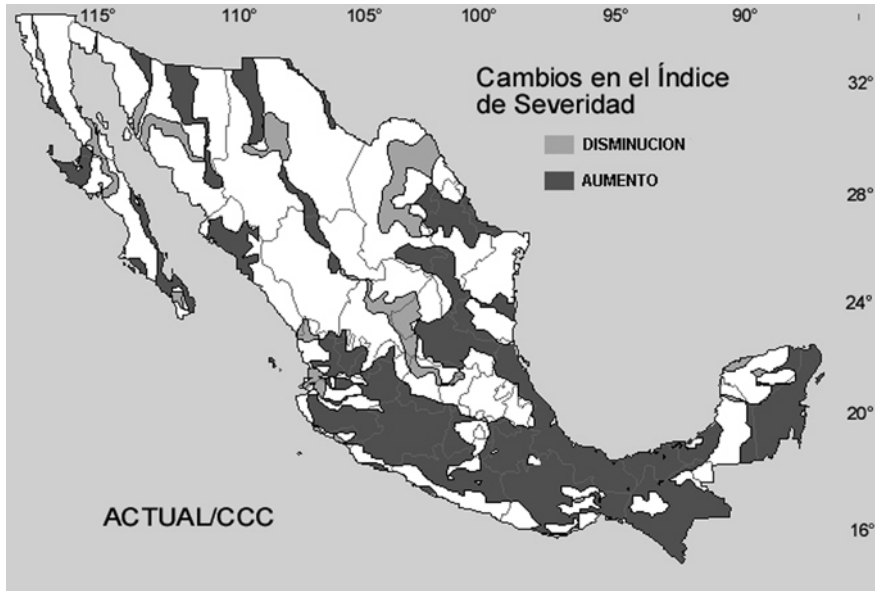


Figura 4. Áreas de cambio en la severidad de la sequía meteorológica. Modelo CCCM.

Por lo que respecta a la disminución de la sequía, el dato más relevante de estos resultados corresponde al área designada con un índice muy severo, donde 29.2% de su superficie baja a severo (cuadro 2); estas áreas se localizan en el norte del país en los estados de Baja California, Sonora y Coahuila. El total de áreas con disminución en severidad de la sequía representa 6.7% de la superficie nacional.

De la sobreposición de los mapas escenario Actual/GFDL-R30 (figura 5), es interesante hacer notar que el aumento en la severidad de la sequía me-

CUADRO 2. RESULTADOS DE LA SOBREPOSICIÓN DE LOS MAPAS ACTUAL/CCCM

CCCM ESCENARIO ACTUAL	LEVE	FUERTE	MUYFUERTE	SEVERA	MUYSEVERA	EXTR. SEVERA
Leve	4.57	85.4	10.1			
Fuerte	0.4	20.4	78.7	0.4		0.1
Muy fuerte	0.14	1.4	72.7	24.8	0.8	0.1
Severo		0.04	12.87	78.9	8.1	
Muy severo				29.2	60.9	9.8
Extremadamente severo				0.6	15.1	84.3

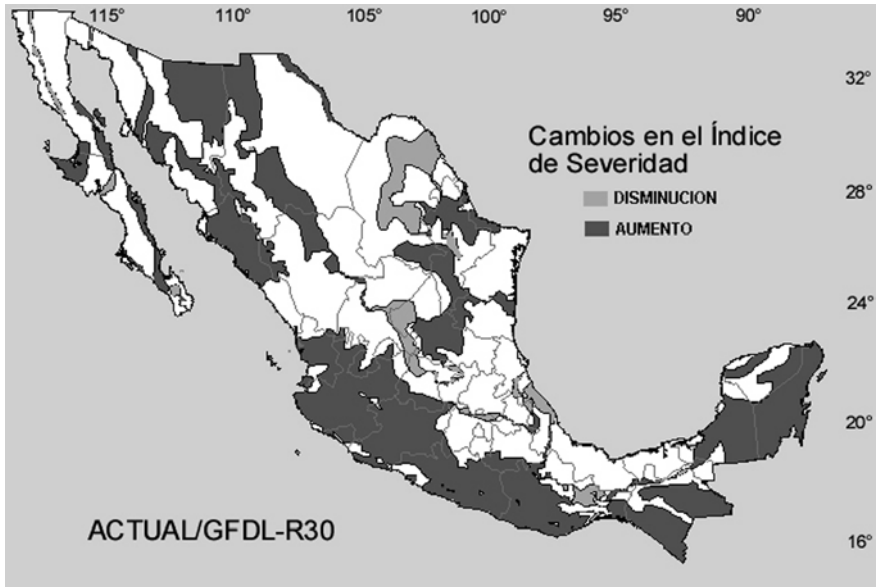


Figura 5. Áreas de cambio en la severidad de la sequía meteorológica. Modelo GFDL-R30.

eteorológica se da en general en todo el país y es mayor que con el modelo CCCM, pues 39.4% de la superficie nacional sufre incremento en la severidad de la sequía.

El cambio más grande en cuanto a la superficie modificada corresponde a la designada como fuerte, que pasa a muy fuerte en 73.3% de su superficie; en esta última, 44.3% de su área cambia a severa (cuadro 3).

Otra variación en la severidad de la sequía meteorológica se presenta en las áreas designadas con un índice leve, que se incrementa a muy fuerte en 22.8% de su extensión; este cambio es muy grande, pues pasa de leve a muy fuerte. Estas modificaciones se localizan en la zona del Bajío, en el estado de Jalisco y Michoacán, y en el extremo oriente de la cuenca del Balsas, en los límites de Guerrero y Puebla.

En cuanto a la disminución de la sequía, el área total del país donde se presenta este cambio es de 4.5%. La modificación más grande se presenta en el área designada como muy severa, que baja a severa en 28.6% de su superficie (cuadro 3), y se localiza principalmente en el centro y norte de Coahuila. Sobre los límites estatales de San Luis Potosí, Zacatecas y Guanajuato se localiza otra zona de considerable extensión donde la disminución del índice de sequía pasa de severo a muy fuerte en 5.1% de su área.



CUADRO 3. RESULTADOS DE LA SOBREPOSICIÓN DE LOS MAPAS ACTUAL/GFDL-R30

GFDL-R30 ESCENARIO ACTUAL	LEVE	FUERTE	MUYFUERTE	SEVERA	MUYSEVERA	EXTR. SEVERA
Leve	60.0	17.1	22.8			
Fuerte	2.1	20.0	73.3	4.6	0.01	
Muy fuerte	0.06	1.3	53.1	44.3	1.2	
Severo			5.1	87.3	7.6	
Muy severo			0.3	28.6	58.7	12.4
Extremadamente severo					9.4	90.6

Por otro lado, en el cuadro 4 se muestran las áreas vulnerables a la sequía meteorológica por estados, según los dos modelos climáticos utilizados. Respecto a estos resultados, lo más significativo que se puede mencionar con el modelo CCCM, es que el estado de Quintana Roo sería el más vulnerable ante un posible cambio climático, pues 98.47% de su superficie se vería afectada con un aumento en la severidad de la sequía. Le siguen en orden de importancia, con más de 75% de su área: Tlaxcala (96.69%), Veracruz (91.05%), Michoacán (89.66%), Chiapas (83.13%) y Tabasco (80.56%).

Con el modelo GFDL-R30, los estados del país que resultan vulnerables en más de 75% de su territorio son: Quintana Roo (99.67%), Michoacán (90.04%), Jalisco (87.30%), Guerrero (84.70%), Colima (83.57%) y Campeche (75.22%).

## CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de este estudio se puede concluir que el posible cambio climático puede favorecer algunas regiones del país, y en otras aumentar el grado de severidad de la sequía meteorológica.

Es conveniente señalar que los climas de México son muy variados como respuesta a un relieve muy complicado y a las grandes diferencias en altitud; van de los muy cálidos en nuestras costas, a los muy fríos o de nieves perpetuas en las cimas de los más altos volcanes, y de los muy húmedos en la región del sureste, a los muy secos en el norte y noroeste del país, pasando por todas las variantes intermedias. Estas condiciones dan como resultado que estudios como el antes referido sólo sean una aproximación general de la vulnerabilidad de nuestro país a la sequía meteorológica ante

CUADRO 4. ÁREA PORCENTUAL AFECTADA POR LA SEQUÍA METEOROLÓGICA APLICANDO LOS MODELOS GFDL-R30 Y CCCM

ESTADOS	DISMINUCIÓN DE SEVERIDAD (%)		AUMENTO DE SEVERIDAD (%)	
	CCCM	GFDL R30	CCCM	GFDL-R30
Aguascalientes	-	-	32.86	32.86
Baja California	8.61	5.69	5.16	10.24
Baja California Sur	9.66	4.96	34.32	29.69
Campeche	1.79	14.33	39.85	60.90
Chihuahua	5.85	0.11	11.85	29.62
Chiapas	-	2.18	83.13	71.18
Coahuila	26.69	28.76	10.31	7.76
Colima	13.53	0.97	42.03	83.57
Distrito Federal	-	-	-	-
Durango	0.74	-	6.88	20.49
Guerrero	-	3.93	58.94	80.76
Guanajuato	17.28	14.52	33.22	32.05
Hidalgo	-	5.2	2.91	-
Jalisco	4.20	3.01	63.99	85.25
México	1.42	9.35	53.49	8.99
Michoacán	-	2.45	89.66	87.59
Morelos	-	1.54	53.33	0.51
Nayarit	20.45	-	30.59	69.92
Nuevo León	0.04	5.02	51.68	47.51
Oaxaca	1.20	11.44	69.08	58.28
Puebla	-	-	69.26	21.85
Querétaro	8.47	3.81	8.05	6.36
Quintana Roo	-	-	98.47	99.67
Sinaloa	1.24	-	35.83	67.02
San Luis Potosí	15.99	13.45	49.78	33.24
Sonora	8.87	0.33	16.03	43.69
Tabasco	-	4.99	80.56	-
Tamaulipas	-	0.20	28.79	21.35
Tlaxcala	-	1.32	96.69	-
Veracruz	-	10.87	91.05	2.09
Yucatán	9.51	-	16.45	47.96
Zacatecas	17.9	7.90	7.83	9.99

un cambio climático, pues no contribuyen a identificar patrones comunes de vulnerabilidad ante este evento atmosférico extremo. Por eso se hace necesario continuar con este tipo de estudios a escala regional, con el propósito de desarrollar medidas de mitigación para las diferentes regiones climáticas de México y poder enfrentar sequías mas intensas y frecuentes por el cambio climático global que se prevén para este siglo XXI y que afec-

tarán principalmente a aquellas regiones con una baja capacidad adaptativa, como es el caso del continente africano y de Latinoamérica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Hernández, C. M. E., Torres, T. L. A. y Valdez, M. G. 2000. Sequía Meteorológica. Pp. 25-40. En: C. Gay (comp.) *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*, México: INE, SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the third Assessment Report of IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez y C. Gay. 1997. Assesment of current and future regional climate scenarios for Mexico. *Climate Research* 1-2(9):107-114.
- Sancho y Cervera, J., Z. F. Zavala, V. M. Sánchez y V. V. Martínez. 1980. *Monitoreo de sequías y heladas*. México: Comisión del plan nacional hidráulico. Dirección de inventarios de agua y suelo. Proyecto IA 800/.
- Tinajero, G. J., L. A. Huesca, V. V. Martínez, R. J. Morelos, H. J. Ruiz, M. F. Escalante y M. E. Díaz. 1986. *Análisis en la sequía en México en el periodo 1976-1980*. México: Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

## Notas

---

\* Instituto de Geografía, UNAM.

1. Una versión similar de este artículo apareció en: Hernández, Torres y Valdez, 2000.



# El sector pesquero

*Daniel Lluch-Cota\**

LOS EFECTOS DEL CAMBIO climático global (CCG) sobre la pesca suelen ubicarse en el contexto de una actividad que, de por sí, enfrenta problemas de sustentabilidad. La sobreexplotación, el sobredimensionamiento de la capacidad instalada, los conflictos entre flotas y con otras actividades, un manejo que ignora la variabilidad ambiental y la incapacidad para imponer medidas regulatorias en la práctica, son aspectos recurrentes de una situación mundial que, según el IPCC (Everett *et al.* 1995), tenderá a agravarse ante el cambio climático global. No hay duda de que el caso mexicano repite algunos aspectos de esta problemática; no obstante, también presenta particularidades a considerar al intentar evaluar la vulnerabilidad de la pesca nacional.

## CARACTERÍSTICAS DEL SECTOR

Con 1.4 millones de toneladas anuales, 1.5% de la captura mundial, México es uno de los primeros 20 países pesqueros. El sector aporta alrededor de 0.7% del PIB nacional, y emplea cerca de 1.3% de la población ocupada (INP 2000). Estas cifras suelen ser interpretadas como indicativas de una actividad económica menor; no obstante, la perspectiva correcta para dimensionar la actividad es la regional: casi dos tercios de la producción proviene de cuatro estados (Sonora, Sinaloa, Baja California y Baja California Sur). De hecho, fuera del noroeste mexicano existen pocas pesquerías de gran escala (p. e., atún en el Golfo de Tehuantepec, camarón en el Golfo de México).

La mayor parte de la captura se basa en unos pocos recursos masivos: los pelágicos menores (sardinas y anchoveta) y mayores (atún), el calamar y el camarón. Por su elevada movilidad y su distribución oceánica, los recursos

masivos son capturados principalmente por la flota mayor, integrada por unos 3,400 barcos. Salvo la del camarón, las pesquerías masivas tienen aún potencial de crecimiento (INP 2000). Incluso existen todavía recursos no explotados (p. e. langostilla y merluza) capaces de aumentar significativamente la producción nacional (Balart y Castro-Aguirre 1995).

Otras pesquerías importantes son las de algunos recursos bentónicos; el abulón, la langosta, el erizo y el pulpo, de bajas capturas pero elevado valor, y que han sido ya plenamente explotados e incluso sobrexplotados (INP 2000). Éstos, junto con las masivas, son pesquerías industriales. En el otro extremo están numerosas pesquerías artesanales, basadas en diversos recursos cuya captura individual es marginal. En general éstos son explotados por la flota menor; unas 100,000 lanchas o pangas cuya baja capacidad de navegación se corresponde con recursos bentónicos, o poco móviles, y de distribución costera. Si bien sus volúmenes son bajos, las pesquerías artesanales son muy relevantes en términos sociales al ocupar a una proporción mayor de personas.

## CLIMA OCEÁNICO REGIONAL

Las diferencias en el desarrollo pesquero regional resultan, en principio, del imperativo geográfico del clima oceánico (ver el capítulo *Clima oceánico: los mares mexicanos ante el cambio climático global*, de A. Gallegos, en la sección 1). La mayor parte del litoral mexicano, incluyendo el Golfo de México y la costa del Pacífico desde la frontera sur hasta el Golfo de California, corresponde a la región tropical. Típicamente la fauna tropical es muy diversa; es decir, la producción biológica se reparte entre numerosas especies, sin que ninguna de ellas, por lo general, alcance biomásas mucho más elevadas que el resto. Éste es el marco de muchas pesquerías artesanales que tienen lugar dentro y en torno de esteros, lagunas y bahías.

La costa occidental de Baja California corresponde al límite sur del sistema de la Corriente de California, de características templadas, y al límite norte de la región tropical: es, por lo tanto, una zona de transición climática y biológica. A diferencia de la tropical, la fauna templada suele ser menos diversa, con dominancia de unas pocas especies (incluida la generalidad de los recursos masivos) que concentran buena parte de la producción biológica, alcanzando grandes biomásas.

El Golfo de California también presenta características tropicales con una fauna diversa (además de un nivel elevado de endemismos); no obs-

tante, comparte con la costa occidental de la península un aspecto determinante para la producción biológica y pesquera en el medio marino: las surgencias, que determinan las regiones pesqueras por excelencia. Su descripción puede consultarse en otros textos (Mann y Lazier 1991); baste señalar aquí que las surgencias sostienen las más altas productividades observadas en regiones oceánicas al traer a la superficie aguas profundas, frías y ricas en nutrientes.

La energía puede ser aportada por el viento, como ocurre en la costa occidental de la península, en la de Sonora y Sinaloa, y en el Golfo de Tehuantepec; todas estas regiones en las que ocurren importantes recursos masivos. Además, en la región central del Golfo el agua es forzada por las mareas a través de los canales y fondos bajos alrededor de las Grandes Islas (Ángel de la Guarda y Tiburón), resultando también en surgencias. Ambos mecanismos confieren al Golfo características transicionales, y lo hacen la zona pesquera más importante de México y una de las regiones más productivas del océano mundial (Álvarez-Borrego y Lara-Lara 1991).

## ESCENARIOS E IMPACTOS POTENCIALES

La mayor limitante para evaluar la vulnerabilidad de la pesca al CCG es que no existen, para los mares mexicanos, escenarios formales (*i.e.* derivados de la modelación) a escala regional. Esta carencia impone opciones menos adecuadas: una, extrapolar al medio marino los escenarios establecidos para el clima terrestre; la otra, intuir los cambios regionales a partir de escenarios del clima marino referidos a escalas espaciales mayores.

Por ejemplo, un escenario del IPCC (Albritton *et al.* 2001) anticipa un incremento global en el nivel medio del mar (ver el capítulo *El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático*, IPCC, de M. Ávalos, en la sección II). Sus impactos ecológicos, entre los que se menciona la destrucción de hábitat costeros críticos para diversas especies (Costa *et al.* 1994), dependerán de la velocidad con la que el cambio ocurra. Para el Pacífico mexicano, el ritmo de incremento global de 1-2 mm por año parecería menor, considerando la adaptación que exhiben dichos ecosistemas ante variaciones naturales mucho más amplias (p. e., en eventos El Niño). En contraste, para el Golfo de México se han identificado riesgos elevados para regiones particulares (Ortiz y Méndez 2000), e impactos potenciales considerables en pesquerías como la del camarón (Park 1991).

Para el clima terrestre, el CCG podría resultar en incrementos de la temperatura y la precipitación (Magaña *et al.* 2000). Estas variaciones tienden a acompañar el desarrollo de eventos El Niño en el noroeste mexicano, cuya mayor frecuencia es también un posible escenario del CCG (Trenberth, 1999) (ver el capítulo *Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México*, de V. Magaña *et al.*, en esta sección). Regionalmente, El Niño reduce la biomasa fitoplanctónica, modifica la distribución de recursos masivos, y suele resultar en detrimentos de recursos bentónicos de alto valor. Aunque la captura de camarón tiende a aumentar, el balance general de estos eventos parece negativo para la pesca nacional (Lluch-Cota *et al.* 1999a).

La certidumbre en torno de este escenario, aunque adverso, permitiría al sector pesquero nacional explorar sus alternativas de adaptación y mitigación. No obstante, no es el único escenario posible. Bakun (1990), por ejemplo, sugirió que el calentamiento global, al incrementar el gradiente térmico tierra-océano, resultaría en una intensificación de las surgencias y en mayor productividad biológica, especialmente de recursos masivos como los pelágicos menores. Ambos escenarios, radicalmente diferentes, permiten inferir la gran incertidumbre que existe respecto de los impactos más probables en el nivel regional.

Incluso si existiera certeza en cuanto al escenario, el hecho de que las respuestas biológicas en general son no lineales (Cury y Roy, 1989) impide la generalización y obliga al análisis caso por caso. Por ejemplo, el colapso de la sardina en el Golfo de California en 1989 (de 300 mil a 3 mil toneladas) obedeció en parte a una intensificación del viento que rebasó los niveles óptimos para el desarrollo de las fases larvarias (Lluch-Cota *et al.* 1999b); pese a que, como se mencionó, ello parecería un escenario «favorable».

Finalmente, debe considerarse que la señal del CCG, cualquiera que sea, no es la única ni, al menos de momento, la más importante fuente de variabilidad regional. De hecho, las posibles tendencias del cambio global son muy poco evidentes en la generalidad de los registros oceánicos regionales, dominadas por el ENOS y por fluctuaciones decenales e interdecenales naturales de mayor amplitud. La más conocida es la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, Mantua *et al.* 1997), cuya interacción con el ENOS parece explicar la mayor parte de la variabilidad térmica a escala regional (Lluch-Cota *et al.* 2001). Por la dominancia de sus señales, puede anticiparse que las variaciones del PDO y otras oscilaciones naturales modularán, reforzando o cance-



lando, cualquiera de las tendencias resultantes del CCG en el clima marino del Pacífico mexicano. El equivalente podría presentarse en el Golfo de México ante la Oscilación del Atlántico Norte (Hurrell 1995), otra señal decenal cuyos efectos regionales han sido muy poco analizados.

La variabilidad decenal tiene además efectos ecológicos muy significativos; es, por ejemplo, la relacionada con las grandes variaciones en la abundancia y distribución de los pelágicos menores, indicativas de cambios mayores en la estructura y el funcionamiento del ecosistema (Lluch-Belda *et al.* 1992). Su interacción con las tendencias derivadas del cambio global será determinante respecto de los impactos del CCG en los principales recursos pesqueros, especialmente los masivos y los bentónicos de alto valor.

## VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN

Es claro entonces que el conocimiento actual no permite anticipar los efectos del CCG en la pesca nacional. En materia de predicción climática, los escenarios globales potenciales más desarrollados para el ambiente terrestre, son aún inciertos y hasta contrarios para el medio marino. Es mucho lo que deberá avanzarse en los próximos años en la instrumentación de modelos con la resolución espacial y temporal que permita analizar a escala regional las variables, estructuras y procesos oceánicos más significativos desde el punto de vista ecológico. Es además crítico que dichos esfuerzos incorporen la variabilidad natural: dada su magnitud, ninguno de los escenarios que se deriven de dichos modelos sería de utilidad práctica en ausencia de dicha consideración.

Colateralmente, es necesario desarrollar un conocimiento mínimo sobre los efectos ecológicos de la variabilidad ambiental, tanto la natural como la asociada al CCG. Hasta el momento dichos efectos han sido apenas abordados para unas pocas especies, y partiendo de un enfoque autoecológico que suele ignorar la complejidad de la estructura, función y adaptabilidad de los ecosistemas marinos. Finalmente, la modelación pesquera (*i.e.* la que con fines de manejo intenta predecir las tendencias de las poblaciones explotadas) podría empezar a considerar al ecosistema como objeto de estudio y a incorporar los efectos ambientales, lo que implica alejarse de sus enfoques más tradicionales.

Es urgente avanzar en estas direcciones a fin de evaluar la vulnerabilidad del sector pesquero ante el CCG; más aún, desde ahora se requieren las accio-

nes que mejoren su adaptación a un entorno cambiante. Dentro de la incertidumbre derivada de la falta de conocimientos suficientes, algo es seguro: con o sin cambio global, la actividad pesquera seguirá coexistiendo con una variabilidad cuyos efectos son mucho más dramáticos de lo que la experiencia en el medio terrestre permite intuir. Estamos lejos de contar con los elementos que permitan enfrentarla: las frecuentes y grandes variaciones en la abundancia y disponibilidad de los recursos pesqueros aún no pueden ser anticipadas con oportunidad, una limitante que cobra más relevancia al considerar la adaptación ante el cambio global.

En contraste, el país cuenta en otros aspectos con un margen de manobra gracias a un potencial de recursos aún no explotados, así como por el incremento del valor de la producción y el acceso a mejores mercados mediante el procesamiento y la certificación de sus productos; no obstante, las expectativas reales de que dicho margen sea aprovechable son pobres. Mientras que en el mundo (y en algunas pesquerías nacionales) la limitante de la sustentabilidad pesquera que se menciona con más frecuencia es la sobrexplotación, en México el principal freno al desarrollo pesquero es la incertidumbre, derivada en buena medida de los efectos de la variabilidad climática, que entre otras cosas dificulta el crédito y desalienta la inversión en el sector. Éste es el aspecto que más puede agravarse por el CCG, más allá de sus efectos reales, por la mera percepción de un riesgo aún mayor.

¿Cómo reducir el riesgo? Primero, mediante el desarrollo de la investigación orientada hacia líneas como las mencionadas en párrafos anteriores. La infraestructura y los recursos humanos necesarios, aunque claramente insuficientes, existen ya en cierta medida. Una condición indispensable para aprovecharlos es la instrumentación de esquemas de monitoreo; sistemáticos, autónomos, permanentes y preferentemente compatibles con esquemas globales como el Global Ocean Observing System (GOOS). Dichos esquemas, hoy prácticamente inexistentes, deberán alimentar bases de datos en tiempo real y de libre acceso sobre las principales variables físicas y biológicas de los mares mexicanos.

Contar con esta información básica facilitará abandonar el manejo tradicional de los recursos pesqueros, cada vez más cuestionado mundialmente (Botsford *et al.* 1997), y avanzar hacia un esquema de manejo adaptativo capaz de reaccionar con rapidez ante los cambios. Ello implica modificar muchos aspectos del manejo, no sólo los meramente técnicos (p. e., los modelos pesqueros) sino también los administrativos y hasta los legales.

Por ejemplo, es casi imposible que una medida regulatoria cualquiera pueda adecuarse rápidamente mientras dicha gestión sea conducida por una instancia centralizada, e implique además un complicado proceso en el seno del Poder Legislativo Federal.

Finalmente, el desarrollo de un manejo adaptativo de los recursos pesqueros deberá pasar por la delegación de esta facultad a las regiones en las que los recursos se explotan. El manejo regional no sólo tiene una visión más cercana de los problemas inmediatos, es además el que más fácilmente puede instrumentar esquemas participativos que involucren no sólo a la autoridad sino también a los usuarios y al sector académico directamente involucrado en la problemática. La presente estrategia no es la primera que se plantea a la luz de la alta variabilidad de los recursos pesqueros y de la fuerte incertidumbre que rodea a su explotación. En todo caso, la ocasión es oportuna: las acciones que permitan al sector pesquero enfrentar sus retos hoy, son las mismas que le permitirán aprovechar su margen de maniobra e incrementar su adaptabilidad ante el cambio global.

## BIBLIOGRAFÍA

- Albritton, D.L. 2001. Technical Summary. Pp. 21-83. En: J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (eds.) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press.
- Álvarez-Borrego, S., y J. R. Lara-Lara. 1991. Physical environment and primary productivity of the Gulf of California. The Gulf and Peninsular provinces of California. *Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol.* 47: 555-567.
- Bakun, A. 1990. Global climate change and intensification of coastal upwelling. *Science* 247: 198-201.
- Balart, E. F., y J. L. Castro-Aguirre. 1995. Estimación del impacto de la depredación de merluza sobre langostilla. Pp. 139-162. En: D. Aurióles-Gamboa y E. F. Balart (eds.). *La langostilla: biología, ecología y aprovechamiento*. La Paz, B.C.S.: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
- Botsford, L. W., J. C. Castilla y C. H. Peterson. 1997. The management of fisheries and marine ecosystems. *Science* 227: 509-515.
- Costa, M. J., J. L. Costa, P. R. Almeida y C. A. Assis. 1994. Do eel grass beds and salt marsh borders act as preferential nurseries and spawning grounds for fish? An example of the Mira estuary in Portugal. *Ecological Engineering* 3: 187-195.

- Cury, P. y C. Roy. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Can J. Aquat. Fish. Sci.* 46: 670-679.
- Everett, J. T. 1995. Fisheries. Pp. 513-537. En: R. T. Watson, M. C. Zinyowera y R. H. Moss (eds.) *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hurrell, J. W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science* 269: 676-679.
- INP (Instituto Nacional de la Pesca). 2000. *Sustentabilidad y pesca responsable en México: evaluación y manejo*. México: SEMARNAP.
- Lluch-Belda, D., S. Hernández-Vázquez, D. B. Lluch-Cota, C. A. Salinas-Zavala y R. A. Schwartzlose. 1992. The recovery of the California sardine as related to global change. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Inv. Rep.* 33: 50-59.
- Lluch-Cota, D. B., D. Lluch-Belda, S.E. Lluch-Cota, J. López-Martínez, M.O. Nevarez-Martínez, G. Ponce-Díaz, C.A. Salinas-Zavala, A. Vega-Velazquez, J.R. Lara-Lara, M.G. Hammann y J. Morales. 1999a. Las pesquerías y El Niño: Impactos de El Niño en el sector pesquero. Pp. 137-178. En: R. V. O. Magaña (ed.) *Impactos de El Niño en México*. México: SG-UNAM-IAI-CONACYT.
- , W.S. Wooster y S.R. Hare. 2001. Sea surface temperature variability in coastal areas of the Northeastern Pacific related to the El Niño-Southern Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation. *Geophys. Res. Lett.* 28: 2029-2032.
- Lluch-Cota, S. E., D. B. Lluch-Cota, D. Lluch-Belda, M. O. Nevarez-Martínez, A. Parés-Sierra, y S. Hernández-Vázquez. 1999b. Variability of sardine catch as related to enrichment, concentration and retention processes in the central Gulf of California. *Calif. Coop. Ocean. Fish. Invest. Rep.* 40: 184-190.
- Magaña, V., C. Conde, O. Sánchez y C. Gay. 2000. Escenarios físicos regionales. Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. Pp. 1-24. En: C. Gay (comp.) *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*. México: INE, SEMARNAP, UNAM, U.S Country Studies Program.
- Mann, K. H. y J. R. N. Lazier. 1991. *Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the oceans*. Cambridge: Blakwell Science.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace y R. C. Francis. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78: 1069-1079.

- Ortiz, P. M. A., y A. P. Méndez. 2000. Zonas costeras. Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México. Pp. 83-102. En: C. Gay (comp.) *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program*. México: INE, SEMARNAP, UNAM, U.S. Country Studies Program.
- Park, R. A. 1991. Testimony before the Subcommittee on Health and Environment, U.S. House of Representatives. *Global Climate Change and Greenhouse Emissions*, SN 102-154, 171-182.
- Salinas-Zavala, C. A., D. B. Lluch-Cota, S. Hernández-Vázquez y D. Lluch-Belda. 1992. Anomalías de precipitación en Baja California Sur durante 1990. Posibles causas. *Atmósfera* 5: 79-93.
- Trenberth, K.E. 1999. The extreme weather events of 1997 and 1998. *Consequences* 5(1): 3-15.

## Notas

---

\*Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.



# El cambio climático global y la economía mexicana

*Luis Miguel Galindo\**

## INTRODUCCIÓN

EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL se ha convertido en uno de los temas más intensamente discutidos internacionalmente en los últimos años (UNFCCC 1997). Estos debates<sup>1</sup> han incluido desde la evidencia científica del fenómeno hasta las formas de solucionarlo y los costos asociados a ello (Dornbusch y Poterba 1993). La intensidad del debate refleja fielmente la importancia del tema. Por ejemplo, Houghton, Jenkins y Ephraums (1990) estiman que las concentraciones de gases de efecto invernadero<sup>2</sup> en la atmósfera han crecido sustancialmente desde la revolución industrial a la fecha, y que en los últimos cincuenta años han aumentado a una tasa anual de 3.3%, por lo que muy probablemente se dupliquen durante este siglo.<sup>3</sup> Las consecuencias<sup>4</sup> de ello son múltiples, destacando la elevación de la temperatura, la destrucción de áreas boscosas, agrícolas y ganaderas, el derretimiento de las capas de hielo de los polos, aumento del nivel del mar, erosión acelerada de las costas, intensificación de las temperaturas extremas en diferentes regiones del mundo, cambios en el régimen de lluvias, modificaciones en la humedad de los suelos y del aire, e incluso problemas de cáncer de la piel o de visión, cambios bruscos en el clima y en las condiciones atmosféricas, lo que representa además un peligro potencial para la extinción de diversas especies de flora y fauna.

Debe sin embargo reconocerse que existe aún un alto grado de incertidumbre como consecuencia de las dificultades para definir con precisión la relación entre la evolución económica global y el comportamiento de los principales gases de efecto invernadero. Así, no obstante la alta correlación

entre concentraciones de gases invernadero y la elevación de la temperatura, las decisiones sobre el cambio climático tendrán que tomarse en un entorno de incertidumbre donde debe predominar una visión estratégica de largo plazo. México debe ponderar entonces los costos de una acción prematura pero precautoria contra los costos de la irreversibilidad de la inacción dado el nivel de incertidumbre. En este contexto, la mejor opción para México es una estrategia conocida como de seguro que combine un mejor conocimiento del fenómeno en referencia al país con cambios moderados que permita evitar pérdidas irreversibles.

En este sentido, la definición precisa de las líneas base resulta esencial para conocer las posibilidades e impactos de los proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio o incluso los costos de utilizar líneas base equivocadas (Chomitz 1997). Por ejemplo, una línea base muy alta llevaría a certificar más proyectos de los debidos, mientras que una línea base muy baja le quitaría fondos a proyectos genuinos.

Este trabajo tiene como objetivo fundamental analizar la relación entre crecimiento económico y emisiones simulando diversos escenarios para México. Esto permitirá reducir en alguna medida el grado de incertidumbre al ofrecer un indicador de los costos de no hacer nada o de actuar demasiado rápido y definir las líneas base. Por desgracia, este trabajo no incluye una discusión más amplia sobre el principio de adición.

## CRECIMIENTO ECONÓMICO, INTENSIDAD ENERGÉTICA Y EMISIONES DE GASES INVERNADERO

La economía mexicana, en los últimos años, ha observado importantes transformaciones estructurales cuyas consecuencias sobre el medio ambiente son complejas y aún difíciles de cuantificar con exactitud. En conjunto, la evidencia disponible para México sugiere que el proceso de industrialización se ha concentrado tradicionalmente en actividades con altos índices de contaminación, mientras que la dinámica de las actividades agropecuarias no contribuyó a preservar los bosques. El comportamiento de la industria mexicana no obedece, sin embargo, a lo que se conoce como un paraíso de contaminación, sino que corresponde a la hipótesis de Linder, en donde la oferta sigue a la demanda y por tanto se asocia a una fase específica del proceso de crecimiento económico. Esto significa que la composición del producto es un factor relevante para determinar el monto total de emisiones a la atmósfera.



Una estimación de la relación entre emisiones de gases, el consumo energético y el crecimiento económico puede hacerse a la eficiencia energética como un factor fundamental para explicar la demanda de energía. Debe, sin embargo, considerarse que si bien la evidencia empírica sugiere que el consumo de energía y el producto tienden a moverse en paralelo, ello no es necesariamente cierto respecto al monto de emisiones (Dudek, Goffman, Salon y Wade 1997). La relación entre el comportamiento del producto y el consumo de energía puede definirse como:

$$(1) \quad E_{t+1} - E_t = \alpha_{0t}(Y_{t+1} - Y_t) + Y_{t+1}(\alpha_{0t+1} - \alpha_{0t})$$

Donde  $E_{t+1}$  y  $E_t$  representan a la demanda de energía para los periodos  $t+1$  y  $t$ ;  $\alpha_{0t}$  representa el coeficiente de los requerimientos de energía para el periodo  $t$  para un determinado nivel de producto ( $Y_t$ );  $\alpha_1$  es el coeficiente que asocia la demanda de energía con el nivel de producto del tiempo  $t+1$ . De este modo, el primer término representa el incremento en el consumo total de energía entre el periodo  $t$  y  $t+1$  suponiendo constante al coeficiente de demanda de energía a producto. El segundo término representa al consumo de energía en el periodo  $t+1$  ocasionado por los cambios en el coeficiente de demanda de energía. De este modo, una economía que con el tiempo se hace más eficiente energéticamente, debe tener un segundo término negativo.

Los cambios en la eficiencia energética dependen de la elasticidad precio de la demanda y de las “mejoras autónomas” en la eficiencia energética ( $INOV_t$ ) asociadas a la difusión de tecnologías más limpias, que pueden representarse como:<sup>5</sup>

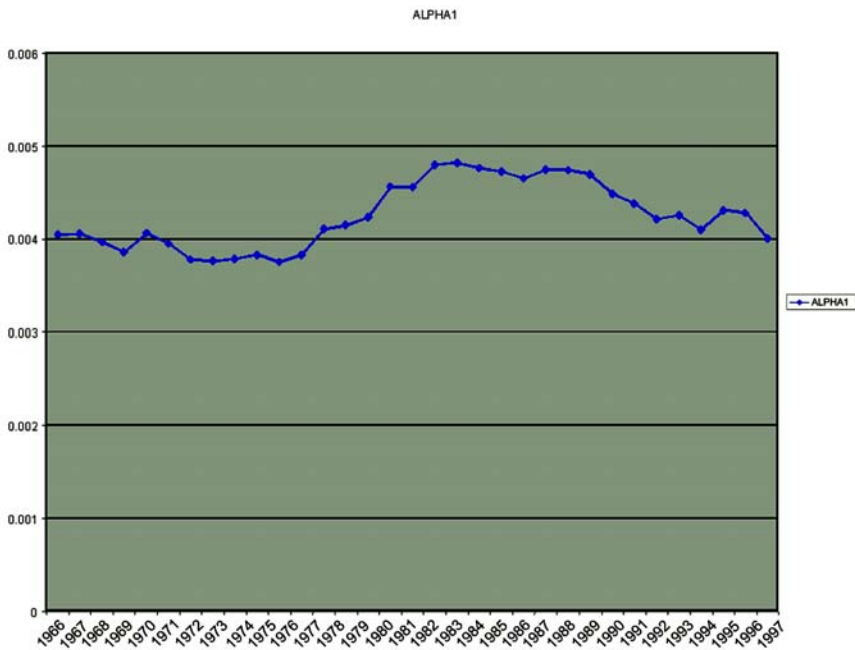
$$(2) \quad (\alpha_{0t+1} - \alpha_{0t}) = F(PE_t, INOV_t)$$

La identidad (1) permite simular el comportamiento de la demanda de energía en el futuro conociendo el comportamiento del producto, en dos posibles escenarios: en el primer caso, suponiendo que la eficiencia energética se mantiene constante y por tanto el segundo término de la identidad se hace cero. En el segundo caso puede simularse el comportamiento de la economía mexicana de acuerdo con diversos supuestos de aumento de la eficiencia energética. Aunado a esta reducción de la intensidad energética puede presentarse una reducción en las emisiones por unidad de combustible y al cambio de combustibles que requieren simulaciones adicionales.

La información contenida en la ecuación (1) permite identificar algunas características del comportamiento energético en México para el periodo de 1965 a 1997. En efecto, las pruebas de raíces unitarias<sup>6</sup> de Dickey Fuller (1981) y de Phillips Perron (1988) indican que el consumo final de energía ( $E_t$ ), el producto interno bruto ( $Y_t$ ), el índice de precios relativos de la energía ( $PR_t$ ) y los índices de precios de la energía ( $PE_t$ ) y el consumidor ( $P_t$ ) son series no estacionarias. En este sentido, las pruebas de raíces unitarias confirman que existe una trayectoria ascendente del consumo de energía y del ingreso, lo que sugiere la posibilidad de tendencias comunes en ambas series y, por tanto, de la posible presencia de cointegración entre las series.

Asimismo, el análisis de la ecuación (1) permite identificar el comportamiento de la intensidad energética en México medida como la relación entre consumo total de energía y producto ( $E_t/Y_t$ ), y que corresponde al coeficiente  $\alpha_{0t}$  de la ecuación (1). Este coeficiente tiene un comportamiento errático, sin que pueda observarse una tendencia determinada (gráfica 1). En efecto, la intensidad energética tiende a elevarse durante parte de la dé-

GRÁFICA 1. EVOLUCIÓN DE LA INTENSIDAD ENERGÉTICA EN MÉXICO ( $\alpha_{0t}$ )



cada de los setenta y ochenta para después volver a disminuir y ubicarse nuevamente en alrededor de 0.004 y 0.005. Este comportamiento probablemente está asociado a la evolución de los precios relativos de los combustibles y a cambios en la composición del producto. Asimismo, la trayectoria de comportamiento histórico sugiere que de no instrumentarse acciones específicas importantes, la intensidad energética oscilará en alrededor de 0.004. Así, en la elaboración de las líneas base para México debe considerarse como una posibilidad real mantener constante la eficiencia energética.

Con objeto de analizar con mayor detalle los factores que determinan la intensidad energética y sus cambios, se procedió entonces a estimar una aproximación de la ecuación (2) de acuerdo con el supuesto de que la innovación tecnológica autónoma puede representarse como una serie estacionaria. Las ecuaciones (3), (4), (5) y (6) se estimaron por el método general de momentos (GMM) corrigiendo por posibles problemas de autocorrelación de orden uno. Los resultados obtenidos indican que los precios relativos o sus cambios tienen un efecto pequeño sobre la intensidad energética o sus modificaciones. Esto implica que es difícil inducir una mayor difusión del progreso técnico por medio exclusivamente de modificaciones en los precios relativos. Este resultado es particularmente importante para simular el comportamiento de largo plazo de la intensidad energética en México, ya que ello indica que es posible elevar los precios de la energía sin generar simultáneamente un cambio en el coeficiente de la intensidad energética.

$$\begin{aligned}
 (3) \quad & \alpha_{0t} = -5.45 + .02prt - .03prt-1 \\
 & \quad \quad (-239.15) (0.17) \quad (-0.23) \\
 (4) \quad & \alpha_{0t} = -8.41prt - 2.91prt-1 \\
 & \quad \quad (-4.98) \quad (-1.96) \\
 (5) \quad & \alpha_{1t} = 0.005 + 0.07\Delta prt - 0.03\Delta prt-1 \\
 & \quad \quad (0.86) (1.07) \quad (-0.82) \\
 (6) \quad & \alpha_{1t} = 0.02\Delta prt - 0.02\Delta prt-1 \\
 & \quad \quad (0.44) \quad (-0.65)
 \end{aligned}$$

Periodo: 1965-1997

El consumo de energía en México puede modelarse como una función tradicional de demanda (Varian 1984 y Deaton y Muellbauer 1980):

$$(7) \quad \ln(E_t) = \Phi_0 + \Phi_1 \ln(Y_t) + \Phi_2 \ln(PE/P)_t + \sum \Phi_{3i} \ln(P_i/P)_t + u_t$$

La ecuación (7) permite conocer la elasticidad ingreso de la demanda de energía ( $\Phi_1$ ), la elasticidad precio de la energía ( $\Phi_2$ ) y las elasticidades cruzadas precio de la demanda ( $\Phi_{3i}$ ). Estas elasticidades permiten identificar posibles escenarios, costos de mitigación y reducir la incertidumbre en la elaboración de las líneas base.

La ecuación (7) debe estimarse utilizando el procedimiento de Johansen (1988) como consecuencia del orden de integración de las variables incluidas. El procedimiento de Johansen incluyendo sólo al consumo y al ingreso indica que no existe una relación estable de largo plazo entre ambas variables. Este resultado es consistente con el orden de integración de la intensidad energética, en donde se obtiene que es una serie no estacionaria de orden I(1). De este modo, si bien el crecimiento económico está asociado al consumo de energía, es difícil simular el comportamiento de este último atendiendo exclusivamente a esta variable y excluyendo a los precios relativos.

El procedimiento de Johansen (1988) indica que existe al menos un vector de cointegración entre el consumo de energía, el ingreso y los precios relativos (cuadro 1). La demanda de energía tiene una elasticidad ingreso positiva pero menor que uno y una elasticidad precio negativa aunque también relativamente baja. Estos resultados son consistentes con otras estimaciones, en donde se observa que la demanda de energía aumenta conforme crece el ingreso, pero menos que proporcionalmente.

La elasticidad precio de la demanda de la energía corresponde al valor promedio sugerido por otros estudios para los países desarrollados. Debe, sin embargo, considerarse que las elasticidades precio cruzadas de la demanda para el caso de la energía pueden ser incluso superiores a las propias elasticidades precio (Martin 2000). Este resultado implica que un alza en los precios no necesariamente conduce a una reducción lineal en los contaminantes, ya que ello depende de las sustituciones de combustibles que se presenten. En el extremo, un alza en el precio de un combustible limpio puede traducirse en un aumento de combustibles más intensivos en emisiones contaminantes, no obstante que el total de la demanda se reduzca. Asimismo, deben de considerarse los efectos contrarios que ocasionan los movimientos en los precios de la oferta (Martin 2000). Estimaciones recientes (Manne y Richels 1993) sugieren que la elasticidad precio de la demanda oscila entre -0.2 y -0.6, y la de la oferta<sup>7</sup> es de alrededor de 0.5. Debe considerarse también que el efecto de la elasticidad precio de la demanda sobre la contaminación no es lineal, tanto por el efecto de las mejoras en los

combustibles como por los efectos de las elasticidades cruzadas. Esto es, puede suceder que un aumento del precio de determinados energéticos se traduzca en un incremento, por ejemplo, de la demanda de combustibles sintéticos con mayor contenido de emisiones por unidad de energía. Asimismo debe considerarse que los agentes económicos tratan de minimizar los costos generales y no exclusivamente aquellos asociados con la energía, de modo que pueden presentarse ajustes negativos al medio ambiente en el largo plazo, tales como una reducción en el empleo. En este sentido pueden presentarse efectos colaterales, en donde el aumento de precios puede traducirse en una reducción en el crecimiento económico.

$$(8) \quad \ln(E_t) = 0.63 \ln(Y_t) - 0.39 \ln(PR_t)$$

CUADRO 1: ESTADÍSTICOS DEL PROCEDIMIENTO DE JOHANSEN INCLUYENDO LA DEMANDA DE ENERGÍA, EL INGRESO Y LOS PRECIOS RELATIVOS

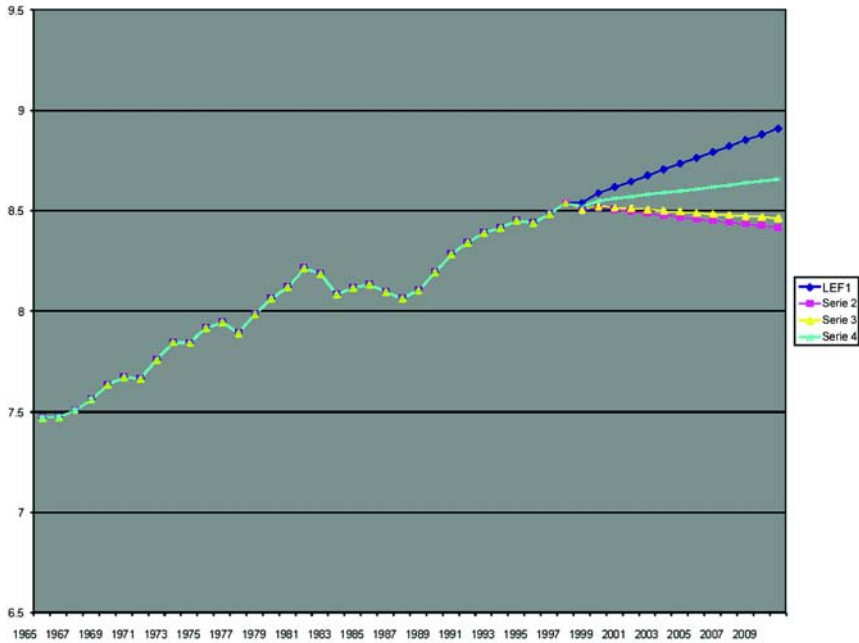
HO:RANGO=P	-TLOG(1-\mu)	T-NM	95%	-T/SUMLOG (.)	T-NM	95%
P=0	20.14*	15.83	17.9	22.6	17.76	24.3
P<=1	2.18	1.71	11.4	2.45	1.93	12.5
P<=2	0.27	0.21	3.8	0.27	0.21	3.8

Notas: -Tlog(1-\mu)=prueba de la raíz característica máxima.  
-T/sumlog (.)=Prueba de la traza.

Periodo: 1965-1995

El modelo estimado permite entonces elaborar diversos escenarios de crecimiento económico, consumo de energía y emisiones para México hasta el año 2010. Estos escenarios permiten evaluar las posibles trayectorias y líneas base para México. Inicialmente se realizaron diversas simulaciones con distintas alzas en los precios relativos, pero suponiendo, en todos los casos, un crecimiento económico continuo de 5% anual de la economía mexicana. Todos estos escenarios están sintetizados en la gráfica 2. El primer escenario, representado por la línea más elevada, muestra el aumento del consumo de energía sólo extrapolando la situación actual. Esto es, manteniendo fijos los precios relativos y un ritmo de expansión de 5% del PIB. En este

GRÁFICA 2. SIMULACIONES CON DIFERENTES ALZAS DE PRECIOS Y CRECIMIENTO ECONÓMICO DE 5%



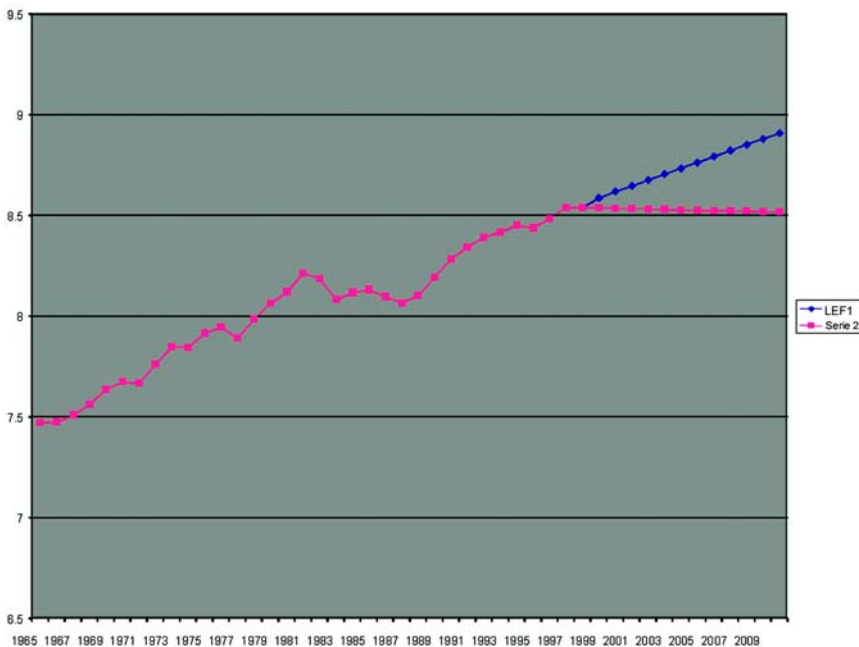
caso, el ritmo de expansión del consumo de energía y emisiones parece incompatible con un crecimiento económico sustentable.

Los dos siguientes escenarios, que corresponden a un aumento del 5% de producto y a alzas de los precios relativos de 10 y 9% anual, son representados por las dos líneas más bajas de la gráfica 2, respectivamente. En este caso se observa que es posible contener el consumo de energía; sin embargo, ello implica optar por una estrategia donde el precio de la energía se duplica en menos de diez años. Las consecuencias de no elevar el precio en esta magnitud pueden observarse en la segunda línea de arriba hacia abajo (gráfica 2), donde se considera un aumento de precios de 5% con una expansión del producto de 5% anual. En este caso es evidente que el aumento del precio del 5% es claramente insuficiente para contener el aumento de la energía. Esto indica que no obstante que los precios estén incidiendo negativamente sobre la demanda, el efecto del ingreso es superior. Por el contrario, en un escenario donde el ritmo de crecimiento económico se reduzca a

3% puede observarse que es posible entonces contener relativamente el consumo energético. En efecto, la gráfica 3 muestra dos escenarios: el primero con un precio fijo y un aumento del PIB de 3% representado por la línea superior, y el segundo, con el mismo ritmo de expansión económica pero con un aumento de precios de 5% anual. Estas simulaciones indican la fuerte dependencia del consumo energético respecto al crecimiento económico y las dificultades de instrumentar una política de precios como mecanismo de control y, en todo caso, el alto costo de una política de este tipo. La alta correlación entre crecimiento y consumo de energía es uno de los retos a resolver en los próximos años.

Las simulaciones realizadas con reducciones de la intensidad energética se presentan en la gráfica 3. El escenario elegido implica una reducción paulatina de la intensidad energética de alrededor de 25% durante los próximos diez años en el coeficiente  $\alpha_{0t}$ . Este ritmo de reducción es ciertamente superior a la evolución histórica, por lo que ello sólo sería posible en caso

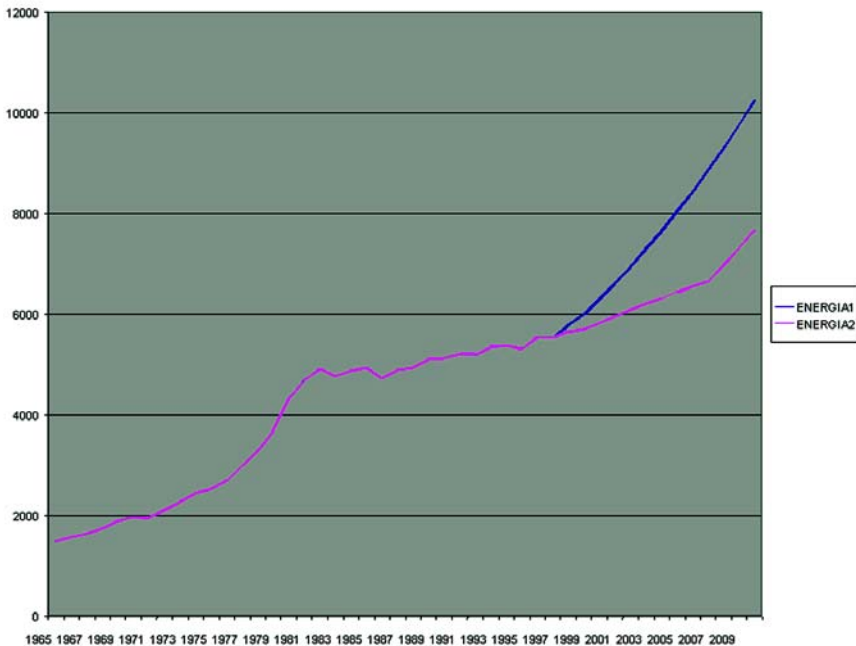
GRÁFICA 3. SIMULACIONES CON DIFERENTES ALZAS DE PRECIOS Y CRECIMIENTO ECONÓMICO DE 3%



de aplicarse políticas específicas fuertemente activas. Esta reducción del coeficiente tiene un efecto inicial significativo que se pierde a lo largo del periodo de análisis, de modo que para el año 2010 se observa una clara tendencia ascendente del consumo de energía. Este resultado sugiere que un proceso de innovación tecnológica que se traduzca en una menor intensidad energética no es suficiente para controlar el consumo de energía.

Estos resultados confirman la estrecha asociación entre la evolución del producto y el consumo energético. A ello contribuye el que la intensidad energética muestre un comportamiento relativamente cíclico. De este modo, de mantenerse un elevado ritmo de crecimiento económico en México en los próximos diez años, el aumento del consumo de energía y sus emisiones asociadas serán incompatibles con un desarrollo sustentable. Los incrementos en los precios relativos y las reducciones en la intensidad energética contribuyen a reducir el consumo de energía, pero cada uno por separado son insuficientes para controlarlo. En este sentido, deberán de instrumentarse medidas más drásticas y utilizarse simultáneamente estrategias de precios y

GRÁFICA 4. SIMULACIONES CON DIFERENTES INTENSIDADES ENERGÉTICAS



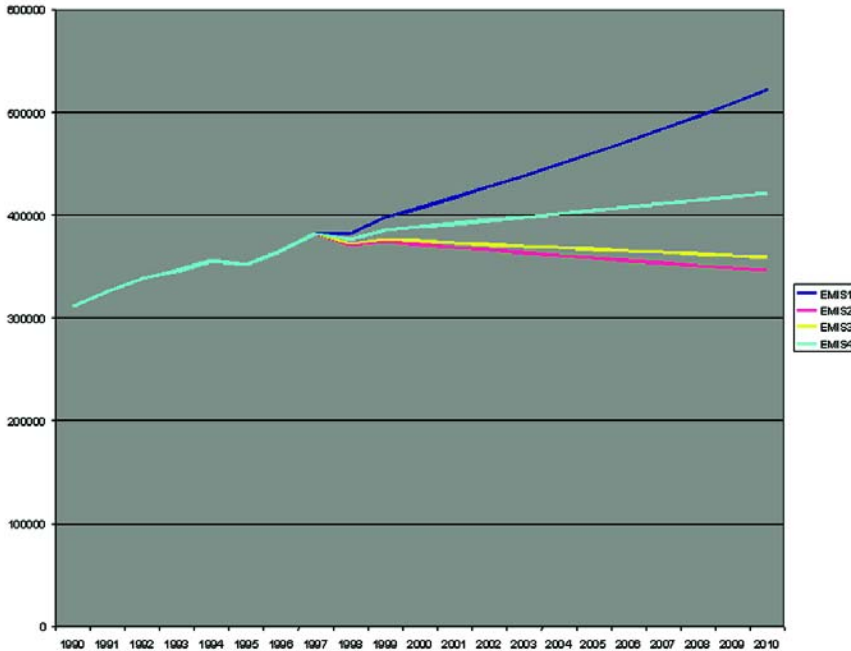


de innovación tecnológica para separar el consumo de energía y el crecimiento económico, en particular en el caso donde se observe una expansión económica de alrededor de 5% anual.

La gráfica 5 sintetiza tres escenarios de emisiones tomando como base el inventario de emisiones de 1990. En los tres casos se supone un ritmo de expansión del producto de 5%, una intensidad energética constante y una relación de emisiones a energía también constante, y sólo se modifican los precios relativos de la energía en 10, 9 y 5%, respectivamente. Las simulaciones realizadas confirman que con un crecimiento económico vigoroso sólo es posible reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera doblando el precio cada diez años, lo que no parece ni económica ni socialmente viable. Así, esta situación es incompatible con un crecimiento económico sustentable.

La gráfica 6 presenta una simulación considerando un crecimiento de 5%, precios fijos y una reducción paulatina de la intensidad energética de

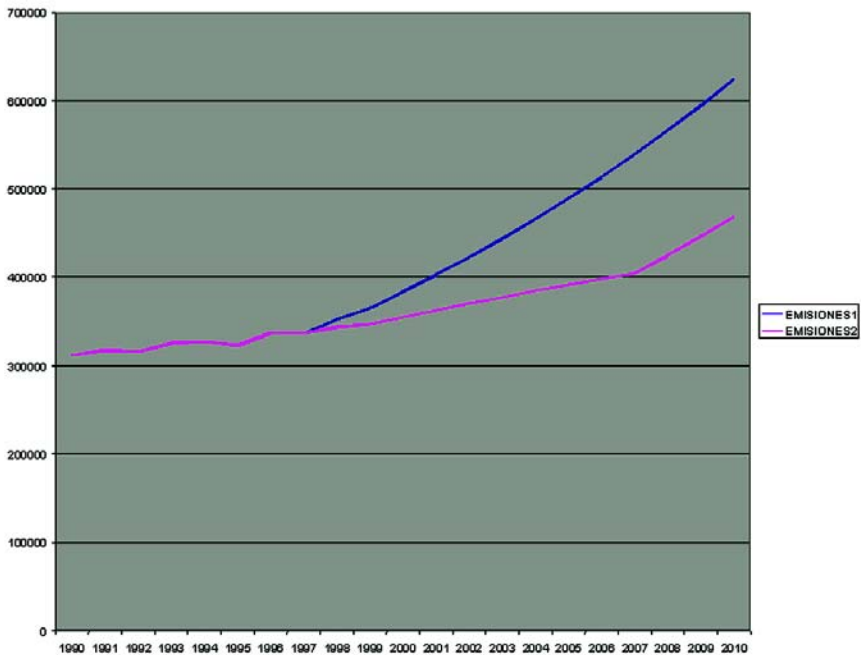
GRÁFICA 5. ESCENARIOS DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> CON DIFERENTES AUMENTOS DE PRECIOS



0.004 a 0.003 que se manifiesta en el comportamiento de las emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera. Estas simulaciones muestran también que esta reducción en el coeficiente es insuficiente para contener el aumento del consumo de energía. Estos resultados muestran que en el escenario más probable de un crecimiento económico continuo con una intensidad energética similar al comportamiento histórico, entonces las emisiones a la atmósfera en los próximos años tenderán a crecer aceleradamente. Esto indica que es necesario instrumentar una estrategia que incluya medidas sustanciales para separar el crecimiento económico de las emisiones a la atmósfera antes de adquirir compromisos específicos de reducciones. De lo contrario, México puede verse en el dilema de incumplir los compromisos adquiridos o tener que reducir su ritmo de crecimiento económico.

Asimismo debe destacarse que de mantenerse la situación actual, la estimación de la línea base para México resulta bastante elevada, lo que sugiere que existe una gran variedad de proyectos que pueden ser aprobados. Esto

GRÁFICA 6. ESCENARIOS DE EMISIONES DE  $\text{CO}_2$  CON DIFERENTES INTENSIDADES ENERGÉTICAS Y CRECIMIENTO ECONÓMICO DE 3%



es, el comportamiento histórico sugiere que la intensidad energética no va a disminuir y que, por tanto, ganancias en este sentido deben de considerarse sujetas a incluirse dentro del marco del mecanismo de desarrollo limpio. A este respecto, sin embargo, debe reconocerse que el comportamiento agregado de la intensidad energética no permite diferenciar entre lo que se origina por cambios en la eficiencia energética o por modificaciones en la estructura sectorial.

## CONCLUSIONES Y COMENTARIOS GENERALES

México debe de avanzar en la definición de su estrategia sobre cambio climático a fin de reducir los efectos negativos irreversibles y obtener las mayores ventajas de las estrategias internacionales a instrumentarse gracias a la participación en su diseño y a las ventajas que otorga el incorporarse desde el inicio a estos procesos. La definición adecuada de una estrategia para México requiere de un conocimiento de las diversas trayectorias de emisiones y simulaciones sobre los posibles escenarios de mitigación.

La evidencia disponible para México sugiere que la relación entre el consumo de energía y el producto es compleja. En efecto, al descomponer la relación del consumo de energía con el producto entre un componente constante y un efecto que captura los cambios en la eficiencia energética, se observa que la eficiencia energética no se mantiene constante, mostrando un comportamiento cíclico con una ligera tendencia a elevar el consumo por unidad de producto. Este comportamiento de la energía por unidad de producto puede asociarse, en alguna medida, a la evolución de los precios relativos y al proceso de innovación y difusión tecnológica y a los cambios en la composición del producto.

La estimación de una función de demanda de energía permite identificar la existencia de una relación estable de largo plazo entre la demanda de energía, el ingreso y los precios relativos. Este vector de cointegración puede interpretarse como una función de demanda con una elasticidad ingreso de alrededor de 0.6 y una elasticidad precio negativa de 0.4. Estos resultados son relativamente consistentes con los obtenidos para otros países. Esta elasticidad precio puede entonces utilizarse para estimar diversas trayectorias de mitigación con base en movimientos en los precios relativos. Debe asimismo mencionarse que el procedimiento de Johansen no muestra que exista una relación estable únicamente entre el consumo y el producto, lo que

confirma la importancia de los precios relativos y la innovación tecnológica para establecer una relación de largo plazo.

Las simulaciones realizadas de acuerdo con diversos escenarios de crecimiento económico y alzas de precios de los energéticos indican que una trayectoria de crecimiento acelerado, con la actual intensidad energética y en emisiones, es insostenible en el largo plazo. En este caso, incluso aumentos de precios que doblen el actual son insuficientes para controlar el consumo de energía y, por tanto, las emisiones para la próxima década. Sólo en un escenario de crecimiento económico moderado puede contenerse la demanda de energía con un aumento de precios de 5% anual. Sin embargo, la magnitud de los aumentos los hacen inviables tanto política como económicamente. Asimismo, las simulaciones realizadas considerando cambios paulatinos en las intensidades energéticas indican que transformaciones favorables en este sentido son también insuficientes.

En conjunto, las diversas trayectorias de crecimiento indican que los aumentos de precios y la innovación tecnológica contribuyen al proceso de mitigación, pero son insuficientes por separado. En ese sentido, la línea base para México es ciertamente elevada, por lo que pueden financiarse una cantidad importante de proyectos.

De este modo, es necesario que en México se instrumenten diversas medidas para buscar separar el crecimiento económico del consumo de energía y de las emisiones de gases asociadas. Esto no parece posible concentrando la estrategia en una sola medida. Por el contrario, las simulaciones realizadas sugieren que ello sólo es posible realizando simultáneamente ajustes en los precios relativos, en la innovación tecnológica y en la composición del producto.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chomitz, K. M. 1997. *Baselines for greenhouse gas reductions: problems, precedents, solutions*. Oficina de abatimiento de carbono. Banco Mundial.
- Cline. 1993. On cooperative approaches to global warming: comments. Pp. 222-228, En: R. Dornbusch y J. M. Poterba (eds.) *Global warming: economic policy responses*. Boston: MIT Press.
- Dickey, D. y W. A. Fuller. 1981. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica* 49: 1057-1072.

- Deaton, A. y J. Muellbauer. 1980. *Economics and consumer behavior*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dornbusch, R. y J. M. Poterba. 1993. *Global warming: economic policy responses*. Boston: MIT Press.
- Dudek, D. J., J. Goffman, D. Salon y S. Wade. 1997. *More clean air for the buck: lessons from the U.S. acid rain emissions trading program*. Environmental Defense Fund.
- Gerelli, E. 1993. Economic responses to global warming: a European perspective. Pp. 167-190. En: R. Dornbusch y J.M. Poterba (eds.) *Global warming: economic policy responses*. Boston: MIT Press.
- Houghton, J. T., Jenkins, G. J. y J. J. Ephraus. 1990. *Climate change. The IPCC scientific assessment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Johansen, S. 1988. Statistical analysis of cointegrating vectors. *Journal of Economics Dynamics and Control* 12: 231-254.
- Jorgenson, D. W. y P. J. Wilcoxon. 1998. Environmental regulation and U.S. economic growth. vol. 2. Pp. 157-194. En: D. W. Jorgenson (ed.) *Growth: energy, the environmental and economic growth*. Boston: MIT Press.
- Manne, A. S. y R. G. Richels. 1993. *Buying greenhouse insurance: the economic costs of CO<sub>2</sub> emissions limits*. Boston: MIT Press.
- Martín, J. P. 1993. Comments on technological substitution options for controlling greenhouse gas emissions. Pp. 161-165. En: R. Dornbusch y J. M. Poterba (eds.) *Global warming: economic policy responses*. Boston: MIT Press.
- Martin, W. 2000. Reducing carbon dioxide emissions through joint implementation of projects. *Policy research working paper 2359*, Banco Mundial.
- Michaelowa, A. y M. Dutschke. 1998. Interest groups and efficient design of the Clean Development Mechanism under the Kyoto Protocol. *International Journal for Sustainable Development* 1(1):24-42.
- Nordhaus, W. D. 1993. Economic approaches to greenhouse warming. Pp. 7-31. En: R. Dornbusch y J.M. Poterba (eds.) *Global warming: economic policy responses*. Boston: MIT Press.
- Phillips, P. C y P. Perron. 1988. Testing for unit roots in time series regression. *Biometrika* 75: 335-346.
- Rotty, R. y R. Marland. 1989. Report NDP-006. Oak Ridge National Laboratory, USA.
- Schelling, T. C. 1993. Economic responses to global warming: prospects for cooperative approaches. In: R. Dornbusch y J.M. Poterba (eds.) *Global warming: economic policy responses*. Boston: MIT Press.

SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 2000. *Estrategia Nacional de Acción Climática*. Documento para Consulta Pública. México.

UNFCCC (United Nations Convention to Climate Change). 1997. Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. Disponible en: [www.unfccc.de](http://www.unfccc.de).

Varian, H. R. 1984. *Microeconomic analysis*. Norton International Edition.

## Notas

---

\* Catedrático extraordinario Narciso Bassols, Facultad de Economía, UNAM. Agradezco los comentarios de Francisco Giner, Julia Martínez y Walter Vergara. Este trabajo incluye algunos de los resultados incluidos en el proyecto sobre “Cambio Climático y fundamentos económicos: el caso de México”, financiado por el Banco Mundial. Desde luego se aplica el descargo usual de los errores. Asimismo, los comentarios o juicios presentados no representan el punto de vista del Banco Mundial y corresponden sólo a la opinión del autor.

1. Véase Gerelli (1993) y Michaelowa y Dutschke (1998) para una síntesis de este debate.
2. Rotty y Marland (1989) estiman que las emisiones anuales son de aproximadamente 6000 millones de toneladas de carbono, de las cuales la mitad permanecen en la atmósfera.
3. Las proyecciones realizadas (Schelling 1993 y Cline 1993) sugieren que para el año 2025 se habrán doblado las emisiones de gases de efecto invernadero con un impacto retardado en el clima.
4. Véase, por ejemplo, Nordhaus (1993, 38).
5. Para Manne y Richels (1993, 34) existe un efecto adicional dado por el precio absoluto del petróleo como consecuencia de su importancia en la generación de energía.
6. Las pruebas están disponibles con el autor.
7. La elasticidad de la oferta es relevante en el caso en que se considere un aumento sustancial del precio.

## Sección IV

### Mitigación





# Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional\*

*Omar Maserá\*\* y Claudia Sheinbaum\*\*\**

*En el año 2000, los autores realizaron un esfuerzo de modelación que por primera vez integró la mitigación forestal y la energética, que sirvió como base para ver el tipo de trayectoria que siguen estos sectores. Cabe mencionar que algunas cifras que utilizaron, como las del crecimiento del producto interno bruto del país, no son las actuales.*

## INTRODUCCIÓN

México contribuye con cerca de 2% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), representando el decimotercero país que emite más bióxido de carbono, por quema de combustibles fósiles, a la atmósfera del planeta. De seguir la tendencia actual del consumo de energía, y en un escenario de PIB de 6.0%, se estima que para el año 2010, México estará emitiendo cerca del doble de lo actual.

La mitigación de los efectos negativos de un cambio potencial en el clima de la Tierra requerirá de acciones precisas y coordinadas por la comunidad internacional, de acuerdo con sus responsabilidades “comunes pero diferenciadas” (UN 1992).

El análisis de las opciones de mitigación para México es relevante por diversas razones. Primero, México se encuentra dentro de los 20 países con la mayor emisión de GEI en el mundo. Segundo, desde 1994 México se convirtió en miembro tanto de la OCDE como del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) y ha sido sujeto de presiones para poner un límite a sus emisiones futuras de GEI o al crecimiento de las mismas. Sin embargo, al mismo tiempo México es evidentemente un país en desarrollo en tér-

minos de su ingreso promedio per cápita, la carencia de servicios básicos para una porción muy importante de su población, y la cantidad de emisiones per cápita. Finalmente, el país no tiene todo el capital necesario para realizar inversiones incrementales en las opciones de mitigación para reducir las emisiones de GEI. Bajo este marco es particularmente importante analizar las tendencias potenciales en las emisiones de GEI, identificar las fuerzas que guían los cambios en las mismas y evaluar las opciones de mitigación que contribuyan en el avance de las prioridades para el desarrollo del país. En este trabajo se examinaron escenarios futuros de mitigación de emisiones de carbono para un conjunto seleccionado de opciones energéticas y forestales en México.

## SITUACIÓN ACTUAL

Como un país exportador de petróleo, México depende fuertemente de los combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades energéticas. Cerca de 96% de la energía primaria proviene de los hidrocarburos. Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el uso de la energía pasaron de 150 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en 1975 a 297 en 1990 y a 340 en 1996 (Sheinbaum *et al.* 1999, IEA 1998). México tiene 49 millones de hectáreas (ha) de bosques naturales; además existen 21 millones de ha clasificadas como tierras forestales degradadas. La deforestación y la degradación de los bosques en el país han sido muy graves en las últimas dos décadas, con una pérdida estimada de 670,000 ha por año a principios de los noventa (Masera *et al.* 1997). Aproximadamente se emiten cada año 191 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (52 millones de toneladas de C) por deforestación (Masera y Ordoñez 1997).

En la actualidad, varias actividades en el país cuyo objetivo es atender las prioridades nacionales de desarrollo, simultáneamente ayudan a reducir la tasa actual de crecimiento de las emisiones de GEI. Estas actividades incluyen, dentro del sector energético, mejoras en la eficiencia energética del sector industrial, transporte, comercial y residencial; cambio a combustibles menos intensivos en la emisión de carbono, y la creación de estándares para nuevos equipos. Dentro del sector forestal, la adecuada conservación y manejo de los bosques naturales, las alternativas para disminuir la deforestación, así como la reforestación de las tierras degradadas y deforestadas y el fomento de los sistemas agroforestales son también

acciones que al cumplir prioridades de conservación forestal, también ayudan a mitigar las emisiones de GEI (ver los demás capítulos en la presente sección).

## METODOLOGÍA

Se desarrolló un modelo “de abajo hacia arriba” (*bottom-up*) en los institutos de Ingeniería y de Ecología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), para el cálculo y la simulación integrada de los sectores energético y forestal de México. El modelo consta de tres secciones básicas, lo cual permite realizar estimaciones tanto para el año base como para los escenarios proyectados: a) la simulación del sistema energético mexicano (por usos finales) y sus emisiones asociadas de GEI; b) la simulación de las emisiones de las opciones forestales y la captura de carbono, y c) el módulo financiero: estimación de costos de mitigación de CO<sub>2</sub> y curva de costos incrementales (para más detalles sobre el modelo, consultar Sheinbaum y Masera 2000)

### Escenarios base y de mitigación

En el sector energético, el escenario base considera un crecimiento económico medio del PIB, proyecciones oficiales del crecimiento poblacional, intensidades constantes a su nivel de 1994, ninguna sustitución de combustibles, y expansión de la capacidad instalada del sector eléctrico basado en plantas con combustóleo. En el sector forestal, el escenario base supone tasas netas de deforestación constantes en cada uno de los cuatro principales tipos de bosques (como porcentaje del área forestal remanente); esto es, deforestación menos reforestación. Para propósitos comparativos, las emisiones de CO<sub>2</sub> son calculadas para diferentes escenarios del PIB (crecimiento económico bajo, medio y alto).

El escenario de mitigación considera periodos específicos de penetración de las tecnologías de mitigación por sector. Sólo se analizó un conjunto limitado de opciones, por lo que los resultados presentados no deben ser percibidos como el potencial máximo o total de mitigación de carbono para México. Esto es aplicable particularmente para el sector energético, donde las restricciones en la disponibilidad de datos no permitieron realizar un análisis profundo del sector transporte. El cuadro 1 muestra las principales consideraciones para cada escenario.

CUADRO 1. CONSIDERACIONES DE LOS ESCENARIOS BASE Y DE MITIGACIÓN

SECTOR	ESCENARIO BASE	ESCENARIO DE MITIGACIÓN
General	<p>Escenario de crecimiento medio (cerca del 4%/año).</p> <p>Reducción del crecimiento poblacional del PIB del 1.6% en 1995 a 1.1% en 2010.</p> <p>Intensidades energéticas constantes en sus valores de 1994.</p>	<p>Crecimiento del PIB y de la población como el escenario base.</p>
Energía	<p>Plantas termoeléctricas de combustóleo como la adición predominante en la capacidad instalada del sector eléctrico.</p>	<p>Plantas de ciclo combinado basadas en gas natural como la adición predominante en la capacidad instalada del sector eléctrico.</p> <p>Diferentes escenarios de penetración para las siguientes alternativas de mitigación: motores industriales, iluminación comercial eficiente, bombeo eficiente de agua, transporte público en el AMCM, iluminación residencial eficiente, calderas industriales eficientes, incremento en la cobertura del metro en el AMCM, generación eléctrica por viento, cogeneración industrial.</p>
Forestal	<p>Tasa neta de deforestación-deforestación menos reforestación- en niveles de 1.5%/año (principios de los noventa) de 1995 al 2010.</p> <p>El área total deforestada alcanza 10.4 millones de ha entre 1995 y 2010.</p>	<p>361 Kha/año de deforestación evitada con manejo sustentable de bosques naturales en 2010.</p> <p>1.3 millones de ha bajo la restauración de plantaciones en el 2010.</p> <p>200 Kha bajo sistemas agroforestales en el 2010.</p>

## RESULTADOS

### Escenario base

El aumento total de emisiones de CO<sub>2</sub> entre 1990 y 2010 con crecimientos del PIB que van de 2.5 a 6.0%, varía entre 55 y 85% (cuadro 2). El escenario base considera un crecimiento medio del PIB. Las emisiones totales alcanzan 879 Tg/año de CO<sub>2</sub> para el 2010. Se espera que las emisiones del sector energético crezcan 149% en ese periodo de 15 años. Una pérdida neta de 10.4 millones de ha (20% del área forestal existente) de bosques se observa en el escenario base. Debido a que la tasa neta de deforestación se considera proporcional al área forestal remanente, el área anual deforestada disminuirá en el futuro; como resultado, las emisiones anuales de carbono del sector forestal se reducirán 33% entre 1995 y 2010.

CUADRO 2. EMISIONES DE CO<sub>2</sub> PARA ESCENARIOS CON DIFERENTES CRECIMIENTO DEL PIB

TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DEL PIB(1990-2010)	2010 MILLONES DE TONELADAS DE CO <sub>2</sub>	CRECIMIENTO 1990-2010(%)
Bajo (2.5%)	805.6	55%
Medio (4.5%)*	878.9	69%
Alto (6.0%)	960.3	85%

\*Proyección elegida como escenario base.

### Escenarios de mitigación

Las opciones de mitigación relacionadas al uso de la energía son: plantas de ciclo combinado, motores eléctricos industriales eficientes, calderas industriales eficientes, cogeneración industrial, iluminación eficiente del sector residencial y comercial, bombeo eficiente de agua potable, sustitución intermodal (camiones y metro) para el transporte de pasajeros en el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM), y generación eléctrica por viento. Se analizaron también tres opciones de mitigación forestales en detalle: el manejo de bosques naturales como una alternativa para evitar la

CUADRO 3. OPCIONES DE MITIGACIÓN ANALIZADAS POR SECTOR

SECTOR	OPCIÓN	ESCENARIO A 2010
Energético	Plantas generadoras de ciclo combinado	La capacidad instalada requerida llegará a 51,464 MW, de los cuales 43% serán plantas de ciclo combinado.
Industrial	Generación de electricidad por viento	Se estima que 5000 MW de grandes plantas eólicas serán instalados (Caldera 1997).
	Motores eléctricos	La sustitución implica ahorros de energía acumulados de 754 GWh para el año 2010 (Rodríguez 1997).
	Cogeneración industrial	El potencial de cogeneración para nuevas plantas alcanzará los 8664 MW (Sheinbaum, 1997b)
	Calderas industriales	Aislamiento térmico y sustitución de quemadores para 20% de todas las calderas industriales (Aguillón 1997).
Residencial y comercial	Bombeo de agua potable	Se ahorrará aproximadamente 35% del consumo eléctrico nacional para bombeo de agua (Carmona 1997).
	Iluminación eficiente en el sector comercial	5 millones de arreglos de iluminación serán instalados en el año 2010 (Sheinbaum y Vázquez 1997).
Transporte	Lámparas Compactas Fluorescentes (LCFs) en el sector residencial	9.6 millones de lámparas serán reemplazadas por LCFs (Sheinbaum y Vázquez 1997).
	Sustitución inter-modal en el AMCM	Sustitución de 60,000 microbuses de gasolina por 30,000 camiones de diesel y un incremento en la cobertura de metro y tren ligero eléctrico (Dartois 1997).

Sector forestal	Manejo forestal	La captura de carbono a largo plazo varía entre 618 y 763 toneladas de CO <sub>2</sub> /ha (168 a 208 tonC/ha), para bosques templados y tropicales como deforestación evitada, respectivamente.
	Reforestación	Se predice un incremento constante en la mitigación de 2.8 millones de toneladas de CO <sub>2</sub> /año en el 2000 a 12.1 millones de toneladas de CO <sub>2</sub> /año en 2010.
	Agroforestería	Se espera un aumento de 1.0 millón de toneladas de CO <sub>2</sub> /año en el 2000 a 2.0 millones de toneladas de CO <sub>2</sub> /año en el año 2010 mitigados.

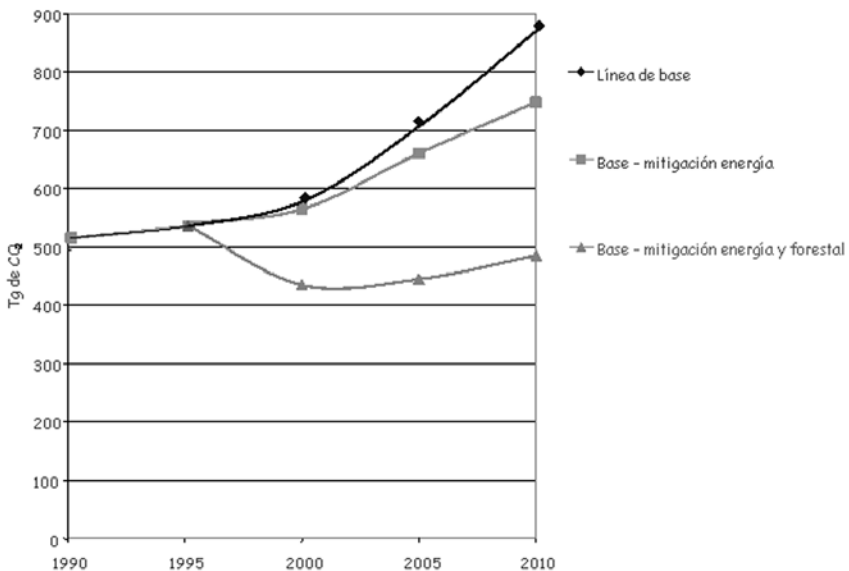
---

deforestación, la reforestación para la restauración forestal, y los sistemas agroforestales (cuadro 3).

Mediante el análisis cuidadoso de las diversas opciones energéticas y forestales se ha identificado un potencial de mitigación de 348.3 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> para México en el año 2010. Si se lograra alcanzar, México aumentaría sus emisiones totales en 2% de 1990 al 2010, en lugar de incrementarlas en 69% (escenario base). Las emisiones per cápita disminuirían en 30% en el mismo periodo (de 6.2 a 4.7 ton de CO<sub>2</sub>/hab.), en lugar de un aumento de 26% (gráfica 1).

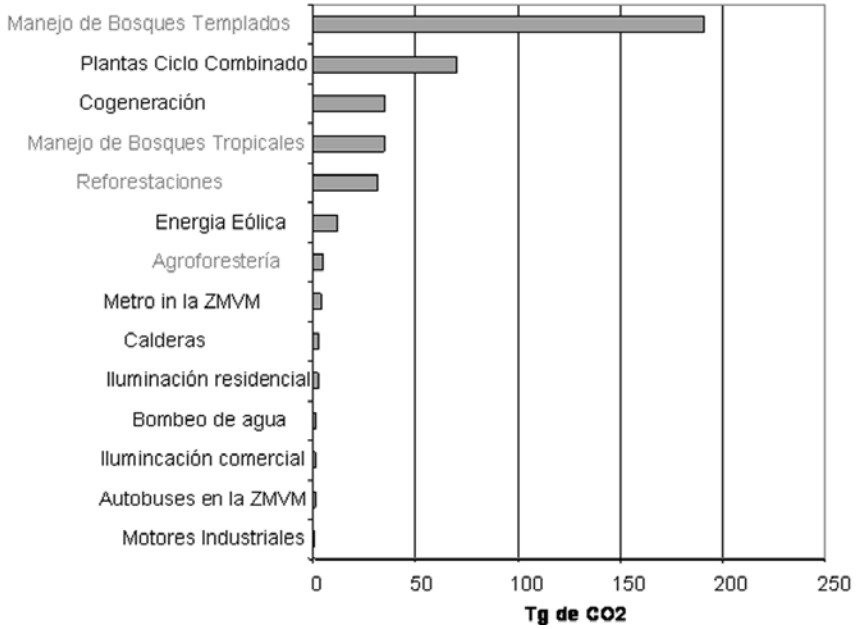
El manejo forestal sustentable en bosques templados se presenta como la mejor opción de mitigación, seguido por las plantas de ciclo combinado y la cogeneración industrial. En el conjunto, el sector forestal aporta aproximadamente 65% de la mitigación al año 2010, y el sector energía, 45% (gráficas 2 y 3). Vale destacar que las opciones energéticas analizadas constituyen un subconjunto del total de opciones disponibles, particularmente en el sector transporte.

GRÁFICA 1. EMISIONES FUTURAS DE CO<sub>2</sub> EN MÉXICO: ESCENARIO DE REFERENCIA Y DE MITIGACIÓN

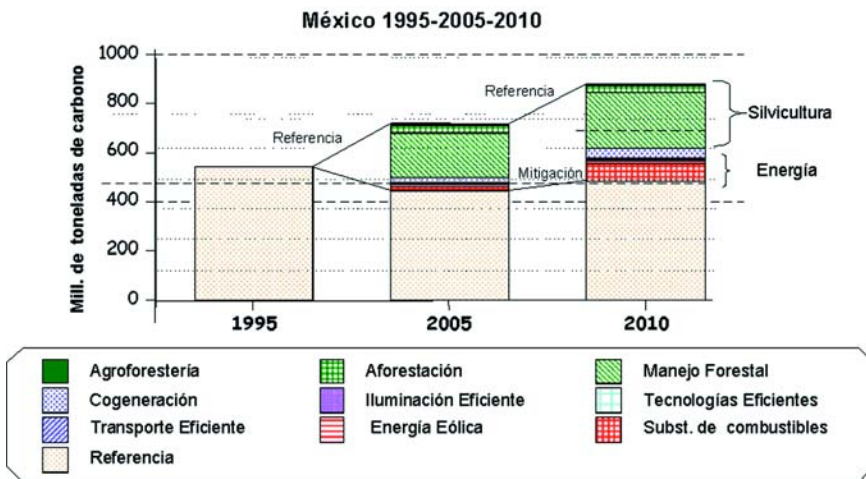




GRÁFICA 2. EMISIONES EVITADAS DE CO<sub>2</sub> AL AÑO 2010



GRÁFICA 3. MITIGACIÓN DE CO<sub>2</sub> POR CADA ACTIVIDAD EN LOS DIFERENTES SECTORES

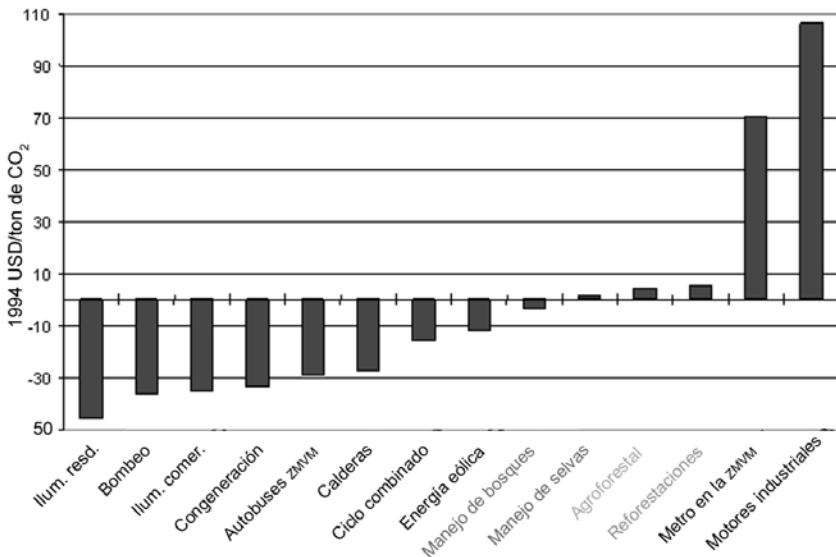


## COSTOS DE MITIGACIÓN

La figura 4 muestra los costos totales de abatimiento por opción de mitigación para el año 2010. Los valores negativos indican que los costos nivelados de las opciones de mitigación resultan menos costosos para el país que el escenario base, considerando los costos anuales de inversión y mantenimiento en el consumo de energía, transformación y producción, así como en los costos del manejo forestal actual incluyendo los beneficios de la extracción de madera y otros productos maderables y los costos de oportunidad de otras alternativas del uso de suelo.

Los costos anuales unitarios varían desde \$ -45.9/ton de CO<sub>2</sub> para la iluminación residencial hasta \$106.4 para los motores industriales. Los costos promedio para las opciones forestales varían de \$ -3.5 /ton de CO<sub>2</sub> a \$5.4 /ton de CO<sub>2</sub>, dependiendo de la opción. Las opciones de mitigación que resultaron más costosas que el escenario base son el manejo forestal en áreas tropicales, la restauración de plantaciones, los sistemas agroforestales, el metro y el tren ligero para el AMCM, y los motores industriales eficientes.

FIGURA 4. COSTOS DE MITIGACIÓN PARA CADA UNA DE LAS OPCIONES EN MÉXICO



Debe observarse que aun las opciones más rentables (costo-efectivas), como son la iluminación eficiente, o muy específicamente, el manejo sustentable de bosques naturales templados, requieren usualmente de inversiones sustancialmente mayores respecto a las tecnologías convencionales. Además, particularmente en el caso de las opciones forestales, los costos son considerablemente dependientes de la región; en consecuencia, los valores promedio presentados aquí pueden ser mucho mayores o menores para proyectos específicos.

## CONCLUSIONES

Con la apropiada instrumentación de una serie de opciones de mitigación prometedoras en el sector energético y forestal, México tiene la oportunidad de avanzar significativamente en las prioridades nacionales de desarrollo para el periodo 1995-2010, y de mantener bajas las emisiones de carbono per cápita y con un pequeñísimo incremento en las emisiones totales. De esta manera, en principio, no debería existir ninguna contradicción entre los intereses locales y los globales.

Las opciones de mitigación asociadas a una mayor eficiencia energética analizadas en este artículo, representan un pequeño porcentaje de las emisiones evitadas totales. Sin embargo, el hecho de que la mayoría de estas opciones resulten rentables, las ubica como una oportunidad para el país de utilizar los recursos económicos “ahorrados” obtenidos por la eficiencia energética para desarrollar opciones de mitigación con mayores potenciales, como son las energías renovables y la forestería. Por el otro lado, la gran cantidad de carbono que puede ser potencialmente capturado por las opciones forestales, le da a México la oportunidad de ganar tiempo para el desarrollo a fondo de energías renovables.

Debe destacarse que el potencial de mitigación identificado no va a ser logrado de manera automática. Son necesarios esfuerzos firmes, constantes y duraderos en lo local, nacional y global. Localmente existe la necesidad de apoyar actividades, como las que se identificaron en este artículo, donde los beneficios al cambio climático son un subproducto de concretos beneficios económicos, sociales y ambientales. El logro de este objetivo implica una estrategia integral que combine aspectos institucionales, financieros y técnicos. Una de las principales barreras a vencer es el incremento en los costos de inversión asociados con las opciones de mitigación de carbono. Esto es

cierto tanto para las opciones energéticas como para las forestales y aun para aquellas alternativas que resultan rentables con base en su ciclo de vida, pero que requieren de altas inversiones iniciales (*e.g.* cogeneración, manejo sustentable de bosques naturales templados). Esquemas innovadores son necesarios para reducir los costos para que los usuarios puedan pagar las inversiones en alternativas de mitigación de GEI.

En el ámbito nacional, el gobierno necesita ser consistente con las políticas intersectoriales. Por ejemplo, el subsidio directo o indirecto a la ganadería o a la agricultura comercial mientras se promueve el manejo forestal sustentable es una contradicción. Las políticas energéticas y las de uso de suelo deben ser orientadas a intereses de largo plazo, en oposición a los actuales horizontes de planeación de seis años. Finalmente, debería existir un compromiso claro de reducir las inequidades existentes en la distribución de recursos entre los grupos sociales y de mantener la inversión estatal en áreas estratégicas.

Internacionalmente, los países industrializados necesitan reconocer su fuerte responsabilidad histórica y actual en el incremento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, mediante el aumento de transferencia de fondos y tecnología hacia el Sur. Estos fondos, canalizados por vía del MDL, por ejemplo, pueden jugar un papel crítico en la eliminación de la barrera de “inversiones” asociada a varias opciones energéticas y forestales de mitigación. La administración adecuada de los nuevos fondos y el mejor acceso a la tecnología pueden acelerar el “salto” de tecnologías obsoletas a sistemas en el estado del arte. Estas acciones deben ser acompañadas con un mayor esfuerzo en la construcción de capacidad e instituciones relacionadas con el cambio climático. En este aspecto particular, facilitar los recursos para una mayor colaboración Sur-Sur debería ser uno de los principales objetivos. Para lograr el éxito, estas transferencias deben ser acompañadas por una eliminación de los incentivos resultantes a la apertura de la economía global que favorecen el comportamiento oportunista y a corto plazo por encima de la conservación de recursos naturales.

## RECONOCIMIENTOS

El proyecto en el cual se basa este artículo fue financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional en Apoyo al Cambio Climático Nacional para México, proyecto 523-0616-G-00-6058-00, coor-

dinado por el Instituto Nacional de Ecología y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y por el CONACYT, proyecto 32715-N. Agradecemos especialmente a Leticia Ozawa por la traducción del presente trabajo y a René Martínez por la edición del texto y figuras.

## REFERENCIAS

- Aguillón, J. 1997. Energy efficiency and Carbon dioxide emissions in industrial boilers in México. Pp. 23-37. En: C. Sheinbaum (coord.). *Final Report to the USAID-Support to the National Climate Change Plan for Mexico*. México: Instituto de Ingeniería, Report 6133, UNAM.
- Caldera, E. 1997. Wind large scale generation potential for Mexico. Pp. 65-76. In: C. Sheinbaum (coord.). *Final Report to the USAID-Support to the National Climate Change Plan for Mexico*. México: Instituto de Ingeniería, Report 6133, UNAM.
- Carmona, R. 1997. Potable water pumping. Pp. 45-56. En: C. Sheinbaum (coord.). *Final Report to the USAID-Support to the National Climate Change Plan for Mexico*. México: Instituto de Ingeniería, Report 6133, UNAM.
- Dartois, L. 1997. Passenger transportation in the MCMA. Pp. 57-64. En: C. Sheinbaum (coord.). *Final Report to the USAID-Support to the National Climate Change Plan for Mexico*. México: Instituto de Ingeniería, Report 6133, UNAM.
- IEA (International Energy Agency). 1998. *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion*. Paris: IEA.
- Masera O. R., M. J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican Forests: Current Situation and Long-term Scenarios. *Climatic Change* 35: 265-295.
- Masera, O. R. y A. Ordóñez. 1997. Forest Management Mitigation Options. Pp. 77-93. En: C. Sheinbaum (coord.). *Final Report to the USAID-Support to the National Climate Change Plan for Mexico*. México: Instituto de Ingeniería, Report 6133, UNAM.
- Rodríguez, L. 1997. Electric motors in the Mexican Industrial Sector. Pp. 13-19. En: C. Sheinbaum (coord.). *Final Report to the USAID-Support to the National Climate Change Plan for Mexico*. México: Instituto de Ingeniería, Report 6133, UNAM.
- Sheinbaum, C. 1997b. Industrial cogeneration. Pp. 20-23. En: C. Sheinbaum (coord.). *Final Report to the USAID-Support to the National Climate Change Plan for Mexico*. México: Instituto de Ingeniería, Report 6133, UNAM.
- and O. Masera. 2001. Mitigating Carbon Emissions while advancing national development priorities: The case of Mexico. *Climate Change* 47: 259-282.

- and O. Vázquez. 1997. Efficient lighting in the Mexican residential and commercial sector. Pp. 38-44. En: C. Sheinbaum (coord.). *Final Report to the USAID-Support to the National Climate Change Plan for Mexico*. México: Instituto de Ingeniería, Report 6133, UNAM.
- , V. Rodríguez, y G. Robles. 1999. *Final Report to Secretaría de Energía-Escenarios Energéticos y de Emisiones*. México: Instituto de Ingeniería, Reporte 9137, UNAM.
- UN (United Nations). 1992. *CONVENCIÓN DE RIO*.
- UZACHI-IXETO. 1998. *Silvicultura Comunitaria en la Sierra Norte de Oaxaca*. Report to the United States Initiative for Joint Implementation (USIJI). Oaxaca, México.

## Notas

---

- \* Una versión preliminar de este artículo apareció en *México: Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, julio de 2001. INE-SEMARNAT. México.
- \*\* Centro de Investigaciones sobre Ecosistemas, UNAM, campus Morelia.
- \*\*\* Instituto de Ingeniería, UNAM.

# Opciones de captura de carbono en el sector forestal

*Bernardus H. J. de Jong<sup>\*</sup>, Omar Masera<sup>\*\*</sup> y Tomás Hernández-Tejeda<sup>\*\*\*</sup>*

## LOS BOSQUES Y SELVAS COMO SUMIDEROS DE CARBONO

LOS ECOSISTEMAS FORESTALES pueden absorber cantidades significativas de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principal gas de efecto invernadero (GEI). Como producto de este hecho, en las últimas décadas ha surgido un interés considerable por incrementar el contenido de carbono en la vegetación terrestre mediante la conservación forestal, la reforestación, la agroforestería y otros métodos de manejo del suelo. Un gran número de estudios ha demostrado el gran potencial que poseen los bosques y los ecosistemas agrícolas para almacenar carbono (Dixon *et al.* 1994, Dixon *et al.* 1996, Masera *et al.* 1995, y De Jong *et al.* 1995).

El ciclo de carbono en la vegetación comienza con la fijación del CO<sub>2</sub> por medio de los procesos de fotosíntesis, realizada por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, catalizado por la energía solar, el CO<sub>2</sub> y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno a la atmósfera. Parte de los carbohidratos se consumen directamente para suministrar energía a la planta, y el CO<sub>2</sub> liberado como producto de este proceso lo hace a través de las hojas, ramas, fuste o raíces. Otra parte de los carbohidratos son consumidos por los animales, que también respiran y liberan CO<sub>2</sub>. Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por macro y micro-organismos, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en CO<sub>2</sub> y regrese a la atmósfera (Schimel 1995 y Smith *et al.* 1993). La fijación de carbono por bacterias y animales contribuye también a disminuir la cantidad de bióxido de carbono, aunque cuantitativamente es menos importante que la fijación de carbono en las plantas.

Cuando mueren los organismos y son comprimidos por sedimentación, sufren una serie de cambios químicos para formar turba, luego carbón pardo o lignito y finalmente carbón. Durante el tiempo en que el CO<sub>2</sub> se encuentra constituyendo alguna estructura de la planta o el suelo y hasta que es enviado nuevamente a la atmósfera se considera “capturado”. En el momento de su liberación (ya sea por la descomposición de la materia orgánica y/o por la quema de la biomasa), el CO<sub>2</sub> fluye para regresar al ciclo de carbono.

México presenta condiciones naturales muy propicias para las acciones de mitigación en el área de recursos naturales. Para 1990, aproximadamente 25% de la superficie del país (50 millones de hectáreas) estaba cubierta por bosques y selvas. De este total, prácticamente la mitad eran bosques (25.5 millones ha) y la mitad selvas (24.1 millones ha). Adicionalmente existen alrededor de 62 millones de hectáreas forestales con vegetación semiárida, como matorrales y otros (cuadro 1).

CUADRO 1. PATRÓN NACIONAL DE USO DEL SUELO Y SUS RESERVORIOS DE C EN 1990

COBERTURA VEGETAL		SUPERFICIE (MILES HA)	RESERVORIO DE C (GTONC)
<i>Bosques naturales</i>	Bosques de coníferas	9,985	2.6
	Bosques latifoliados templados	8,409	2.0
	Selvas tropicales siempre verdes	5,717	1.7
	Selvas tropicales caducifolias	15,338	2.4
	Bosques semi-áridos	62,840	5.0
	Bosques degradados	21,484	2.6
<i>Plantaciones</i>	Con rotación prolongada	3	0.0006
	Plantaciones de restauración	147	0.0265
<i>Bosques manejados</i>	Coníferas	6,444	1.5
	Selvas tropicales siempre verdes	900	0.28
<i>Áreas protegidas</i>	Templado	672	0.16
	Tropical siempre verde	1,765	0.54
	Tropical caducifolio	106	0.02
	Áreas pantanosas	303	0.09
	Bosques semi-áridos	3,170	0.3
<i>Otros usos</i>	Agricultura	25,939	2.3
	Pastizales	24,893	2.4
	Agroforestería	900	0.1

Nota: 1 Gton C = 10<sup>9</sup> ton C.

Fuente: SARH 1994, Masera *et al.* 1997 y 2001.



Debido a la deforestación acelerada, estos bosques hoy en día son una fuente neta de emisiones (Masera *et al.* 1997). Sin embargo, tienen el potencial de convertirse en un sumidero importante, siempre y cuando se apliquen por lo menos algunas de las opciones que se discuten en la siguiente sección (ver también el capítulo *Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional*, de O. Masera, en esta sección).

## OPCIONES FORESTALES DE MITIGACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO

Una opción de mitigación de carbono está definida como cualquier acción que dé como resultado una reducción del incremento neto en las emisiones de este gas de un área determinada y/o por la sustitución de combustibles fósiles (Masera 1995). Existen tres opciones básicas de mitigación de carbono en el sector forestal:

- a) La conservación. Esta opción consiste en evitar las emisiones de carbono preservando las áreas naturales protegidas, fomentando el manejo sostenible de bosques naturales y el uso renovable de la leña, y/o reduciendo la ocurrencia de incendios.
- b) La reforestación y forestación. Esta opción consiste en recuperar áreas degradadas mediante acciones como la protección de cuencas, la reforestación urbana, la restauración para fines de subsistencia, el desarrollo de plantaciones comerciales para madera, pulpa para papel, hule, etc., así como de plantaciones energéticas (producción de leña y generación de electricidad) y de sistemas agroforestales.
- c) La sustitución. Esta opción consiste en sustituir los productos industriales por aquellos hechos de madera; es decir, ahorrar energía para producir estos productos industriales (p. e. cemento) y por la sustitución de combustibles fósiles por combustibles renovables, como leña, carbón vegetal y biogás.

## POTENCIAL DE CAPTURA A ESCALA NACIONAL: EL ESCENARIO DE BASE Y EL ESCENARIO DE MITIGACIÓN

Existen diversos análisis del potencial de captura de carbono en México para el nivel nacional (Masera 1995, Masera *et al.* 1997 y 2001). Todos estos análisis apuntan sistemáticamente a un alto potencial de captura del sector

CUADRO 2. DENSIDAD DE CARBONO Y POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO SEGÚN DIFERENTES OPCIONES DE MITIGACIÓN EN MÉXICO

OPCIONES		CARBONO TOTAL UNITARIO (TONC/HA)	CAPTURA NETA DE C (TONC/HA)
a. Conservación			
Áreas naturales protegidas	Bosques de pino	169 – 180	50 – 86
	Bosques de pino-encino	72 – 162	33 – 69
	Selva alta	230 – 279	113 – 173
	Selva baja	104 – 174	57 – 87
Manejo de bosques naturales	Bosques	222 – 233	98 – 134
	Selvas	239- 279	148 – 182
Uso de estufas mejoradas			1 tC/estufa/año ó 4 tC en el ciclo de vida de una estufa
b. Reforestación			
Plantaciones de reforestación	Bosques de pino	119 -126	75 – 79
	Bosques de pino-encino	50 – 113	35 – 66
	Selva alta	161 – 195	128 – 150
	Selva baja	73 – 122	52 – 82
Plantaciones industriales	Plantaciones de pino	140 – 148	97 – 101
	Plantaciones de eucalipto	110 – 118	67 – 71
	Plantaciones energéticas	124 – 131	215
	Agroforestería	86 – 135	43 – 68
	Sistemas bajo sombra	92 – 141	49 – 74

Nota: El cuadro presenta valores estimados promedio para el país de la densidad de carbono y la captura neta de carbono. La densidad de carbono es el carbono total por unidad de área asociado a una opción de mitigación, incluyendo vegetación, suelos y productos forestales. La captura neta se presenta aquí con fines solamente ilustrativos y considera la diferencia entre el carbono almacenado en la opción de mitigación y el carbono total del uso alternativo del suelo. Por simplicidad, en este caso se supone que el uso del suelo alternativo es en todos los casos el uso agrícola.

Fuente: Masera *et al.* 2000.

forestal, por lo menos hasta el año 2030 (ver el capítulo *Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional*, de O. Masera y C. Sheibaum, en esta sección).

En el análisis más reciente, Masera *et al.* (2001) utilizaron un modelo para estimar la captura de carbono del año 2000 al 2030 en el que se dividió el uso del suelo en el país en 21 clases, incluyendo bosques, selvas, zonas áridas y usos no forestales (las principales categorías del análisis y el potencial de captura de cada categoría se indican en el cuadro 2). Con este modelo se construyeron dos escenarios: un escenario de referencia y un escenario de “políticas”. El escenario de referencia considera un futuro en el que se mantienen las tasas de deforestación actuales por tipo de bosque como porcentaje del área forestal remanente; asimismo, los esfuerzos en conservación y en restauración continúan pero a ritmo limitado. El escenario de políticas está basado en considerar que la captura de carbono en el sector forestal de México debe ser un subproducto de las prioridades de desarrollo sustentable del país. En otras palabras, las opciones de mitigación de carbono consideradas, parten siempre de la satisfacción de necesidades locales: demanda estimada de madera industrial y para leña, sistemas agroforestales, área susceptible a ponerse en conservación por tipo de bosque, etc. Se supone un futuro en el que se satisface plenamente la demanda interna de madera industrial, de pulpa y papel y de leña; decrecen las tasas de deforestación y se hace un esfuerzo mayor en restauración y conservación de nuestros bosques. La mitigación –o captura de carbono a escala nacional- resulta de la diferencia entre ambos escenarios.

El cuadro 3 presenta la superficie estimada a la que se dedicaría cada clase de uso del suelo entre el año 1990 y el 2030, según el escenario considerado. Se observa que para el año 2030, las opciones de mitigación cubrirían de manera neta (escenario de políticas menos escenario de base) un total de 12.4 millones de ha –pasarían de 29.4 millones de ha en el escenario de referencia a 41.8 millones de ha en el escenario de políticas.

### Elementos a considerar cuando se instrumenta un proyecto

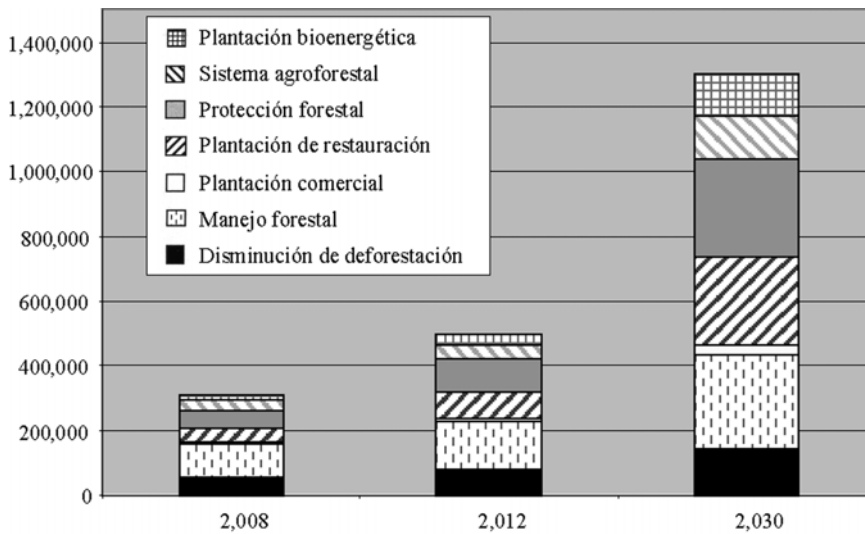
Los proyectos forestales poseen y han generado polémica alrededor de varias de las características intrínsecas de los mismos, que incluyen: la delimitación del proyecto, cómo estimar las posibles fugas a consecuencia del proyecto, cómo definir la duración del proyecto, los posibles riesgos en el tiempo

CUADRO 3. SUPERFICIE FUTURA (EN 10<sup>6</sup> HA) POR OPCIÓN DE MITIGACIÓN EN MÉXICO: ESCENARIO DE BASE Y ESCENARIO DE POLÍTICAS

OPCIÓN DE MITIGACIÓN	ESCENARIO DE REFERENCIA			ESCENARIO DE MITIGACIÓN		
	2000	2010	2030	2000	2010	2030
Manejo de bosques	7.7	5.7	6.0	7.7	6.3	8.9
Manejo de selvas	0.4	0.9	1.5	0.4	1.3	1.3
Bosque y selva protegido	8.7	10.0	11.6	8.7	10.9	15.2
Plantación de rotación corta	0.0	0.3	1.0	0.0	0.4	1.5
Plantación de rotación larga	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2
Plantación de restauración	0.6	1.8	7.1	0.6	2.6	10.2
Plantaciones bioenergéticas	0.0	0.1	0.4	0.0	0.3	1.3
Sistemas agroforestales	1.0	1.2	1.6	1.1	1.7	3.3
Total	18.5	19.9	29.4	18.6	23.4	41.8
Incremento del área por opción						
Bosque templado	-0.8%	-3.7%	0.4%	-0.8%	-4.1%	0.05%
Selva tropical	-3.9%	3.8%	3.8%	-3.9%	3.8%	3.8%
Plantación de rotación corta	15.0%	51.2%	7.3%	15.0%	56.7%	7.5%
Plantación de rotación larga	0.0%	30.3%	6.3%	0.0%	39.6%	3.8%
Plantación de restauración	14.7%	11.3%	7.1%	14.7%	15.5%	7.1%
Plantación bioenergética	3.1%	19.5%	8.4%	3.1%	34.7%	8.4%
Sistema agroforestal	1.1%	1.9%	1.5%	2.1%	4.6%	3.4%
Deforestación						
Bosque de pino	0.6%	0.6%	0.6%	0.6%	0.3%	0.2%
Bosque de encino	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%	0.4%	0.2%
Selva perennifolia	2.5%	2.5%	2.5%	2.5%	1.3%	0.6%
Selva caducifolia	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%	1.0%	0.5%
Bosque semi-árido	0.08%	0.08%	0.08%	0.08%	0.04%	0.02%

La captura neta de carbono que se obtiene cuando se comparan los resultados de los escenarios de referencia y de política se ilustra en la figura 1. En total, de adoptar las opciones propuestas, México tendría la posibilidad de capturar aproximadamente 46 millones de tonC/año entre el año 2000 y el año 2030. Una buena parte de esta mitigación viene por: a) evitar la deforestación; b) manejar sustentablemente los bosques naturales; c) restaurar las áreas forestales degradadas, y d) conservar adecuadamente los bosques protegidos.

GRÁFICA 1. CAPTURA DE CARBONO NETO EN 1000 T/C (ESCENARIO DE MITIGACIÓN-ESCENARIO DE REFERENCIA) POR OPCIÓN DE MITIGACIÓN EN MÉXICO, 2000-2030



por incendios, incumplimiento, etc.; además de cómo definir la adicionalidad del proyecto y, por lo tanto, las líneas de base, así como también las mediciones, la estimación del carbono mitigado, el monitoreo, la verificación de los beneficios en la emisión de gases de efecto invernadero y los impactos sociales asociados (sustentabilidad) (ver el capítulo *Los mecanismos flexibles del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas*, de A. Guzmán, I. Laguna y J. Martínez, en la sección II).

La determinación de los límites tanto físicos como conceptuales constituye el paso fundamental para el diseño y la instrumentación de un determinado proyecto. La determinación de los límites influye en la cantidad de créditos que aquél puede generar. Las variaciones temporales y espaciales en las dinámicas de uso de suelo y cobertura vegetal (LU/LC) y las variaciones en los almacenes de carbono de cada clase LU/LC son los principales factores que causan el grado de incertidumbre en el establecimiento de una línea de base (De Jong 2001). Los proyectos deben mostrar su adicionalidad usando una o más (no necesariamente todas) de las evaluaciones antes mencionadas. Como para otros programas de evaluación en éste existen dos tipos de errores: el error tipo I: la aprobación de proyectos sin adicionalidad, y el error tipo

ii: la exclusión de aquellos que sí la posean (Chomitz 1998). Algunos ejemplos de reservorios de carbono y fuentes de emisión que suelen no ser considerados dentro de los límites del proyecto incluyen:

- i) Las emisiones asociadas con la preparación y manejo de la tierra que ocurren antes de la puesta en marcha oficial del proyecto.
- ii) Las emisiones o pérdidas de gases de efecto invernadero asociadas con la extracción de madera.
- iii) Las emisiones asociadas con el desarrollo del proyecto (transporte terrestre o aéreo, la maquinaria utilizada, etc.).
- iv) Las emisiones de combustibles fósiles que se evitan debido al uso de biocombustibles como sustitutos para la producción de energía.

El término “fugas” se define como el aumento o la disminución de los beneficios de gases de efecto invernadero propio del proyecto debido a que las actividades propuestas por el mismo causan cambios en las actividades en otras zonas, fuera de los límites establecidos al plantear el proyecto. Entre los efectos siguientes, los más relevantes para los proyectos forestales y de uso del suelo son:

*Efectos de mercado.* Estos ocurren cuando las actividades propias del proyecto cambian el equilibrio de la demanda y el suministro de recursos. Por ejemplo los proyectos de plantaciones a gran escala pueden provocar la disminución de los precios locales de los productos de madera, causando que las plantaciones vecinas se dediquen a otra actividad y se transformen en pastizales o en zonas con vegetación de poca biomasa (Tipper y De Jong 1998).

*Cambio de actividad.* Esto ocurre cuando la actividad que está evitando la emisión de carbono, y la cual está siendo parte de las actividades del proyecto, es llevada a una zona fuera de los límites del mismo.

Uno de los principios fundamentales del Protocolo de Kioto es que los proyectos de mitigación deben generar cambios importantes y de largo plazo en el almacén de carbono terrestre y en la disminución de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (IPCC 1995).

La cuantificación de las emisiones y absorciones de los gases de efecto invernadero producto de un determinado proyecto de mitigación está sujeta

a varios riesgos, algunos de los cuales pueden ser: los incendios, las plagas y las enfermedades forestales, así como las tormentas, inherentes a ciertas actividades del uso del suelo, particularmente en los bosques, mientras que otras como las políticas y las económicas son genéricas y pueden suceder en cualquier tipo de proyecto.

Los riesgos, así como la incertidumbre, pueden ser estimados y evitados. Para evitarlos se sugiere el empleo de diversas estrategias, entre las cuales se encuentran: el establecimiento de créditos de carbono de contingencia, el asegurar los proyectos y poseer un conjunto de proyectos de carácter heterogéneo, de modo que si alguno de ellos se ve afectado por alguna circunstancia, los otros seguirán cumpliendo su función (IPCC 1995).

A manera de conclusión se señalan los beneficios adicionales que cualquier tipo de proyecto de mitigación debería de proporcionar a la sociedad, tales como: la producción de combustibles a base de madera, la fabricación de productos de madera, las parcelas comunales para la extracción de madera, los cultivos agroforestales, la conservación del suelo, la protección de la biodiversidad y del sistema hidrológico, y el desarrollo socioeconómico.

De lo anterior, quizá el punto más importante que se debe considerar en cualquier proyecto es la construcción de una línea de base confiable, verificable, comparable y aceptable para todas y cada una de las partes involucradas, incluyendo los participantes, el gobierno nacional y los organismos internacionales.

## CONCLUSIONES

En México, la percepción que la sociedad tiene sobre el deterioro ambiental y la necesidad de impulsar acciones que lo detengan, ha aumentado considerablemente en los últimos años. Esta circunstancia se ha convertido en un motor novedoso para el desarrollo de instituciones políticas. Por esto, las medidas de mitigación del cambio climático no son ajenas a las políticas gubernamentales y a las iniciativas del empresariado mexicano y de los organismos ambientalistas, particularmente en lo que se refiere a eficiencia energética, industria limpia, manejo sustentable de bosques y conservación de la biodiversidad.

México ha venido impulsando políticas que tienen como propósito principal solucionar diversos problemas sociales, económicos y ambientales. En muchos casos, estas acciones permiten mitigar simultáneamente

los efectos del cambio climático al impulsar una mayor eficiencia del aparato productivo. Las sinergias se dan en el aprovechamiento, conservación y/o restauración de recursos naturales (manejo sustentable de bosques, creación de áreas naturales protegidas, programas de reforestación, e impulso de plantaciones, entre otras) y en la eficiencia energética (mejorando combustibles, estableciendo nuevas reglas para las emisiones de la industria, e impulsando proyectos de fuentes renovables para producción de energía, entre otros).

Se reconoce que el propósito de México de controlar y reducir –en el mediano plazo– los ritmos de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero, significa mayores retos que requieren de crecientes esfuerzos y de una participación amplia y coordinada entre el gobierno y la sociedad. En México una buena parte de los bosques y selvas son de propiedad comunal o ejidal y constituyen el patrimonio principal de aproximadamente 12 millones de mexicanos, muchos de ellos en condiciones de extrema pobreza y marginación. Por lo anterior, la política forestal se debe enfocar no sólo a la conservación e incremento de las posibilidades de bosques y selvas para prestar servicios ambientales, sino también a su utilización sustentable como fuente de desarrollo económico de las comunidades que cuentan con recursos forestales.

De alcanzar estas metas, México podría lograr que los ecosistemas forestales pasaran de ser una fuente neta a un reservorio neto de carbono, y así contribuir en la meta primordial de reducir significativamente las emisiones futuras de gases de efecto invernadero en el país.

Sin embargo, para que este potencial realmente se realice, es muy importante que las diferentes acciones cuenten con el correspondiente soporte económico del gobierno federal y estatal, así como de apoyos financieros que pueden aportar organismos no gubernamentales de países desarrollados o los propios gobiernos de dichos países.

Asimismo, la investigación científica sobre el papel de los ecosistemas forestales en la mitigación y adaptación al cambio climático, requerirá de mecanismos financieros que permitan la asignación continua de recursos económicos, con la finalidad de tener estimaciones más precisas del carbono almacenado en los diferentes ecosistemas y su potencial de captura a corto, mediano y largo plazos. Se necesita además formar la masa crítica necesaria que identifique las necesidades de diseño de políticas para el sector de recursos naturales.



Sin duda, el conjunto de acciones de mitigación requiere de un trabajo colectivo de los agentes económicos y de la población en general, ya que la solución de los problemas ambientales demanda, no solamente transformaciones técnicas, sino también cambios en los patrones culturales, relativos a las formas de producción y de consumo, y a las mismas iniciativas de participación social.

En síntesis:

- 1) El sector forestal tiene un rol importante tanto en almacenamiento como en potencial de mitigación de los gases de efecto invernadero.
- 2) Las opciones forestales de mitigación bien instrumentadas pueden fortalecer el proceso de desarrollo rural sustentable del país.
- 3) Las opciones de captura de carbono deben ser un complemento a las estrategias de reducción de emisiones en el sector de energía (ver el capítulo *Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional*, de O. Masera y C. Sheinbaum, en esta sección).

## BIBLIOGRAFÍA

- Chomitz, K. 1998. *Baselines for greenhouse gas reductions: problems, precedents, solutions*. Draft paper. Carbon Offsets Unit, World Bank.
- De Jong, B., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto-Pino, J. Taylor y R. Tipper. 1995. Community forest management and carbon sequestration: a feasibility study from Chiapas, Mexico. *Interciencia* 20(6): 409-416.
- . 2001. Uncertainties in estimating the potential for carbon mitigation of forest management. *Forest Ecology and Management* 154(1-2): 85-104.
- Dixon, R. K., S. Brown, A. M. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler y J. Wisniewski. 1994. Carbon Pools and Flux of Global Forests Ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- , S. P. Sathaye, O. R. Meyers, O. R. Masera, A. A. Makarov, S. Toure, W. Makundi y S. Wiei. 1996. Greenhouse Gas Mitigation Strategies: Preliminary Results from the U.S. Country Studies Program. *Ambio*. 25(1): 26-32.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climatic Change). 1995. *Climate Change 1995. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Masera, O. 1995. Carbon Mitigation Scenarios for Mexican Forests: Methodological Considerations and Results. *Interciencia* 20(6): 388-395.

- , T. Hernández, A. Ordóñez y A. Guzmán. 1995. *Land Use Change and Forestry*. En: *Preliminary National Inventory of Greenhouse Gases: México*. UNEP PROJECT GF/4102-92-01 (PP/3011). México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, U.S. Country Studies Program.
- Masera, O.R., M.J. Ordoñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican Forests: Current Situation and Long-term Scenarios, *Climatic Change* 35: 265-295.
- Masera, O.R., A.D. Ceron y J. A. Ordóñez. 2001. Forestry Mitigation Options for México: Finding Synergies Between National Sustainable Development Priorities and Global Concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies for Climate Change* 6(3-4): 289-310.
- Masera, O., B. H. J. De Jong, I. Ricalde y A. Ordóñez. 2000. *Consolidación de la Oficina Mexicana para la Mitigación de Gases de Efecto Invernadero*. Reporte Final. México: INE-UNAM.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1994. *Inventario Nacional Forestal Periódico*. México: SARH.
- Schimel, D. S. 1995. Terrestrial Ecosystems and the Carbon Cycle. *Global Change Biology* 1: 77-91.
- Smith, T. M., W. P. Cramer, R. K. Dixon, R. Leemans, R. P. Neilson y A. M. Solomon. 1993. The Global Terrestrial Carbon Cycle. *Water, Air and Soil Pollution* 70: 3-15.
- Tipper, R. y B.H. De Jong. 1998. Quantification and regulation of carbon offsets from forestry: comparison of alternative methodologies, with special reference to Chiapas, Mexico. *Commonwealth Forestry Review* 77: 219-228.

## Notas

---

\*El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR).

\*\*Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM.

\*\*\*INIFAP-SAGARPA.

# Proyecto Scolel Té: la participación de comunidades rurales en el mercado internacional de venta de carbono

*Bernardus H. J. de Jong\**, *Richard Tipper\*\**  
*y Lorena Soto-Pinto\**

## ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

LOS PROYECTOS DE MITIGACIÓN de gases de efecto invernadero en el sector forestal son atractivos cuando se combinan con metas sociales, ecológicas y económicas. La instrumentación de este tipo de proyectos en el nivel de productor o comunidad en el sector rural de México involucraría a un gran número de participantes, con una gran variedad de sistemas a pequeña escala distribuidos sobre grandes áreas, cada uno con un manejo específico para cada sitio, adaptado individualmente a los intereses personales, a las condiciones locales y a las experiencias previas del productor. Varios sistemas forestales y agroforestales son viables desde el punto de vista técnico, social y económico, incluyendo cercos vivos, café con sombra mejorada, plantaciones, acahual mejorado, y taungya, con un potencial de captura de carbono que varía entre 17 y 104 tonC/ha (De Jong *et al.* 2000). De Jong *et al.* (1995) indican que en Chiapas hay una gama de sistemas identificados por los productores que son técnica, económica y socialmente viables. En total, cinco sistemas fueron considerados, con variaciones locales de selección de especies, arreglos espaciales y rotaciones de árboles.

A partir de los resultados del estudio de factibilidad, los campesinos de la organización Unión de Crédito Pajal Ya Kak'Tik respondieron positivamente ante la propuesta de iniciar el proyecto Scolel Té. El ámbito social y económico de los miembros de la Unión es similar al del resto de la población campesina de Chiapas; es decir, minifundistas que poseen pequeñas parcelas de tierra sobre las cuales toman decisiones individuales para su usufructo, mientras las áreas forestales en esas regiones son en general comunal, pero tiende a convertirse en parcelas individuales.

En los últimos 30 años se ha observado un incremento drástico en la población rural y urbana en las partes montañosas del estado de Chiapas, lo que a su vez ha generado una degradación de los recursos forestales y un proceso de deforestación acelerado (Fernández *et al.* 1999). El paisaje actual es altamente perturbado con parcelas de 0.5 a 2 ha de áreas cultivadas, vegetación secundaria, pastizales temporales o permanentes y bosques degradados y abiertos (Parra-Vázquez *et al.* 1989; De Jong y Ruiz-Díaz 1997). En la selva tropical húmeda se observó un proceso de cambio de uso de suelo de selva hacia una vegetación secundaria, agricultura y pastoreo, resultando en un complejo mosaico de parcelas con selva reducida y fuertemente perturbada, vegetación secundaria, área agrícola y pastizal (De Jong *et al.* 2000).

El objetivo principal de la investigación en torno al proyecto Scolel Té es evaluar la factibilidad de crear un sistema genérico de planificación y administración de la producción y comercialización de captura de carbono por productores y comunidades indígenas. La pregunta clave que se trata de responder en la investigación es: ¿Cómo pueden participar pequeños productores y comunidades indígenas (como los de Chiapas) en un mercado internacional de captura de carbono en tal forma que su cooperación contribuya a un desarrollo local sustentable y a la vez a la conservación a largo plazo de sus recursos naturales? El financiamiento de la investigación y desarrollo del sistema provino del programa de investigación forestal del Department for International Development of the UK government (DFIC por sus siglas en inglés) (Reino Unido, proyectos R6320 y R7274). (Detalles del sistema y soporte técnico para proyectos que quieren usarlo se encuentra en: [www.planvivo.org](http://www.planvivo.org)).

Desde su inicio, entonces, la iniciativa del proyecto Scolel Té difiere sustancialmente de otros estudios de captura de carbono, ya que estos últimos se han enfocado a estimaciones generales del potencial biológico y económico de la captura en países tropicales desde la perspectiva de los países industrializados, contestando la pregunta medular: ¿cuánto carbono se puede secuestrar por debajo de un cierto costo?, mientras el proyecto Scolel Té parte de la premisa: ¿cuáles tipos de uso de suelo forestal y agroforestal son de interés para y por las comunidades y productores indígenas?, seguido de la pregunta: ¿cómo se pueden administrar y comercializar los beneficios de captura de carbono para que se genere el capital necesario para su instrumentación en las parcelas de los productores?

Para diseñar y operar un proyecto con las características antes señaladas, se definieron cuatro principios clave que debe cumplir el sistema: 1. transparencia, 2. simplicidad, 3. flexibilidad y 4. basarse en evidencias. Se considera que estos principios son de igual importancia para los campesinos participantes y para los compradores del servicio ambiental de captura de carbono (cuadro 1).

CUADRO 1. LOS PRINCIPIOS CLAVE PARA EL DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN DE UN PROYECTO DE CAPTURA DE CARBONO

1- Transparencia	Los productores y compradores del servicio de captura de carbono necesitan reglas claras sobre su función, derecho y responsabilidad en el proyecto.
2- Simplicidad	Los productores de pequeñas cantidades de carbono requieren procedimientos simples y estandarizados para planificar, registrar, instrumentar y monitorear las actividades relacionadas con la captura de carbono.
3- Flexibilidad	Los productores desean proveer cantidades diferenciadas del servicio de captura de carbono para sus sistemas forestales y agroforestales, de acuerdo con sus necesidades e intereses individuales o colectivos.
4- Basarse en evidencia	La calidad y credibilidad del sistema se basa en evidencias documentadas y verificables en forma de base de datos, reportes y literatura publicada.

Después de definir los sistemas forestales y agroforestales atractivos y útiles para los productores en el estudio de factibilidad, se cuantificaron los beneficios de captura de carbono para cada sistema, de acuerdo con las características específicas de productividad de la zona, las especies que se seleccionaron y la densidad de árboles a sembrar. En el cuadro 2 se resumen los resultados de la estimación para algunos sistemas para las dos eco-regiones.

### LOS MECANISMOS Y SUS INSTITUCIONES

Teniendo la información disponible de los sistemas aceptables y los requerimientos generales de los compradores y vendedores del servicio de captura de carbono, el equipo técnico desarrolló un sistema de planificación que se conoce con el nombre de Plan Vivo (ver de Jong *et al.* 1997); en el equipo técnico participan representantes de AMBIO, una Organización No Gubernamental con técnicos forestales, agrónomos, sociólogos, administradores,

CUADRO 2. EL POTENCIAL DE CAPTURA DE CARBONO PARA ALGUNOS SISTEMAS FORESTALES Y AGROFORESTALES EN LAS REGIONES SUBTROPICALES Y TEMPLADAS DE CHIAPAS

SISTEMA	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	CAPTURA (TC /HA)
Zona (sub-) tropical (sub-) húmeda (<1500 m. s.n.m.)		
Taungya (sistema secuencial de maíz con árboles)	Desarrollo de pequeñas plantaciones de especies comerciales (p. ej. cedro), intercaladas con maíz en los primeros 4-5 años.	120 – 150
Regeneración enriquecida de	Aclareos y plantaciones de enriquecimiento de la selva selvas degradadas degradada, para favorecer su restauración.	80-120
Zona templada (sub-) húmeda (>1500 m. s.n.m.)		
Restauración de bosque de pino-encino degradado	Regeneración controlada de bosque de pino-encino degradado, protegiendo la regeneración natural y reforestación.	70-100
Plantaciones de pino	Establecimiento de plantaciones de pino en pastizales abandonados.	70-120

profesionales del Centro de Manejo de Carbono de Edimburgo (ECCM, por su nombre en Inglés) e investigadores de El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur).

La institución principal que maneja el Plan Vivo es un fideicomiso Fondo Bioclimático que actúa como: 1. un depositario para créditos de carbono, generado por los productores, y 2. una cuenta bancaria para manejar los fondos que entran para adquirir los créditos. El sistema de planeación y administración “Plan Vivo” funciona de la siguiente forma: en una comunidad dada se empieza con una serie de reuniones de discusión con los productores locales y representantes de la comunidad. En estas reuniones se explican los conceptos básicos, como cambio climático, captura de carbono y servicios ecológicos asociados, y las reglas y procedimientos del Fondo. Si existe suficiente entendimiento por parte de la comunidad y si hay un consenso entre sus miembros, ésta puede entrar en el programa activo del Fondo. Productores individuales o grupos organizados elaboran un plan sencillo, desglosando el sistema (agro-) forestal deseado por el participante y su ubicación dentro del terreno comunitario (con un croquis), y describién-

dose qué sistema actual se sustituye, cuánto trabajo le costaría y qué materiales se necesitan.

El Fondo, por medio de AMBIO, ayuda a los productores con entrenamiento y apoyo técnico durante el proceso de planificación, para: 1. seleccionar el sistema más adecuado para sus parcelas entre las opciones posibles, y 2. asegurar que toda la información relevante esté incluida en el Plan Vivo. Los productores someten Planes Vivos completos a la consideración del Fondo, en general mediante un representante comunitario que en ese momento ya ha recibido algún entrenamiento. El equipo técnico del Fondo revisa los Planes Vivos por su viabilidad técnica, económica y social, y a la vez estima los beneficios de captura de carbono de cada Plan aceptable. Actualmente se están elaborando especificaciones técnicas para la mayoría de los tipos de sistemas (agro-) forestales que simplifican estas revisiones. Las especificaciones técnicas incluyen los requerimientos ecológicos y técnicos de las especies forestales para cada zona ecológica, estimaciones de captura de carbono para cada tipo y zona, y lineamientos para el monitoreo. La elaboración y refinamiento de cada especificación técnica es una tarea continua que va paralela al trabajo general del Fondo, incorporando continuamente datos científicos y técnicos e información que se genere durante el monitoreo y revisión interna de las actividades.

Una vez aprobado un Plan Vivo, se entrega una carta oferta al productor o grupo, la cual contiene el resultado de la evaluación, la cantidad de carbono que se captura con la propuesta y los términos generales de cómo se pagarían los servicios de captura de carbono, una vez encontrado un comprador.

Actualmente, las condiciones principales incluyen:

- Cada productor o grupo lleva a cabo las actividades de acuerdo con el Plan Vivo.
- El participante se compromete a aplicar todos esfuerzos razonables para mantener el sistema en permanencia (el Fondo maneja una definición de 100 años para significar permanencia).
- El Fondo tendrá derecho a 5% del producto maderable del área designada en caso de que el participante no continúe con el programa.
- Cambios eventuales deben ser aprobados por el equipo técnico primero, antes de ejecutarlos.

- El productor o grupo facilitará y apoyará los procedimientos de monitoreo.
- Cualquier problema relacionado con la instrumentación, se reporta al equipo técnico.

Si el productor o grupo acepta los términos generales y condiciones, se le otorga el estatus “activo”. Para disminuir los riesgos de pérdidas inesperadas, los productores están obligados a mantener 10% del carbono total de su cuenta en una reserva. Esta cantidad de reserva se ajustará en el tiempo, de acuerdo con las experiencias que se obtengan.

La acreditación financiera de la captura de carbono se genera en un periodo de 10 años del ciclo productivo; 20% de los fondos se liberan con la activación de la cuenta, con el fin de facilitar el capital necesario para establecer la parcela. Con base en las experiencias con proyectos forestales se considera que alrededor de 50% de los costos totales de una plantación se requieren en los primeros 18 meses, mientras que después de 10 años del establecimiento, los costos de mantenimiento son menores que los beneficios que se obtienen con la producción de leña, postes y otros productos no maderables.

Las acreditaciones de carbono se activan siempre después de los monitoreos. Los monitoreos a su vez, se estructuran de la siguiente forma:

- Monitoreo anual de todos los sitios por equipos locales, formados por participantes del proyecto. Se da una capacitación a cada equipo para la toma de los datos.
- Participantes de una comunidad normalmente monitorean las parcelas de una comunidad cercana.
- El equipo técnico del Fondo monitorea 10-20% de los sitios, para verificar la consistencia y precisión del monitoreo.

En noviembre de 2001 se realizó una verificación independiente inicial del sistema de monitoreo por parte de la Société Générale de Surveillance (SGS), y actualmente se están incorporando las recomendaciones en el procedimiento. Cada seis meses se revisa el sistema de planificación y de administración en reuniones, en las cuales se invita a todos los interesados. En estas reuniones se discuten también aspectos estratégicos relacionados con la ofer-



ta y la demanda de créditos de captura de carbono, las políticas internacionales y eventos locales y nacionales.

## LOGROS DEL PROYECTO

Durante los seis años de existencia, el proyecto Scoel Té ha pasado de un concepto poco definido a una empresa vibrante basada en el manejo y comercialización de créditos de captura de carbono. Los ingresos anuales actuales del Fondo por la venta de los Certificados de Reducciones Voluntarios (CER, por sus siglas en inglés) ascienden a aproximadamente US\$ 120,000 por año. El precio de la venta de servicio de captura de carbono es actualmente de US\$ 12.00 por tonelada de C (= US\$ 3.30 por tonelada de CO<sub>2</sub>), de los cuales 66% va directamente a los productores o grupos para invertir en actividades forestales y no-forestales, y 34% se utiliza para cubrir los gastos de asistencia técnica, administración y monitoreo.

Hasta la fecha las actividades financiadas por el Fondo se han enfocado al establecimiento de plantaciones y rehabilitación de bosques degradados (cuadro 3). Las actividades de conservación de reservorios existentes no han sido incorporadas en el Fondo hasta la fecha, sobre todo por falta de herramientas objetivas y verificables para determinar el impacto de estas actividades sobre la disminución de la deforestación. Durante los últimos tres años se ha generado una metodología para determinar las líneas de base necesarias para evaluar el impacto de un proyecto, especialmente para

CUADRO 3. NÚMERO DE PRODUCTORES Y HECTÁREAS REGISTRADAS POR SISTEMA FORESTAL Y AGROFORESTAL Y POR ECO-REGIÓN

SISTEMA	(SUB)-TRÓPICO		TEMPLADA		TOTAL	
	NÚM.	HA	NÚM.	HA	NÚM.	HA
Café con sombra	79	33.5			79	33.5
Cerco Vivo	3	3.0			3	3.0
Taungya	91	35.5			91	35.5
Maíz con nescafé	55	32.0			55	32.0
Achual mejorado	58	56.5	103	109.0	161	165.5
Regeneración natural			1 <sup>1)</sup>	28.0		
Total	286	160.5	104	137	390	297.5

<sup>1)</sup> Comunidad.

Fuente: Base de datos Fondo Bioclimático de 2001.

áreas donde se observa un proceso acelerado de cambio en el uso de suelo, como en el sur de México. Se ha generado un modelo preliminar y se está experimentando con algunas transacciones dirigidas a la conservación en la región Marqués de Comillas, Chiapas.

En este momento es difícil de determinar si los sistemas desarrollados por el proyecto Scolel Té son sustentables a largo plazo. Lo que sí es claro que hay un crecimiento en la demanda por parte de las comunidades y organizaciones en la región y en otros estados para participar en el proyecto o para replicar la experiencia. También se ha notado que los productores, comunidades y organizaciones han invertido mucho más esfuerzo en la planeación y preparación de sus actividades (agro-) forestales que antes con proyectos del gobierno.

Un logro del proyecto ha sido el nivel de capacitación y empoderamiento de los grupos participantes en el negocio de servicios ambientales. Muchos productores han sido capacitados en técnicas específicas, como monitoreo, mapeo, planificación financiera y silvicultura. Algunos representantes han participado en conferencias y talleres internacionales sobre cambio climático y así obtuvieron un entendimiento profundo de la relación entre políticas internacionales y aspectos de desarrollo local.

Los participantes locales están conscientes de que tienen que desarrollar una estrategia para definir su participación en el mercado de captura de carbono a partir del manejo de sus recursos naturales y para usar los beneficios financieros que se generan a partir de una venta eventual.

No se ha hecho un análisis económico para evaluar los impactos sociales y económicos del proyecto en las comunidades participantes. Es probable que el proyecto haya “contribuido” a un mejoramiento económico, pero no ha sido “decisivo” en estos cambios.

## BIBLIOGRAFÍA

- De Jong, B. H. J., G. Montoya-Gómez, K. Nelson, L. Soto-Pinto, J. Taylor y R. Tipper. 1995. Community forest management and carbon sequestration: a feasibility study from Chiapas, Mexico. *Interciencia* 20(6): 409-416.
- y M. de J. Ruíz Díaz. 1997. La investigación forestal y su contribución al manejo de bosques. Pp. 149-165. En: M. R. Parra-Vázquez y B. M. Díaz-Hernández (eds.) *Los Altos de Chiapas: Agricultura y crisis rural*. México: ECOSUR, San Cristóbal de las Casas, México.

- , R. Tipper y J. Taylor. 1997. A Framework for Monitoring and Evaluation of Carbon Mitigation by Farm Forestry Projects: Example of a Demonstration Project in Chiapas, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2: 231-246.
- , R. Tipper y G. Montoya-Gómez. 2000. An Economic Analysis of the potential for carbon sequestration by forests: evidence from southern Mexico. *Ecological Economics* 33(2): 313-327.
- Fernández, J. C., B. H. J. De Jong, G. Montoya-Gómez, T. Aleman-Santillan y M. R. Parra-Vázquez (cords). 1999. *Programa de Desarrollo Productivo Sustentable en las Áreas Marginadas de Chiapas*. Informe Final. Ecosur-Banco Mundial-Sagar.
- Masera, O., B. H. J. De Jong, I. Ricalde y A. Ordóñez. 2000. *Consolidación de la Oficina Mexicana para la Mitigación de Gases de Efecto Invernadero*. Reporte Final. IdE-UNAM. México.
- Montoya, G. G., M. L. Soto, P., B.H.J. De Jong, K. Nelson, P. Farías, J. Taylor y R. Tipper. 1995. *Desarrollo forestal sustentable: captura de carbono en las zonas tzeltal y tojolabal del estado de Chiapas*. Cuadernos de Trabajo, Instituto Nacional de Ecología 4. México.
- Parra-Vázquez, M. R., T. Alemán-Santillán, J. Nahed-Toral, L. M. Mera-Ovando, M. L. López-Mejía y A. López-Meza. 1989. *El subdesarrollo agrícola en los Altos de Chiapas*. México: Universidad Autónoma de Chapingo. Dirección de Difusión Cultural, Subdirección de Centros Regionales. Chapingo.

## Notas

---

\*El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR).

\*\*Centro de Manejo de Carbono de Edimburgo (ECCM).



# Escenarios de emisiones futuras en el sistema energético mexicano

*Juan Quintanilla Martínez\**

## INTRODUCCIÓN

PROSPECTAR ES MIRAR HACIA delante; es imaginar razonadamente lo que podría ocurrir en el futuro, anticipar posibles riesgos y oportunidades. Prospear no es ni adivinar ni profetizar ni pronosticar; es pues un ejercicio de exploración de futuros. Así, futuros en plural, aunque se trate de un solo objeto de estudio; porque si bien el futuro será función de lo pasado, también lo será de lo que ocurra de ahora en adelante y esto no está predefinido. Las imágenes de la prospectiva son un posible insumo de la planeación, pero no son planeación. La planeación busca definir modos de acción para que lo deseado y la realidad percibida sean tan iguales como sea posible en el futuro. La prospectiva se contenta con evaluar modos de evolución posibles, probables o deseables de lo estudiado. Las futuras acciones definidas por los planificadores pueden ser insumo para quienes hacen prospectiva. La prospectiva es un conjunto de técnicas que permiten definir y establecer alternativas evolutivas.

En la década de los ochenta y parte de los noventa, el principal producto de exportación del país fue el petróleo (cerca de dos terceras partes de las exportaciones del país), y aún en la actualidad su participación es importante (en el año 2000, las exportaciones petroleras representaron 10.92% del total de exportaciones del país). Sin embargo, nos preguntamos: ¿y en el futuro? En la medida en que la economía nacional crezca, crecerá también la demanda interna de hidrocarburos. Es muy probable que éstos sigan siendo el principal energético del país en buena parte del presente siglo. La sustitución de una fuente de energía, por otra parte, ha requerido en el pasado

de lapsos de más de 50 años, y la única alternativa que hoy parece viable en la escala necesaria, la nuclear, requiere de grandes inversiones.

En las siguientes secciones de la presente contribución se hará uso de la prospectiva para la creación, análisis y discusión de algunas imágenes de futuro del sistema energético mexicano, sus necesidades de insumos energéticos, sus implicaciones ambientales y posibles acciones de mitigación ante el cambio climático.

El sistema energético mexicano depende en 86.42% de energéticos fósiles (petróleo crudo, derivados del petróleo, gas natural y carbón). El consumo de éstos se localiza mayoritariamente en el propio sector petrolero, en el sector eléctrico y en las grandes concentraciones urbanas, en particular en el transporte y la industria, con impactos ambientales considerables. Por otra parte, existe una amplia legislación ambiental cuya observancia requiere de cambios estructurales en la oferta y uso final de los energéticos, así como cuidados en la producción y distribución de los mismos, y en la disposición de los desechos generados. Asimismo, es necesario prever la demanda, monto y estructura de productos petrolíferos que requerirá el desarrollo económico del país en los próximos años, sujetos a las condiciones ambientales presentes y futuras que la legislación y la sociedad misma están imponiendo ahora e impondrán en el futuro. Adicionalmente, las consideraciones en el ámbito nacional e internacional relacionadas con el posible cambio climático global habrán de manifestarse en presiones, internas y externas, sobre el país para definir una posición y, con ellos, líneas de acción para contender con aquél.

El propósito central es el de analizar los impactos del desarrollo económico y social del país sobre la demanda de energía, así como el comportamiento de las emisiones de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ) con la finalidad de presentar elementos de análisis para la toma de decisiones en el ámbito energético-ambiental, en las esferas nacional e internacional (ver el capítulo *El cambio climático global y la economía mexicana*, de L. M. Galindo, en la sección III).

## EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL SISTEMA ENERGÉTICO MEXICANO Y EMISIONES ASOCIADAS

Todos los países dependen de la energía para su desarrollo, y el suministro energético para un país dado es el resultado del balance de su producción doméstica, exportaciones e importaciones. En la mayoría de los casos el

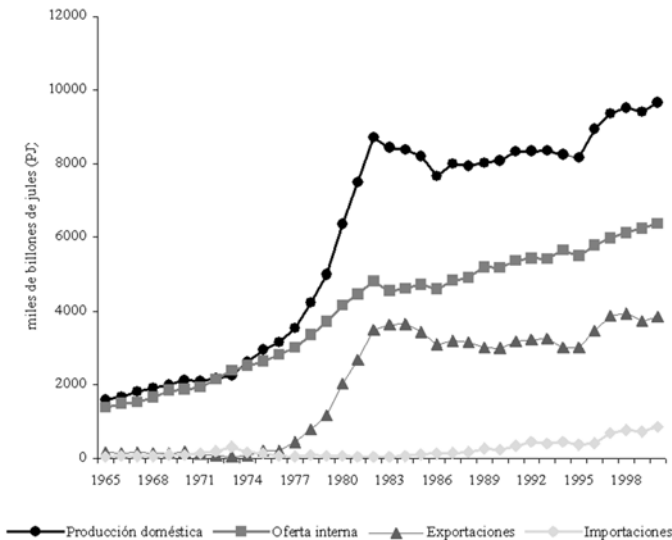
petróleo y los productos derivados constituyen las principales fuentes de energía sobre las cuales descansa la confiabilidad del suministro energético. En el caso de México, siendo un importante productor y exportador de petróleo, la dependencia energética de este insumo como fuente de energía primaria es alta.

La gráfica 1 muestra la producción doméstica de energía, el consumo interno, las exportaciones e importaciones del país a lo largo del periodo 1965-2000. La evolución del suministro total de energía es, casi en su totalidad, dominada por la producción doméstica.

En el año 2000, la producción doméstica de energía primaria por fuente tuvo la estructura siguiente: petróleo crudo y condensados, 69.87%; gas asociado y no asociado, 19.11%; carbón, 2.35%; nuclear, 0.93%; hidráulica, 3.56%; geotermia, 0.64%; bagazo de caña, 0.91%, y leña, 2.63%. La producción doméstica de hidrocarburos (petróleo crudo y gas) representó 88.98% de la producción total doméstica de energía primaria.

Las importaciones de energía primaria fueron sólo de carbón, y las de energía secundaria fueron: coque, 1.94%; gas licuado, 19.42%; gasolinas,

GRÁFICA 1. MÉXICO: PRODUCCIÓN DOMÉSTICA, OFERTA INTERNA, EXPORTACIONES E IMPORTACIONES DE ENERGÍA



19.71%; querosinas, 0.99%; diesel, 6.73%; combustóleo, 31.60%; gas natural, 11.65%, y electricidad, 0.45%.

En cuanto a las exportaciones de energía primaria, 99.99% correspondieron a petróleo crudo y el resto a carbón. Respecto a la energía secundaria su estructura fue la siguiente: gas licuado, 3.35%; gasolinas, 57.79%; querosinas, 3.34%; diesel, 4.12%; combustóleo, 21.44%; productos no energéticos, 5.82%; gas natural, 3.83%, y electricidad, 0.31%.

Por lo que respecta a la oferta interna de energía primaria compuesta por la producción doméstica, las importaciones, las exportaciones, variaciones de inventarios, maquila e intercambio y energía no aprovechada de fuentes primarias y secundarias de energía, su estructura fue: petróleo crudo y condensados, 45.36%; gas asociado y no asociado, 25.94%; carbón, 4.04%; nuclear, 1.42%; hidráulica, 5.41%; geotermia, 0.96%; bagazo de caña, 1.37%; leña, 3.99%, y una fracción muy pequeña de energía eólica. En términos de energía secundaria, la estructura fue: coque, 0.56%; gas licuado, 2.35%; gasolinas, 2.70%; querosinas, 0.04%; diesel, 1.08%; combustóleo, 3.46%; gas natural, 1.44%, y electricidad, 0.05%.

De acuerdo con la gráfica 2, el sector eléctrico es el mayor consumidor de energía, seguido, en orden de importancia, por los sectores: transporte, industrial, petrolero (incluye una pequeña contribución de la coquización de carbón), residencial, agropecuario, comercial y el público y de servicios.

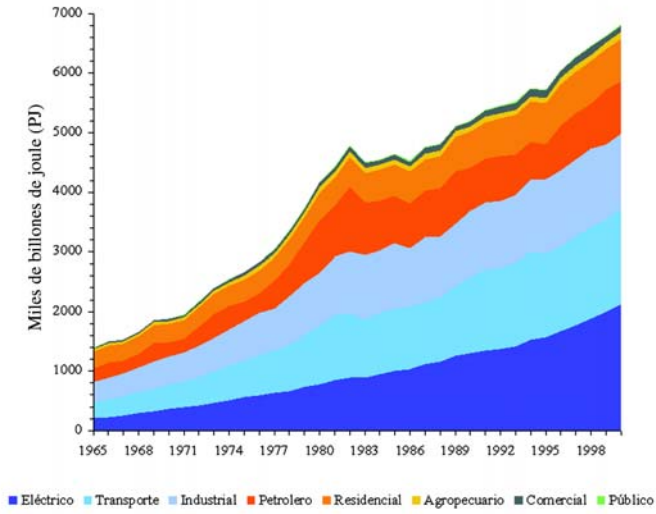
En el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kioto, las emisiones al aire asociadas con el consumo de energía corresponden al  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ .

La gráfica 3 muestra las emisiones históricas asociadas con el consumo energético de los sectores antes mencionados. Es conveniente indicar que todos, excepto el petrolero, de acuerdo con los Balances Nacionales de Energía 1965-2000, consumen electricidad en sus actividades, y las emisiones de ese consumo están incluidas en los del sector eléctrico. El sector petrolero genera su propia electricidad y las emisiones asociadas están incluidas en las de ese sector.

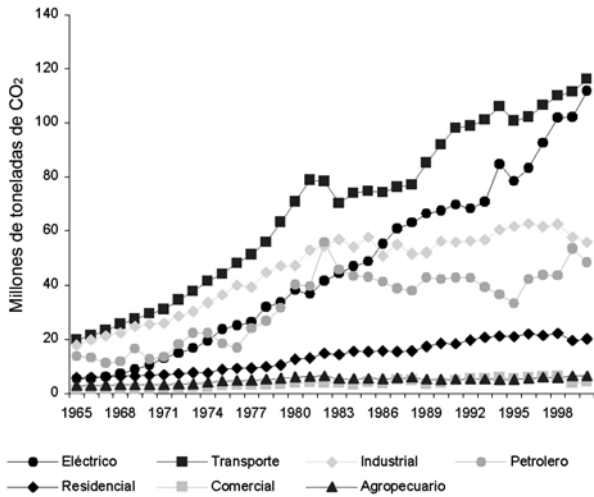
En el año 2000, el país emitió poco más de 363 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$ . El sector transporte fue el que contribuyó con la mayor cantidad, 116.2, siguiéndole el sector eléctrico, 111.7; el industrial, 55.8; el petrolero, 48.5; el residencial, 20.2; el agropecuario, 6.4; y el comercial, 4.3 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$ . Estas cifras indican sobre cuáles sectores convendría incidir en una política de reducción de emisiones para contender con la problemática ambiental del país y sus compromisos internacionales futuros.



GRÁFICA 2. MÉXICO: EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL CONSUMO DE ENERGÍA POR SECTOR

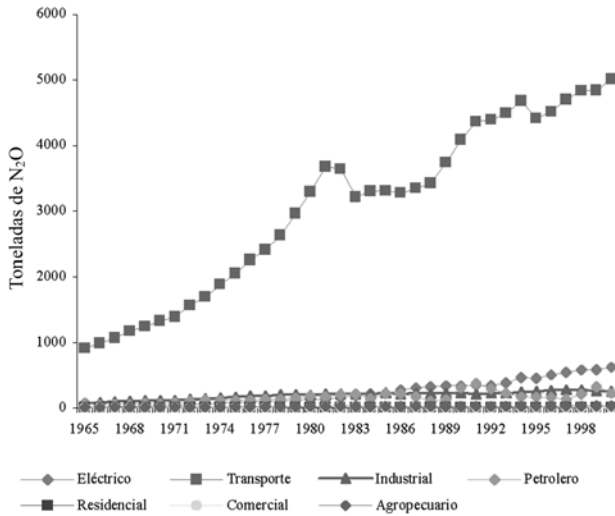


GRÁFICA 3. MÉXICO: EMISIONES DE CO<sub>2</sub> PROVENIENTES DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLES FÓSILES





GRÁFICA 5. MÉXICO: EMISIONES DE N<sub>2</sub>O PROVENIENTES DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLES FÓSILES



Las gráficas 4 y 5 muestran las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O asociadas con el consumo de combustibles fósiles en el Sistema Energético Mexicano. Estas emisiones, comparadas con las mostradas en la gráfica 3, resultan pequeñas; sin embargo, tienen un alto Potencial de Calentamiento Global Directo (cuadro 1) a lo largo del tiempo y, por ello, es relevante su reducción. A diferencia de las emisiones de CO<sub>2</sub>, las de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O pueden ser reducidas mediante diversas acciones de carácter tecnológico y de sustitución de combustibles, aspectos que se discutirán en las siguientes secciones.

CUADRO 1. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DIRECTO  
*Gases de efecto invernadero seleccionados*

GAS	EFECTO DIRECTO EN EL HORIZONTE		
	20 AÑOS	100 AÑOS	500 AÑOS
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	1	1	1
Metano, CH <sub>4</sub>	56	21	6.5
Oxido Nitroso, N <sub>2</sub> O	280	310	170

Fuente: UNEP/OECD/IEA/IPCC, 1997.

## PROYECCIONES DE DEMANDA DE ENERGÍA Y EMISIONES ASOCIADAS

Las proyecciones de demanda de energía primaria y final, así como de las emisiones asociadas, que se discutirán en ésta y las siguientes secciones, se basan en el modelo MODEMA (MOdelo de DEMAnda) desarrollado por el autor en la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico (DGSCA) y el Programa Universitario de Energía (PUE) de la UNAM. MODEMA es un modelo de simulación tipo *top-down*. Las variables exógenas son el producto interno bruto (PIB) del país, su estructura; la población y su estructura; las intensidades energéticas para los sectores y subsectores, y el consumo de energía per cápita (ver el capítulo *Modelación del impacto económico de la mitigación de emisiones de GEI*, de M.E. Ibararán, en esta sección).

MODEMA incorpora ocho grandes sectores (petrolero, eléctrico, industrial, transporte, residencial, comercial, público, y agropecuario); 17 subsectores o ramas industriales (siderurgia, petroquímica de PEMEX, química, azúcar, cemento, minería, celulosa y papel, vidrio, fertilizantes, cerveza y malta, aguas envasadas, automotriz, construcción, hule, aluminio, tabaco, y otras ramas industriales); cinco subsectores del transporte (autotransporte, aéreo, ferroviario, marítimo, y eléctrico), y dos subsectores del residencial (rural y urbano). También permite el cálculo de las emisiones de ocho contaminantes ( $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , HC y partículas).

Se consideran dos escenarios económicos (optimista y moderado) y uno poblacional. Para cada uno de los escenarios económicos (cuadro 2) tenemos dos opciones para las intensidades energéticas, intensidades tendenciales y de opinión de expertos. Esto último con el propósito de tener una idea sobre cuál sería el efecto en la demanda y las emisiones de las acciones de eficiencia energética y sustitución de combustibles. El escenario de población supone que se pasará de 98.8 millones de habitantes en el año 2000 a 111.5 millones para el 2010.

Las acciones de eficiencia energética se ven reflejadas, respecto a la tendencia, mediante la opinión de expertos de los diferentes sectores y subsectores. Las acciones de sustitución de combustibles, respecto a la tendencia, se enfocan en los sectores eléctrico, transporte y residencial, las cuales son aplicables en cierta medida a otros sectores.

- En el sector eléctrico se considera el efecto de la política actual de sustitución de combustóleo por gas natural, crecimiento limitado de la generación hidroeléctrica, nuclear, geotermia y carbón. Asimismo,

CUADRO 2. ESCENARIOS ECONÓMICOS Y OPCIONES DE MITIGACIÓN

		ESCENARIOS		OPCIONES DE MITIGACIÓN
		OPTIMISTA 2000-2010 ΔPIB (PROMEDIO ANUAL): 5%	MODERADO 2000-2010 ΔPIB (PROMEDIO ANUAL): 3%	
Intensidades energéticas		EOIA (sin restricción)	EMIA (sin restricción)	<p>1. No se impone restricción alguna sobre la generación hidro-eléctrica, nuclear, geotérmica y carboeléctrica.</p> <p>2. Se considera que el crecimiento de la generación nuclear, hidroeléctrica, geotérmica y carboeléctrica de los escenarios EOIA y EMIA no se concreta o que lo hace parcialmente y que sus contribuciones se cubren con ciclos combinados a base de gas natural. En caso el sector transporte (auto transporte) hay una penetración de gas natural sustituyendo, parcialmente, gasolinas por gas natural. En el sector residencial hay una mayor penetración de gas natural sustituyendo gas licuado de petróleo.</p> <p>3. Mismas consideraciones que en los escenarios EOIAGN y EMIAGN, pero no hay suficiente disponibilidad de gas y se complementa con combustóleo.</p>
	Tendenciales	EOIAGN (opción gas natural)	EMIAGN (opción gas natural)	
		EOIACO (opción combustóleo)	EMIACO (opción combustóleo)	

Cuadro 2. *Continúa*

	ESCENARIOS	OPCIONES DE MITIGACIÓN
	OPTIMISTA 2000-2010 $\Delta$ PIB (PROMEDIO ANUAL): 5%	
	MODERADO 2000-2010 $\Delta$ PIB (PROMEDIO ANUAL): 3%	
	EOIB (sin restricción)	4. Idéntico que en la observación 1, pero se incluye la opinión de expertos con medidas de eficiencia energética.
Opinión experta	EOIBGN (opción gas natural)	5. Idéntico que en la observación 2, pero se incluye la opinión de expertos con medidas de eficiencia energética.
	EOIBCO (opción combustóleo)	6. Idéntico que en la observación 3, pero se incluye la opinión de expertos con medidas de eficiencia energética.
	EMIB (sin restricción)	
	EMIBGN (opción gas natural)	
	EMIBCO (opción combustóleo)	

se compara con el caso en el que se tuvieran limitaciones en la disponibilidad de gas natural, y que por ello fuese necesario recurrir al combustóleo.

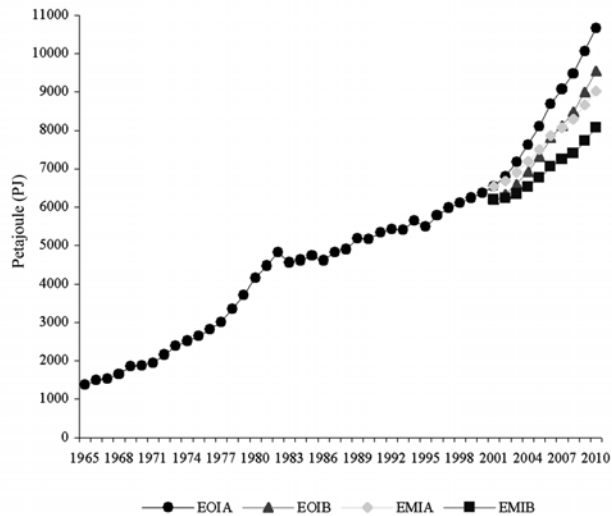
- En el sector transporte se considera una penetración relativamente pequeña del gas natural en sustitución de gasolinas automotores y en el residencial la penetración de gas natural en sustitución de gas licuado. Por razones de espacio se discutirá en detalle el sector eléctrico y se harán breves comentarios sobre los resultados para otros sectores. Se refiere al lector a la bibliografía asociada a la presente contribución (Quintanilla y Bauer 1995).

### DEMANDA DE ENERGÍA: ESCENARIOS (BASE) SIN RESTRICCIONES

La gráfica 6 muestra las proyecciones de demanda de energía para los dos escenarios económicos, optimista (EO) y moderado (EM), y de acuerdo con las opciones tendenciales (EOIA y EMIA) y de opinión de expertos (EOIB y EMIB). En el periodo 2000-2010, en el escenario EOIA la tasa de crecimiento promedio anual de la demanda de energía es de 5.5%, y en el escenario EOIB es 4.23%, en tanto que el PIB crece a 5%. En estas condiciones, el escenario EOIB conduciría a un desacoplamiento entre el crecimiento de la economía del país y su consumo energético y, por tanto, representaría un rompimiento con el comportamiento histórico de estas dos variables. De acuerdo con las consideraciones de los expertos, en el escenario EOIB se observa, para el año 2010, una menor demanda de energía (12.67%) en comparación con el escenario EOIA, consecuencia de un uso más eficiente de la energía, cambio estructural o de ambos. Lamentablemente, la información disponible no permite discernir entre estas posibilidades, tampoco qué tanto de la reducción le corresponde a cada una de ellas.

De darse el escenario EOIB, el país requeriría, respecto al año 2000, 7.26% menos de energía por peso producido. Esta reducción en la intensidad energética del país (energía empleada por peso producido) resultaría interesante; sin embargo, comparada con las reducciones que han logrado otros países de la OECD en el periodo 1974-1991, resulta pequeña y muestra las grandes posibilidades de reducción en la demanda de energía mediante acciones reales de conservación de energía, cambios en la producción y cambio estructural en la producción. Por ejemplo, en el periodo 1974-1991, el Japón redujo su intensidad energética en 37.2%; es decir, en 1991 el Japón requi-

GRÁFICA 6. MÉXICO: CONSUMO HISTÓRICO DE ENERGÍA Y ESCENARIOS BASE DE DEMANDA DE ENERGÍA EN EL PERIODO 2001-2010



rió 37.2% menos energía para producir la misma cantidad de PIB que en 1974, todo ello en dólares de 1985 (ECCJ 1992). Otros países de la OECD también han logrado reducciones importantes; por ejemplo, Alemania, Estados Unidos y el Reino Unido redujeron su intensidad energética en 24.27, 26.09 y 28.07%, respectivamente, en el mismo periodo que Japón.

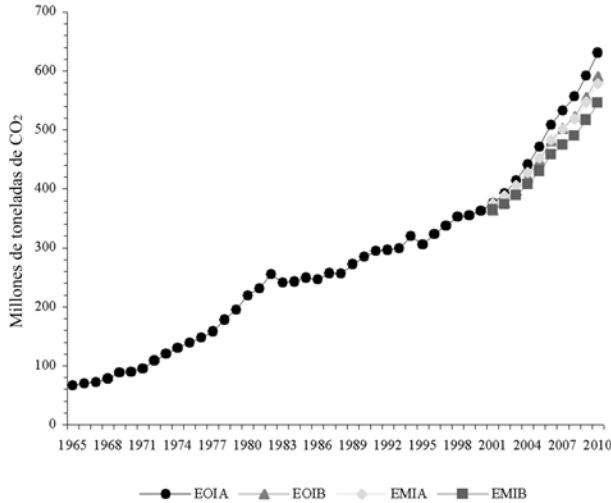
Por el contrario, si el escenario de crecimiento económico fuese el moderado, la demanda de energía sería menor (en cualquiera de las dos opciones: tendencial [emia] y opinión de expertos [emib]) en comparación con las correspondientes al escenario optimista; sin embargo, este escenario económico no sería el más deseable para el país.

#### EMISIONES DE CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> Y N<sub>2</sub>O: ESCENARIOS (BASE) SIN RESTRICCIONES

La gráfica 7 muestra, para los escenarios considerados, la evolución histórica y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas con los escenarios de demanda de energía. Así, en el año 2000 el país emitió 363 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Para



GRÁFICA 7. MÉXICO: EVOLUCIÓN HISTÓRICA (1965-2000) Y ESCENARIOS (2001-2010) PARA LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> ASOCIADAS CON LA DEMANDA DE ENERGÍA



el año 2010, en los cuatro escenarios considerados, éstas pasarían a 630.6, 555.7, 526.3 y 464.2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, respectivamente. La comparación de estas cifras hace ver los efectos de reducción en las emisiones de las acciones que se mencionaron en la sección anterior. Por ejemplo, si se diese el escenario EOIB, conduciría a que en el 2010 se requiriese 12.67% menos de energía y a la emisión de 555.7 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, esto es, 74.9 millones de toneladas menos que en el escenario EOIA.

### DEMANDA DE ENERGÍA Y EMISIONES ASOCIADAS: ESCENARIOS CON RESTRICCIONES

Actualmente, en México y en otras partes del mundo, la política energética se orienta a un mayor uso de gas natural en los sectores eléctrico, autotransporte, industrial, residencial y comercial. Las razones son varias, pero puede decirse que la más importante es de tipo ambiental. En el caso de México, la política de sustitución de combustóleo en el sector eléctrico; de gasolinas en el autotransporte; de gas licuado de petróleo en el sector residencial, y de diesel

y otros combustibles por gas natural en los sectores industrial y comercial tiene, claramente, objetivos ambientales. Esto es, reducción de emisiones a la atmósfera dado que el gas natural es un combustible que contamina en menor proporción si se compara con el resto de los combustibles fósiles.

Para tener una imagen lo más amplia posible de los efectos energético-ambientales de una política de gas natural, se analizaron los siguientes escenarios:

Para la sustitución de combustibles en el sector eléctrico:

- EOIA, EOIB, EMIA, EMIB: sin restricciones.
- EOIAGN, EOIBGN, EMIAGN, EMIBGN: opción todo a gas natural.
- EOIAGN1, EOIBGN1, EMIAGN1, EMIBGN1: opción hidro-energía, carbón y geotermia; el resto se va a gas natural.
- EOIAGN2, EOIBGN2, EMIAGN2, EMIBGN2: opción hidro-energía, nuclear, carbón y geotermia; el resto se va a gas natural.

Para el sector autotransporte:

- EOIA, EOIB, EMIA, EMIB: sin restricciones.
- EOIAGN, EOIBGN, EMIAGN, EMIBGN: opción a gas natural.

En el sector residencial:

- EOIA, EOIB, EMIA, EMIB: sin restricciones.
- EOIAGN, EOIBGN, EMIAGN, EMIBGN: opción a gas natural.

Para el sector industrial sólo consideraremos los escenarios de eficiencia energética.

- EOIA, EOIB, EMIA, EMIB: sin restricciones.

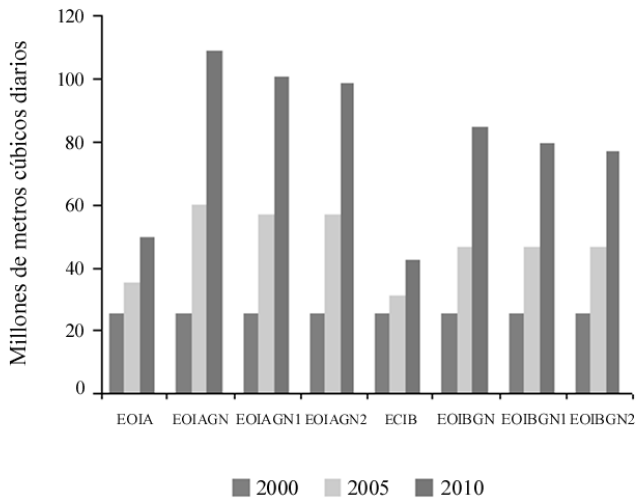
En el caso de la expansión del sistema eléctrico nacional de acuerdo con los escenarios EOIA, EOIB, EMIA y EMIB sin restricciones, se observa el fuerte crecimiento de capacidad de generación en vapor (mayor y menor) e hidroeléctricas. Para el resto de las tecnologías de generación, la capacidad, prácticamente, se duplica para el año 2010. En estos escenarios, las proyecciones para los combustibles usados en el sector muestran para el año 2010, prácticamente, una duplicación en la contribución de cada uno de ellos.

Para los escenarios sujetos a restricciones (EOIAGN, EOIBGN, EMIAGN y EMIBGN) – es decir que no se permite crecimiento de la capacidad de ninguna de las tecnologías de generación, excepto de las correspondientes a ciclo combinado basado en gas natural, hay un crecimiento en la instrumentación de la tecnología de ciclo combinado basado en gas natural. Ello conlleva a un notable aumento de los requerimientos de gas natural para generación eléctrica (gráfica 8).

Por ejemplo, en el escenario EOIAGN2 la generación eléctrica únicamente con ciclos combinados basados en gas natural implicaría, para el año 2010, 98.24 millones de metros cúbicos de gas natural por día. Asimismo, implicaría una importante reducción (45.6 millones de toneladas respecto a las del escenario base) de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (gráfica 9).

En cuanto a las emisiones de CH<sub>4</sub>, la situación es la opuesta; esto es, se observa un incremento importante en las emisiones respecto al escenario base. Este incremento se debe, fundamentalmente, al uso de gas natural en el autotransporte y muy por debajo se ubican las contribuciones de los sectores eléctrico y residencial por el uso de este energético.

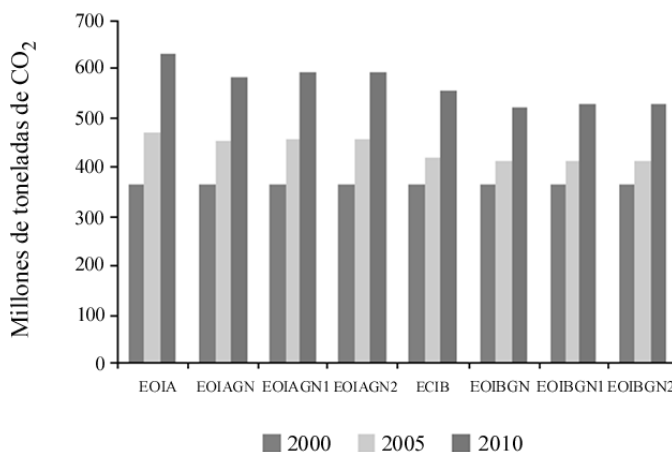
GRÁFICA 8. CONSUMO DE GAS NATURAL EN EL SECTOR ELÉCTRICO PARA LOS ESCENARIOS BASE Y CON RESTRICCIONES



En los escenarios EOIAGN1, EOIBGN1, EMIAGN1 y EMBGN1, sujetos a las mismas restricciones del caso anterior, excepto que ahora se permite, adicionalmente, el crecimiento de la hidroenergía, carboeléctrica y la geotermia, el resultado más notable consiste en el fuerte aumento (menos fuerte que en el escenario anterior) de la tecnología de ciclo combinado basado en gas natural y el crecimiento de 2,100 MW a partir de carbón. En este escenario se tiene un crecimiento, también notable, de los requerimientos de gas natural para generación eléctrica (gráfica 8), la necesidad de importar carbón, y una reducción, ligeramente menor (gráfica 9), de las emisiones a la atmósfera en comparación con el escenario EOIAGN, debido a la penetración de carbón en sustitución de gas natural.

Finalmente, con los escenarios EOIAGN2, EOIBGN2, EMIAGN2 y EMBGN2, sujetos a las restricciones previas, excepto que ahora se permite, en adición, el crecimiento de la capacidad de generación nuclear, los resultados generales son semejantes a los del caso anterior, excepto que los requerimientos de gas natural son menores (gráfica 8), los de carbón importado se mantienen, y crece la demanda de uranio y de geotermia. Las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera se reducen aún más (gráfica 9) como resultado de la sustitución de capacidad del ciclo combinado a base de gas natural con capacidad nu-

GRÁFICA 9. EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EN EL SECTOR ELÉCTRICO PARA LOS ESCENARIOS BASE Y CON RESTRICCIONES



clear. Las emisiones de  $\text{CH}_4$  permanecen, esencialmente, iguales a las del escenario anterior.

En el caso del sector transporte, sólo se consideró un escenario de sustitución de combustibles y se aplicó al sector autotransporte mediante la sustitución de gasolinas por gas natural. Para el año 2010, la sustitución representa una reducción de 11.4 millones de barriles de gasolina. La pequeña diferencia en los requerimientos de gas natural en los escenarios EOIAGN y EOIBGN y los escenarios EMIAGN y EMIBGN es consecuencia de las acciones de eficiencia energética. Buena parte de los efectos benéficos de tener motores más eficientes se ve reducida por los problemas de vialidad que han reducido la velocidad promedio de desplazamiento en las grandes concentraciones urbanas. Las emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera se reducen año con año, conforme penetra el gas natural. Sin embargo, las emisiones de  $\text{CH}_4$  crecen por la misma razón. Las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  sólo tienen un carácter indicativo debido a la carencia de factores de emisión para gas natural y gas licuado en el autotransporte y del *jet fuel* en el sector de transporte aéreo.

En el caso del sector residencial, para los escenarios sin restricciones se observan los mismos valores para todos los escenarios, lo cual se explica por el hecho de que, de acuerdo con los supuestos del modelo, el consumo depende de manera directa del escenario de crecimiento de la población y, de manera marginal, del escenario económico específico. Por otro lado, para los escenarios de sustitución de combustibles en el sector, se consideraron dos escenarios de sustitución de gas licuado de petróleo por gas natural. El escenario de mayor grado de penetración del gas natural se aplicó al escenario de crecimiento económico optimista, y el de menor grado de penetración al escenario de crecimiento económico moderado. En ambos escenarios, las emisiones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  disminuyen de manera progresiva conforme penetra el gas natural. El efecto de la sustitución sobre las emisiones de  $\text{CO}_2$  es más notable como consecuencia del factor de emisión correspondiente. Las emisiones de  $\text{CH}_4$  también disminuyen, pero a un menor ritmo, como consecuencia de la muy ligera diferencia entre los factores de emisión del gas natural y gas licuado de petróleo.

## CONCLUSIONES

Atendiendo a consideraciones de crecimiento económico y con una política de promoción del gas natural, la imagen de futuro energético más deseable

está constituida por el escenario con restricciones: opción hidroenergía, nuclear, carbón, geotermia (y el resto va a gas natural), constituido por el subconjunto de escenarios: EOIBGN (opción gas natural) para los sectores transporte y residencial y el EOIB (escenario base sin restricciones) para los sectores industrial, petrolero, agropecuario, público y de servicios).

La política de gas natural para sustituir otros combustibles fósiles implicaría importantes incrementos anuales en la demanda de ese energético y, por consecuencia, en su producción doméstica, o depender fuertemente de importaciones. Por ejemplo, si se diera el escenario más deseable, con un poder calorífico para el gas natural de 35,420 kJ/m<sup>3</sup>, la demanda de gas natural pasaría de 3,892.5 millones de pies cúbicos diarios (110.2 millones de m<sup>3</sup>/día) en el año 2000 a 4,880.4 (138.2 millones de m<sup>3</sup>/día) en el 2005, y a 7,152 (202.5 millones de m<sup>3</sup>/día) en el 2010. Para el escenario menos deseable, las cifras correspondientes serían 5,012.1 millones de pies cúbicos diarios (141.9 millones de m<sup>3</sup>/día) en el 2005 y 6,764.9 millones de pies cúbicos diarios (191.6 millones de m<sup>3</sup>/día) en el 2010. Es importante mencionar que las cifras citadas incluyen el gas natural que se emplea como energético y la parte que se emplea como materia prima en la petroquímica.

Si bien las importaciones tienen su lado benéfico (razones de logística, aprovechar precios bajos del energético en el mercado internacional, etc.), también presentan toda una serie de posibilidades adversas (dependencia de fuentes de suministro externas al país y vulnerabilidad del sistema energético nacional ante eventos externos, escalada de precios, salida de divisas, no-disponibilidad o muy reducida disponibilidad de recursos para invertir en el mejoramiento y la ampliación de la capacidad de producción, transportación y distribución del energético, etc.).

De acuerdo con datos de la Memoria de Labores de Petróleos Mexicanos la reserva remanente de gas seco, a enero del 2002, fue de 50,648.2 miles de millones de pies cúbicos. De darse el escenario más deseable, la demanda acumulada de gas natural al año 2010 representaría 18,823.5 millones de pies cúbicos de gas seco. En consecuencia, los recursos nacionales de gas seco serían más que suficientes para satisfacer el escenario del crecimiento mencionado. La posible limitante a éste y otros escenarios, se ubicaría en la disponibilidad de recursos para invertir en el desarrollo de los campos productores y en la infraestructura para su transportación, procesamiento, almacenamiento y distribución.

Las acciones de eficiencia energética comentadas tienen el efecto de reducir la demanda de energía y, con ello, las emisiones asociadas con el consumo energético. Los resultados obtenidos indican “que no hay peor lucha que la que otros hacen” y, por ello, la necesidad de llevar a cabo acciones reales y sostenidas en este campo. Si bien estas acciones no resuelven el problema de emisiones, sí tienen la virtud de contribuir, en forma importante, a la reducción de ellas. Por otra parte, harían más competitiva a la industria y a otras actividades mediante la reducción de la energía requerida por peso producido. Asimismo, bajo cualquier escenario de desarrollo económico y poblacional, su impacto se haría sentir en el monto de las inversiones que requiere el sector energético (petrolero y eléctrico) para satisfacer la demanda de energía.

En el escenario más deseable, el cual incluye la penetración de gas natural en el sector autotransporte, la demanda de gasolina crece rápidamente, pasando de 194.7 millones de barriles en el año 2000 a 238.3 en el 2005 y a 320.3 en el 2010. Por otra parte, si se incluyen los consumos de gasolina de otros sectores y sus usos como materia prima, la demanda total de gasolina pasaría de 208.4 millones de barriles en el año 2000 a 252.4 en el 2005 y a 338.1 en el 2010. Tomando en cuenta que la capacidad actual de refinación es de 1.525 millones de barriles diarios, la demanda total de gasolina implicaría que esta capacidad se ampliase a 2.1 millones de barriles diarios en el 2005 y a 2.8 en el 2010. De no ser así, la demanda no satisfecha con producción doméstica sería satisfecha con importaciones y maquila e intercambio neto, tal y como ocurre actualmente, pero con volúmenes mucho mayores. Estos incrementos en la demanda de gasolina y en la demanda interna de crudo, tendrían impacto en el nivel de producción de crudo, en sus exportaciones y divisas para la economía del país. En el año 2001, la producción de crudo fue de 3.127 millones de barriles por día, de los cuales se exportaron, en promedio, 1.7 millones de barriles diarios. Satisfacer la demanda interna y mantener el nivel de las exportaciones implicaría incrementar la producción de crudo al nivel de 3.8 millones de barriles diarios para el 2005 y a 4.5 para el 2010.

En el sector residencial, en términos energéticos la sustitución de un barril de gas licuado de petróleo por gas natural equivale a emplear 105.421 metros cúbicos de gas natural, y en términos de emisiones de CO<sub>2</sub> equivaldría a que se dejen de emitir 26.015 Kg de este contaminante. Las acciones de racionalidad energética y de reducción de emisiones apuntarían hacia el

mantenimiento sistemático de calentadores de agua basado en gas licuado y natural; la sustitución de calentadores de agua con piloto por sistemas que no lo requieran; la instalación de colectores solares para calentamiento de agua con respaldo de calentador de gas convencional (Quintanilla *et al.* 2001), y la sustitución de estufas con piloto por estufas de encendido eléctrico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Energy Conservation Center (ECCJ). 1992. *Japan Energy Conservation Handbook*. Japan.
- Quintanilla, J. y M. Bauer. 1995. Projection of the Global, Regional and Sectorial Energy Demand and Emissions for México. En: *Proceedings of the XVI World Energy Council*, 1995, Work 4.3.13: 223-241. Tokyo, Japan.
- Quintanilla, J. *et al.* 2001. *Uso masivo de la energía solar en sustitución de combustibles fósiles en la Zona Metropolitana del Valle de México*. México: PUE-UNAM, Banco Mundial.
- SE (Secretaría de Energía). 2001. *Balance Nacional de Energía 2000*. México: Secretaría de Energía.

## Notas

---

\* Dirección General de Servicios de Cómputo Académico, UNAM.



# Opciones para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte

*Dick Homero Cuatecontzi,\* Jorge Gasca,\*  
Uriel González\* y Francisco Guzmán\*\**

## INTRODUCCIÓN

EL CONSUMO GLOBAL de energía y las emisiones mundiales asociadas de CO<sub>2</sub> han registrado una tendencia ascendente desde 1971 (IPCC 2001). Los combustibles fósiles son la fuente dominante de energía, y su uso es responsable de la generación de más de dos tercios de las emisiones de gases de efecto. Las emisiones provenientes del sector transporte, y particularmente aquellas de los vehículos que se desplazan por carretera, aumentan considerablemente los niveles de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

En los países miembros de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OECD por sus siglas en inglés), el sector transporte conformado por los vehículos que se desplazan por carretera, los ferrocarriles, los barcos y los aviones, contribuye con aproximadamente 27% de las emisiones de CO<sub>2</sub>; el subsector del transporte por carretera aporta de 55 a 99% de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector, dos tercios de los cuales son asignadas a los automóviles fundamentalmente en la forma de emisiones de CO<sub>2</sub>. En 1995, el sector aportó 22% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. Estas emisiones han registrado un rápido crecimiento a una tasa aproximada de 2.5% anual, siendo en los países en desarrollo donde se observa el mayor aumento desde 1990 (7.3% anual en la región Asia – Pacífico), en contraste, en las economías en transición se registra una tasa de reducción anual del 5.0% en las emisiones (IPCC 2001).

## SUSTENTABILIDAD DEL SECTOR TRANSPORTE

### Ámbito mundial

En la mayoría de los países miembros de la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), el transporte es el sector dominante en lo que se refiere al consumo de energéticos derivados del petróleo. En los últimos 30 años se ha registrado un incremento uniforme en su uso, de tal suerte que hoy en día representa casi dos tercios del consumo total de petrolíferos en esos países (IEA 2001).

Las emisiones de CO<sub>2</sub> asignadas al transporte por carretera, durante el periodo comprendido entre 1990 y 1999, han registrado un incremento mayor comparadas con las producidas por cualquier otro sector, debido a que en todos los países hubo un incremento en las distancias recorridas por los vehículos motorizados particularmente por los automóviles y los vehículos ligeros de pasajeros. Por otra parte, a pesar de los beneficios alcanzados en los últimos 20 años sobre la eficiencia técnica de los vehículos de servicio ligero, las preferencias por modelos más potentes, más pesados y más grandes, han anulado gran parte de los beneficios conseguidos en eficiencia, dando como resultado un cambio mínimo en la economía del combustible de la flota vehicular promedio. Debido a que se espera en el futuro un aumento mayor en las distancias recorridas por las distintas categorías de vehículos, uno de los retos más grandes en lo referente a la reducción del uso de energéticos derivados del petróleo y a sus emisiones asociadas de CO<sub>2</sub>, lo representa la clase de vehículos de servicio ligero.

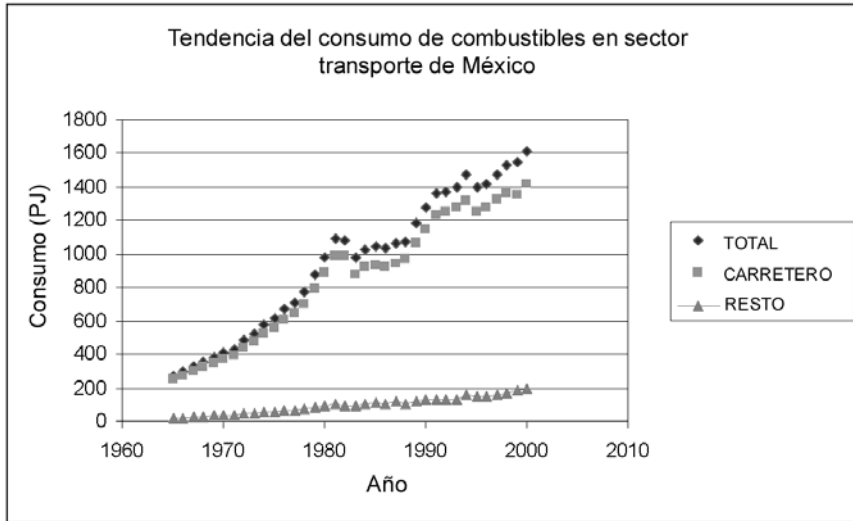
La Agencia Internacional de Energía estima que en ausencia de nuevas iniciativas reguladoras, el consumo de combustibles y las emisiones asociadas de CO<sub>2</sub>, para los vehículos de servicio ligeros, se incrementarán en 30% para el año 2010, respecto al nivel que se tenía en 1990 en los países miembros de esta organización.

### Ámbito nacional

#### *a) Consumo de energía*

En la gráfica 1 se muestra la evolución registrada del consumo de energéticos por los modos de transporte en la República Mexicana de 1965 a 2000 (SENER 2002).

GRÁFICA 1. DEMANDA DE ENERGÍA EN LOS DIFERENTES MODOS DE TRANSPORTE EN LA REPÚBLICA MEXICANA



Fuente: SENER 1997 y 2002.

La tendencia al alza del consumo total de combustibles es semejante a la tendencia exhibida por el modo de transporte por carretera. En 1998, el consumo total de combustibles en el sector ascendió a 1,527.26 PJ, que representa 39.95% del consumo total de energéticos en todo el país; en 1999, la demanda de combustibles por este sector se incrementó en 1.36%, alcanzando los 1,548.04 PJ, lo que equivale a 41.70% del consumo total de energéticos del país. Finalmente, en el año 2000, la demanda de combustibles por el sector del transporte alcanzó 1,614.23 PJ, equivalentes a 42.04% del consumo total de energéticos.

El transporte de carga y el de pasajeros por carretera fueron los consumidores mayoritarios de energéticos, alcanzando en 1999 la cifra de 1357.20 PJ, lo que representó 87.67% del consumo total del sector. Este modo de transporte incrementó su consumo de energéticos durante el 2000 en 4.31% respecto al del año anterior.

En 1999, el transporte aéreo se ubicó como el segundo gran consumidor en importancia con 115.33 PJ, equivalentes a 7.45%; le siguieron el transporte marítimo, ferroviario y el eléctrico con 3.23, 1.41 y 0.24%, respectivamente. Para el año 2000, los consumos de energéticos fueron: 115.94 PJ, 56.31

PJ, 22.39 PJ y 3.86 PJ, en el mismo orden. En el cuadro 1 se muestra el consumo de los principales energéticos utilizados en los diferentes subsectores que integran al sector transporte mexicano para los años 1999 y 2000.

En 1998 por primera vez se registró el consumo de gas natural comprimido en el sector transporte, mientras que el consumo de gas licuado de petróleo registró un ascenso a más del doble comparado con el de 1998.

*b) Emisiones de gases de efecto invernadero*

El primer Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para México, el cual fue desarrollado para el Instituto Nacional de Ecología durante 1995, con el auspicio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) y del Programa de Apoyo a

CUADRO 1. PRINCIPALES ENERGÉTICOS UTILIZADOS EN EL SECTOR TRANSPORTE MEXICANO

CONSUMO DE ENERGÍA EN EL SECTOR TRANSPORTE EN 2000 (1999) (PJ)*							
SUBSECTOR							
ENERGÉTICO	CARRETERO	AÉREO	MARÍTIMO	FERROVIARIO	ELÉCTRICO	TOTAL	% POR ENERGÉTICO
Gas licuado	45.24 (35.34)					45.24 (35.34)	2.80 (2.28)
Gasolinas	997.00 (956.15)	0.83 (0.94)				997.87 (957.09)	61.82 (61.83)
Querosenos		115.10 (114.39)				115.10 (114.39)	7.13 (7.39)
Diesel	373.24 (365.36)		43.52 (41.57)	22.39 (21.87)		439.16 (428.79)	27.21 (27.69)
Combustóleo			12.79 (8.42)			12.79 (8.42)	0.79 (0.54)
Gas Natural	0.21 (0.35)					0.21 (0.35)	0.01 (0.02)
Electricidad					3.86 (3.65)	3.86 (3.65)	0.24 (0.24)
Total	1,415.72 (1,357.20)	115.95 (115.34)	56.31 (49.99)	22.39 (21.87)	3.86 (3.65)	1,614.23 (1,548.04)	100.00 (100.00)
% por sector	87.70 (87.67)	7.18 (7.45)	3.49 (3.23)	1.39 (1.41)	0.24 (0.24)	100.00 (100.00)	

\*Nota: los datos en paréntesis son los datos registrados en 1999. Fuente: SENER 1997 y 2002.

Estudios de País (CSSP, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, mostró que en 1990 el sector transporte contribuyó con 99.576Tg equivalentes de CO<sub>2</sub>; o sea, 35.40% del total de emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte. Con la metodología actualizada 1996 del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC 1997), a solicitud nuevamente del Instituto Nacional de Ecología, se actualizaron los valores de las emisiones para los años 1990, 1992, 1994, 1996 y 1998 (Gasca *et al.* 1998). En el cuadro 2 se muestran las emisiones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en equivalentes de CO<sub>2</sub> para esos años (ver el capítulo *Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México*, de L. G. Ruiz y X. Cruz, en la sección 1).

Una característica que se presenta en cada año es la supremacía de las emisiones de CO<sub>2</sub>, aun cuando las emisiones de N<sub>2</sub>O tuvieron un incremento importante. El modo de transporte por carretera es el más importante en cuanto a las emisiones, dada su relevancia en el consumo de combustibles.

CUADRO 2. EQUIVALENTES DE CO<sub>2</sub> DEL SECTOR TRANSPORTE MEXICANO (TG DE EQUIVALENTES DE CO<sub>2</sub>)

AÑO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	TOTAL
1990	88.73	0.76	0.62	90.11
1992	95.39	0.71	1.24	97.34
1994	102.16	0.65	1.86	104.67
1996	98.61	0.59	2.17	101.37
1998	106.33	0.50	2.79	109.62

Fuente: Gasca y Cuatecontzi 2001.

*c) Impacto de la introducción de las mejoras tecnológicas durante el periodo 1990-2000*

Debido a que la flota de vehículos particulares en México está integrada por una mezcla de automóviles de tecnología americana, japonesa y europea (Gasca y Cuatecontzi 2001), el rendimiento promedio de combustible se sitúa entre los valores reportados para esas tecnologías. Así, por ejemplo, para los vehículos particulares anteriores a 1990 el rendimiento experimental

de combustible es de 9.1 km/l; este valor se encuentra entre el correspondiente a los vehículos sin control de emisiones de Estados Unidos (6.0 km/l) y el de los vehículos sin control de emisiones europeos (10.6 km/l). Los vehículos que se introdujeron al país a partir de 1991 tienen en promedio un mejor rendimiento de combustible (10.1 km/l); es decir, una mejora de 10%; lo anterior se debe a que los vehículos nuevos cuentan con tecnologías como la inyección de combustible y el encendido electrónico.

Respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub>, el impacto por el menor consumo de combustible se tradujo en una reducción de 2% (15,719 Gg) en el total de las emisiones del sector transporte para ese periodo, si se comparan los resultados con los correspondientes al escenario en donde el rendimiento de combustible se mantiene sin cambio alguno. El bajo impacto en las emisiones que tuvo la mejora en el rendimiento del combustible se explica porque la sustitución de vehículos viejos por nuevos en el parque vehicular es un proceso lento; sin embargo, el efecto en los contaminantes locales fue mayor. Se estimó que con la introducción de los convertidores catalíticos se alcanzó una reducción de 35% en las emisiones de monóxido de carbono (CO), 20% en hidrocarburos no metánicos y 8% óxidos de nitrógeno (NOx). Respecto a los gases de efecto invernadero diferentes del CO<sub>2</sub>, las reducciones fueron de 22% en las emisiones de metano, y para el caso del N<sub>2</sub>O se estimó un aumento de 18% debido a que los convertidores catalíticos aumentan las emisiones de este gas.

#### *d) Indicadores para el sector transporte mexicano*

En el periodo entre 1990 y 1996, las emisiones per cápita de CO<sub>2</sub> en el sector transporte alcanzaron un valor máximo de 1.24 Mg (1 Mg=1 tonelada) en 1990, y un valor mínimo de 1.14 Mg en 1995 debido a la crisis económica; para 1996, el valor aumentó a 1.19 Mg. Al comparar las emisiones per cápita de los sectores de transporte mexicano, estadounidense y canadiense se encuentra que el primero emite 4.8 veces menos que el estadounidense y 3.4 veces menos que el canadiense (Schipper 1997). Respecto al promedio de 26 países europeos, el transporte mexicano emite 1.5 veces menos bióxido de carbono per cápita (Samaras *et al.* 1994). En un análisis semejante, las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de Producto Interno Bruto (PIB) alcanzaron un valor promedio de 84 Mg por millón de pesos constantes de 1993, 2.4 veces menos que el estadounidense y 2 veces menos que el canadiense

(Schipper 1997). Respecto al promedio de 26 países europeos, el mexicano emite 1.4 veces menos (Samaras *et al.* 1994).

*e) Acciones para el control de la contaminación local en las principales zonas metropolitanas*

El sector transporte aporta 21% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en el país. En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), el sector transporte contribuyó con 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero en 1998, seguido por la industria con 37%, y el sector residencial y comercial con el restante 23% (CAM 1998). La suma de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el sector en las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y del valle de México representa aproximadamente 34% de las emisiones nacionales del mismo sector. El transporte de pasajeros utilizado en la frontera norte contribuye con otro 8.7%.

Lo anterior orienta sobre la importancia de mitigar las emisiones de los gases de efecto invernadero en las zonas urbanas, y al mismo tiempo de generar estrategias para controlar los problemas de la contaminación local. A continuación se enlistan diferentes medidas para controlar los contaminantes locales provenientes del sector transporte en la ZMVM. Estas medidas requirieron la participación de la industria petrolera nacional, la industria automotriz y las autoridades ambientales de la ZMVM.

- a) 1989. Se inició el Programa Hoy No Circula, el programa semestral de verificación vehicular e inicia la distribución de gasolina oxigenada en un 5% con Metil Ter-Butil Éter (MTBE).
- b) 1991. Introducción de vehículos con convertidores catalíticos de 2 vías, e introducción de una gasolina sin plomo denominada Magna-Sin.
- c) 1992. Se redujo el contenido de hidrocarburos reactivos en las gasolinas Nova y Magna-Sin.
- d) 1993. El diesel desulfurado (0.5% de azufre) fue sustituido por el Diesel Sin (0.05% de azufre). Se inició la introducción de los convertidores catalíticos de tres vías para controlar las emisiones de NOx, HC y CO.
- e) 1995. Reducción a 0.01 g/gal del contenido de plomo en la gasolina Nova. PEMEX-Refinación incorporó el sistema de recuperación de vapores en cuatro terminales de almacenamiento y distribución de gasolinas.

- f) 1997. Concluyó la distribución de gasolina Nova y se inició la venta de gasolina Magna reformulada con un contenido menor de aromáticos y olefinas.

Las medidas a y b tuvieron un impacto en la mitigación de los gases de efecto invernadero. El uso de convertidores redujo considerablemente las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos e incluso de metano, pero aumentó las emisiones de los óxidos de nitrógeno y del bióxido de carbono. En los primeros meses de la aplicación del programa *Hoy no Circula* se redujo el consumo de combustibles; posteriormente el efecto fue negativo al motivar la adquisición de un segundo vehículo por familia. Este programa actualmente ayuda para motivar la modernización del parque vehicular.

## OPCIONES FUTURAS DE MITIGACIÓN EN EL SECTOR TRANSPORTE EN EL MUNDO

Existen diversas alternativas para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte, las cuales pueden agruparse en la forma siguiente:

### *Tecnología de los vehículos*

El uso de vehículos eléctricos representa una opción viable para la disminución de gases de efecto invernadero; sin embargo, al considerar el ciclo de vida en su totalidad, los posibles beneficios relacionados con la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen en gran medida de la forma como la energía eléctrica es generada.

Los vehículos híbridos de gasolina y electricidad se introdujeron comercialmente a finales de la década pasada y tienen rendimientos de combustible superiores en 50% respecto a los rendimientos de los vehículos convencionales de cuatro pasajeros de tamaño comparable.

Otra alternativa atractiva es la utilización de vehículos de diesel, los cuales por su bajo consumo de combustible asociado a su alta relación de compresión y eficiencia, emiten sustancialmente menos bióxido de carbono que los motores de gasolina con características similares. En Europa Occidental, el consumo de diesel en vehículos ligeros de pasajeros ha tenido un incremento sostenido durante los últimos años, llegando a representar 32.3%



del mercado global europeo durante el año 2000. Francia, Alemania e Italia representan los mayores mercados en el ámbito mundial de vehículos de diesel. Este comportamiento ha sido propiciado por un mejor rendimiento de ese combustible frente a la gasolina y a las mejoras progresivas que han tenido los motores de diesel, llegando a un nivel tal de perfeccionamiento que permiten potencias y niveles sonoros similares a los motores de gasolina, pero con consumos menores de combustible hasta en 35%.

Los vehículos con propulsión con base en celdas de combustible se están desarrollando rápidamente. Su introducción estaba programada para el año 2003. Las celdas de combustible pueden ser utilizadas en otros modos de transporte como el ferrocarril, y dadas las mejoras significativas tanto del rendimiento de combustible como en la tecnología, es muy probable que se utilice en la flota vehicular de la próxima generación.

### *Combustibles alternos*

El bióxido de carbono y el vapor de agua representan más de 97% de los productos de combustión de la gasolina, el diesel, así como de los alternos como el gas natural comprimido y el gas licuado de petróleo en los vehículos. Si se comparan las altas concentraciones de vapor de agua que existen en la atmósfera, el vapor de agua producido por los procesos de combustión no parece tener un impacto significativo.

El uso de los combustibles alternos no siempre disminuye las emisiones de los gases de efecto invernadero a pesar de tener menores contenidos de carbón por unidad de energía; sin embargo, no necesariamente liberan a la atmósfera menos emisiones totales del “pozo a la rueda”, que incluyen las emisiones de la extracción del combustible alternativo o como materia prima (de ser aplicable el caso), de la energía usada en su producción, distribución y almacenamiento, y de su uso en los vehículos. El análisis del ciclo completo del combustible, algunas veces llamado el ciclo de vida del combustible, toma en cuenta todas estas emisiones. Las emisiones del ciclo de vida de un combustible varían de país a país. Los vehículos eléctricos pueden tener emisiones totales cercanas a cero cuando son recargados con electricidad generada por centrales nucleares o fuentes renovables, pero pueden tener emisiones totales más elevadas que los vehículos a gasolina si son recargados con electricidad proveniente de carboeléctricas.

Un moderado porcentaje de los combustibles alternos promete reducciones sustanciales en los gases de efecto invernadero con base en el ciclo completo del combustible, como es el caso de los alcoholes, el etanol y el metanol que son derivados de material celulósico por medio de procesos de producción avanzados de baja energía. Otros combustibles de baja emisión de gases de efecto invernadero son el biodisel y, potencialmente, el hidrógeno cuando se usa en vehículos altamente eficientes, que utilizan celdas de combustible y que se produce de fuentes renovables u otras materias primas con baja emisión de gases de efecto invernadero.

En el largo plazo, después del 2010 es probable que las emisiones de CO<sub>2</sub> tiendan a declinar debido a las mejoras esperadas en la eficiencia de los vehículos. Para aquellos combustibles que tienen una alta participación en las emisiones corriente arriba, tales como el hidrógeno y los alcoholes derivados de la biomasa, las mejoras y cambios en procesamiento del combustible pueden jugar también un importante papel. Para la mayoría de los combustibles se estima un incremento en la eficiencia de 5 a 10% en la producción y distribución de los mismos, y un incremento de 50 a 55% en la eficiencia vehicular para todos los combustibles usados en motores de combustión de tres litros. Con estas suposiciones gran parte de los combustibles, incluyendo la gasolina, emitirán la mitad o aun menos CO<sub>2</sub> respecto al ciclo de vida de los vehículos actuales.

#### *Cambio modal del transporte*

Las medidas de este tipo tendrán un efecto importante en el mediano y largo plazos; basta señalar que para movilidad en vehículos particulares, Estados Unidos poseía una media de 0.769 vehículos por habitante en 1990, mientras que en Europa este indicador era de 0.278 y en Latinoamérica de 0.083. Resulta evidente que el desarrollo económico puede ocasionar un aumento importante en el uso de los vehículos particulares en América Latina, razón por la cual se deben mejorar de manera progresiva y constante los sistemas de transporte público masivo, principalmente el sistema ferroviario.

#### *Estrategias para la sustentabilidad del sector transporte*

La mayoría de las evaluaciones de las mejoras tecnológicas en la eficiencia muestran que debido al crecimiento en la demanda en el transporte, no es suficiente la mejora en la eficiencia para evitar el crecimiento en las emisio-

nes de los gases de efecto invernadero. Los esfuerzos que se realizan en este sentido tienen efectos parciales en la reducción de emisiones, debido al incremento en las distancias recorridas causadas por la reducción en el costo del viaje por kilómetro. En las sociedades modernas se percibe al automóvil particular como un medio de libertad, movilidad y seguridad, así como un símbolo de la posición personal e identidad, además de ser uno de los productos más importantes de la economía global. Sin embargo, se ha encontrado mediante varios estudios, que la gente que vive en ciudades más compactas y más densamente pobladas, depende menos del automóvil siempre que los sistemas de transporte masivo estén ampliamente desarrollados.

Una integración de la planificación del uso de suelo, del desarrollo del transporte y del uso de incentivos, es la clave para el ahorro de energía en el subsector de transporte por carretera. Ésta es un área donde los efectos iniciales son importantes debido a que si los patrones de uso de suelo ya están establecidos, resulta muy difícil revertirlos, porque no es fácil motivar el desplazamiento de los asentamientos irregulares y dispersos hacia las áreas más compactas. Lo anterior representa una oportunidad, en particular para las economías en desarrollo, debido a que las inversiones en los sistemas de transporte masivo se recuperan en poco tiempo, por lo que los instrumentos de política económica son imprescindibles.

Los impuestos al combustible para el mejoramiento del transporte han resultado poco populares en algunos países, especialmente donde son vistos como medidas para elevar los ingresos del Estado. Los cargos por el uso de carreteras se han aceptado si se utilizan para cubrir los costos de la provisión de transporte. Varios estudios han explorado el potencial de mejorar la forma existente de recabar peajes en carretera, derechos de licencia y primas de seguro; los resultados mostraron reducciones potenciales en las emisiones de casi 10% para los países miembros de la OECD.

En México se necesita la introducción de otros modos de transporte más sustentables, como es el ferrocarril, para el manejo de grandes volúmenes de carga, particularmente en las zonas metropolitanas.

## BIBLIOGRAFÍA

CAM (Comisión Ambiental Metropolitana). 1998. *Inventario de Emisiones 1998 de la Zona Metropolitana del Valle de México*. México: Comisión Ambiental Metropolitana.

- European Union. 1994. *Concerning with Road Transport Sector*. Study Contract B93/93/B4-3102-11/000819.
- Gasca, J., D. H. Cuatecontzi y F. L. Guzmán. 1998. Impact and barriers of the new transportation emissions control technologies in Mexico. In: *17<sup>th</sup> Congress of the World Energy Council*, September 11-17, 1998. Houston, Texas.
- y D. Cuatecontzi. 2001. *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-1998*, Parte 1, Energía, Sector Transporte. Reporte para el INE. México.
- IEA (International Energy Agency)/AFIS. 1999. *Automotive Fuels for the Future*. París: IEA.
- IEA (International Energy Agency). 2001. *Saving Oil and Reducing CO<sub>2</sub> Emissions in Transport: Options & Strategies*. París: IEA, OECD.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1997. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Genova: IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. *Methodological and Technological Issues in Technology Transfer*. Working Group III. New York: IPCC.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Technical Summary of Climate Change*. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/pub/wg3spm.pdf>.
- Samaras, Z., A. Andrias y K.-H. Zierock. 1994. *Evaluation of European Emission Data Concerning the Road Transport Sector*. Further Development of Emission Inventories for the Road Transport Sector. Vol. I. European Union Study Contract B93/93/B4-3102-11/000819, December 1994.
- Schipper, L. 1997. People on the move goods on the go: A collision with CO<sub>2</sub> and Sustainable Transport Goals. In: *NAS Trilateral Workshop*, March 24 -26, 1997. Washington, USA.
- SENER (Secretaría de Energía). 1997. *Balance Nacional de Energía 1996*. México: Secretaría de Energía.
- . 2002. *Balance Nacional de Energía 2001*. México: Secretaría de Energía.
- UNEP (United Nations Environmental Program). 1995. *Preliminary National Inventory of Greenhouse Gas: Mexico*. Project GF / 4102 – 92 -01 (PP / 3011).

## Notas

---

\* Investigadores del Instituto Mexicano del Petróleo.

\*\* Director Ejecutivo de Investigación del Instituto Mexicano del Petróleo.

# ILUMEX: desarrollo y lecciones del primer proyecto mayor de ahorro de energía en México

*Odón de Buen Rodríguez\**

## INTRODUCCIÓN

AHORRAR ENERGÍA ES UNA clara forma de reducir las emisiones de gases de efecto de invernadero, especialmente en México, donde cerca de 75% de la energía primaria para producir la electricidad proviene de combustibles fósiles.

A su vez, ahorrar energía es, en muchos sentidos, algo muy simple, tanto como mover un interruptor o cambiar un foco. Sin embargo, para que un esfuerzo nacional de ahorro de energía tenga un impacto significativo y permanente, se requiere de millones de acciones que se apoyen de un conjunto de elementos que, integrados, hagan posibles grandes modificaciones en patrones de consumo. En particular, y desde la perspectiva del autor, lo fundamental, además de la tecnología y el financiamiento, son las instituciones, específicamente las que diseñan, implantan y operan los programas.

Estas instituciones, a su vez, requieren de un conjunto de elementos que permiten hacer exitosos los programas, como lo son la información, los protocolos y las metodologías, personal capacitado, capacidad de innovación y, quizá elemento fundamental, directivos dispuestos a tomar los riesgos de la innovación.

El caso del proyecto ILUMEX es un ejemplo muy claro de la perspectiva mencionada. De alguna manera, de no existir un claro convencimiento de los directivos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el proyecto no hubiera progresado más allá de una interesante propuesta. Sin embargo, y como se describe en este análisis, ILUMEX fue posible porque hubo un proceso que arranca con actividades de corto alcance pero que sirven de base para la toma de decisiones y el compromiso de quienes toman decisiones de gran alcance.

A continuación se hace una relatoría de estos procesos a partir de una descripción de la tecnología aplicada en ILUMEX, pasándose por los procesos institucionales previos al programa, luego describiéndose los elementos de diseño del mismo, para terminar anotándose los impactos cuantitativos de este importante proyecto.

## LAS LÁMPARAS COMPACTAS FLUORESCENTES

El uso masivo de la iluminación eléctrica tiene sus inicios a finales del siglo XIX cuando Tomás Alva Edison patenta e inicia la producción industrial de lámparas incandescentes. Estas lámparas funcionan a partir de un flujo de electricidad que atraviesa un conductor eléctrico que se calienta y llega a un estado en el que produce luz. El que esto sea posible requiere de materiales especiales en el conductor, además de que se requieren recipientes de vidrio al vacío. Esta tecnología ha predominado en el mundo desde entonces y, mientras no hubo preocupaciones sobre la fuente primaria de la energía eléctrica, no se consideraron seriamente nuevas alternativas.

Sin embargo, las alteraciones en el mercado petrolero de hace casi treinta años llevaron a redefinir muchas cuestiones en el campo de la energía y a abrir oportunidades para nuevas tecnologías de uso final. Específicamente, y por el alto consumo de energía que representa, para la iluminación se desarrollaron y entraron al mercado las llamadas lámparas compactas fluorescentes (LCF). Estas lámparas funcionan por la corriente eléctrica que fluye a través de un gas, contenido en un tubo de vidrio recubierto por dentro de material fluorescente, que tiene mucho menor resistencia eléctrica que el filamento de una lámpara incandescente y que, por lo tanto, aprovecha mucho mejor la electricidad para convertirla en luz. Estas lámparas consumen una cuarta parte de la energía que una incandescente, duran hasta diez veces más y se conectan de la misma manera que los focos. Sin embargo, por los elementos que integra, el costo de las LCFs llega a ser hasta veinte veces más que lo que una convencional, lo que hace que requieran, para su uso generalizado, de algún tipo de estímulo o programa de promoción.

## ANTECEDENTES DE ILUMEX

En México, las primeras acciones institucionales del gobierno federal para ahorrar energía ocurren simultáneamente a principios de la década de los

ochenta en la Comisión Federal de Electricidad y en Petróleos Mexicanos (PEMEX). Sin embargo, sólo los trabajos de la CFE iban orientados al usuario final de la energía. En esta perspectiva, por cerca de diez años, y dadas las limitadas capacidades económicas y técnicas con las que operaba el área de la CFE responsable del ahorro de energía, los esfuerzos se concentraron en acciones de promoción e información mediante de seminarios a lo largo y ancho del país.

## FIPATERM

En 1989 se inicia en México el primer programa de ahorro de energía del lado de la demanda con la formalización de un proyecto de aislamiento térmico de techos de casas en Mexicali, Baja California. Este programa se ha orientado, desde sus inicios, a reducir los consumos de electricidad en aire acondicionado en esa región, que es la que mayor consumo unitario tiene en nuestro país por sus condiciones climáticas en el verano. El programa ha resultado en el aislamiento de más de 60 mil viviendas y, por lo tanto, en ahorros de energía significativos.

En la lógica del presente análisis, la contribución de este programa fue el hecho de que, por primera vez, una empresa eléctrica mexicana realizó acciones “del otro lado del medidor” y se pusieron en operación mecanismos de comercialización de sistemas de ahorro de energía y de cobro de productos mediante la factura eléctrica, lo cual fue muy útil, como antecedente institucional, para la realización de ILUMEX.

## Los proyectos piloto de iluminación residencial

La iluminación es uno de los usos finales de la electricidad más importantes y significativos. En un hogar promedio en México, la electricidad utilizada para hacer funcionar focos y lámparas supera 25% del consumo total de esta forma de energía (Masera *et al.* 1991). Para el Sistema Eléctrico Nacional, la demanda que tiene la iluminación residencial es determinante de los perfiles horarios de demanda eléctrica y, dado que coinciden con —y, en términos prácticos establecen— la demanda máxima coincidente, su evolución es un factor determinante de las necesidades de inversiones del sector. Esta circunstancia fue clave para que en la CFE se considerara la posibilidad de llevar adelante programas de ahorro de energía en iluminación residencial.

Los trabajos orientados a la iluminación residencial en México se inician poco después de la puesta en operación del programa de Mexicali, y su origen se encuentra en una reunión, promovida por la Fundación Rockefeller, a la que concurrieron los fabricantes de LCF en México, la CFE y un conjunto de expertos internacionales. La reunión, que tenía el cometido de convencer a la CFE de un programa de millones de LCF, no logró su propósito, pero sí sembró la inquietud sobre las posibilidades de llevar adelante proyectos relacionados a la iluminación.

Resultado de la reunión fue la donación de varios cientos de lámparas de los fabricantes a la CFE y el inicio de una serie de proyectos que fueron construyendo las bases para un proyecto de gran escala. En estos proyectos, que ocurrieron a lo largo de dos años, se fueron demostrando, de manera secuencial, las ventajas de la tecnología para los usuarios y la CFE. Igualmente, se fue abriendo la participación de las distintas áreas de la empresa eléctrica mediante los diferentes proyectos.

De manera muy esquemática, los proyectos se pueden ubicar en las tres categorías que se enumeran y explican a continuación:

- a. Aceptación de los usuarios a la tecnología. Éste fue el propósito del primer proyecto, realizado en Hermosillo, Sonora, y en él se regalaron lámparas a los usuarios para que las utilizaran y opinaran sobre la tecnología. La respuesta fue positiva y dio luz verde para los siguientes proyectos (Blanc y De Buen 1994).
- b. Demostración de los beneficios a la red eléctrica. Con dos proyectos, en los que se regalaron lámparas a hogares en comunidades con distintos niveles sociales en Puebla y Querétaro, y con los que se comparó, para cada localidad, lo que ocurría con comunidades pares en las que no se conectan lámparas ahorradoras, se estableció que, efectivamente, las LCF reducían los picos de demanda por las noches y que, además, no reducían de manera significativa el factor de potencia, variable muy importante para las empresas eléctricas. Estas demostraciones, que involucraron a las áreas responsables de las redes de distribución de la CFE, permitieron que éstas corroboraran los impactos positivos del uso de las LCF y que, tácitamente, se adhirieran al proceso.
- c. Prueba de mecanismos de comercialización. Con los resultados de los proyectos previos, la Dirección General de la CFE aprobó la asigna-



ción de fondos para la compra de varios miles de lámparas para ser comercializadas, sin cobro de intereses, entre usuarios de la CFE. El proyecto se llevó a cabo en Valladolid, Yucatán. En un principio, el programa buscó que los usuarios compraran las lámparas en las oficinas o en tiendas de autoservicio, pero el mecanismo no funcionó y las ventas no cumplían las expectativas. El problema se resolvió con un sistema de ventas aprovechando el sistema de “aboneros”, que son vendedores que van de casa en casa promoviendo una gran variedad de productos. A su vez, se estableció el sistema de cobro de las lámparas de manera integral al proceso de cobro del servicio eléctrico.

Estos proyectos, además de ser un ejemplo de evolución cuidadosa de un programa que va de menos a más en escala y en complejidad, fueron los que permitieron establecer las bases técnicas e institucionales para poder llevar a cabo un programa de mayor escala. Los proyectos involucraron, de manera progresiva, a usuarios, a fabricantes y a diferentes áreas de la Comisión en programas de ahorro de energía que llevaron, al final de cuentas, a la instalación más de cien mil lámparas ahorradoras en hogares de seis ciudades de la República Mexicana.

## EL PROYECTO ILUMEX

Fue precisamente cuando los proyectos arriba señalados se habían cumplido que, hacia finales de 1991, el Banco Mundial (BM) identifica a México como un país candidato por sus niveles de consumo de electricidad, pero principalmente por su alta dependencia en combustibles fósiles en la generación de electricidad, a utilizar fondos del Global Environmental Facility (GEF), creado recientemente para apoyar proyectos orientados a reducir emisiones de gases de efecto invernadero. Esta iniciativa tiene eco en la CFE y propicia que se lleven a cabo una serie de actividades, sin precedente no sólo para la CFE sino también para el BM, que permiten que vaya adelante el llamado Proyecto de Uso Racional de Iluminación en México (ILUMEX).

### El proceso de diseño

Uno de los mayores retos para la realización de ILUMEX fue el que entonces no existían antecedentes de proyectos del lado de la demanda financiados

por la banca de desarrollo internacional, y que la mayor parte de su experiencia estaba relacionada, principalmente y hasta entonces, con grandes proyectos de infraestructura, de oferta energética. Esto llevó a que se tuvieran que diseñar nuevos protocolos de evaluación de proyectos que integraran los aspectos particulares de un proyecto del lado de la demanda; es decir, de un proyecto que involucra y depende, para su éxito, de las decisiones de cientos de miles de personas.

El primer paso en el proceso de diseño de ILUMEX fue, entonces, la definición de sus objetivos y alcance en función de las necesidades de México en general y de la CFE en particular. Aquí se definió que lo que a la CFE le interesaba, de manera especial, era que el proyecto apoyase la reducción de la demanda en horas pico,<sup>1</sup> que se orientase a los usuarios con mayor nivel de subsidio y que el proyecto se realizase en las dos ciudades más grandes en su territorio: Guadalajara y Monterrey. Por su parte, el BM estimó que el número de lámparas a ser comercializadas durante el proyecto sería cercano a los 1.7 millones. Estas consideraciones fueron punto de partida para el análisis de pre-viabilidad del proyecto.

Como elementos principales en el diseño del proyecto se establecieron los siguientes:

1. Estudio de mercado. Pieza fundamental en el proceso análisis de pre-viabilidad del proyecto fue la encuesta preliminar a usuarios. Esta encuesta, que se aplicó en el verano de 1992 en Guadalajara y Monterrey, permitió conocer, por un lado, las actitudes de los usuarios ante la tecnología de iluminación y, por otro lado, el número de lámparas que pudieran ser sustituidas por otras más eficientes por casa. Específicamente, la encuesta estableció el promedio de lámparas por casa (7 para Guadalajara y 11 para Monterrey), porcentajes de “puntos de luz” donde se podrían instalar LCFS (97% para Guadalajara y 87% para Monterrey), y el número de horas de uso para los puntos de luz de más uso. La encuesta confirmó, igualmente, que el estimado inicial de una meta de 1.7 millones de lámparas a sustituir era correcto. También, previo al inicio del proyecto en 1995, se llevó a cabo una investigación de la situación del mercado de las LCF.
2. Diseño del proceso de entrega de las lámparas. En el proceso de diseño de ILUMEX se estableció una estrategia con tres posibles niveles de acciones en función de la aceptación de su mercado objetivo. Los ni-

veles considerados se definieron en función del posible costo para el programa y fueron (en orden de menor a mayor costo): (a) compra en agencias de CFE, lo que requeriría que las personas interesadas fueran a estas agencias; (b) trailer móvil que llevara las lámparas a las colonias donde se ubicaba el mercado objetivo, y (c) visita casa por casa, con un mecanismo similar al establecido en la experiencia de Valladolid.

3. Análisis costo-beneficio. Con los datos de la encuesta se hizo un detallado análisis de sensibilidad que estableció la rentabilidad del proyecto desde varias perspectivas (usuario, empresa eléctrica y país), con lo cual se tomó la decisión, por los resultados positivos desde las tres perspectivas, de ir adelante con el proceso del proyecto y, por lo tanto, con la asignación de recursos (Sathaye *et al.*, 1993). Uno de los elementos en el diseño del programa que permitió un nivel aceptable de rentabilidad desde las tres perspectivas señaladas, fue que las lámparas serían adquiridas, en una compra de gran volumen, por la CFE, lo cual permitió reducir su costo y, por lo tanto, aumentar los beneficios del proyecto.

### El proceso de implantación

1. Financiamiento. El proyecto fue financiado con tres aportaciones: (1) US\$10 millones de dólares estadounidenses por parte de la CFE, (2) diez millones de dólares de donación del Global Environmental Facility, y (3) tres millones de dólares de donación por el gobierno de Noruega. El convenio para las donaciones fue firmado entre el gobierno de México, el Banco de Obras y Servicios Públicos (Banobras) y el Banco Mundial, éste último como fiduciario del GEF y administrador de la donación del GEF (Reyes 1999).
2. Integración de los equipos administrativos. Para llevar adelante el proyecto se estableció una organización de tres niveles con distintas responsabilidades (Reyes 1999).
  - a. *Comité central*. Tuvo la función de determinar y supervisar las políticas y estrategias para el proyecto y estuvo integrado por personal de la Subdirección de Distribución de la CFE.
  - b. *Unidad coordinadora del proyecto*. Esta unidad tuvo la función de coordinar y supervisar a las unidades operativas responsables del

- desarrollo del proyecto, que fueron los fideicomisos. Igualmente, integró la información requerida por BANOBRAS, el BM y el gobierno de Noruega para la evaluación de resultados y del proceso de ILUMEX.
- c. *Fideicomisos*. Para la ejecución de ILUMEX se establecieron dos fideicomisos, uno para Guadalajara y el otro para Monterrey (Filumex Jalisco y Filumex Nuevo León). En estos fideicomisos, la CFE actuó como fideicomitente y fideicomisario, mientras que la participación de BANOBRAS fue como fiduciario. Los fideicomisos se integraron por menos de 20 personas cada uno.
3. Especificaciones técnicas de las LCF. Las lámparas del proyecto fueron adquiridas por la CFE en tres licitaciones públicas internacionales. Para estas licitaciones se establecieron cuidadosamente especificaciones técnicas muy exigentes en parámetros como eficacia, distorsión de armónica, factor de potencia, temperatura e índice de rendimiento de color, y vida útil para las lámparas que sustituyeran a focos incandescentes de 60, 75 y 100 Watts (Valera, 1999). Estas especificaciones fueron probadas y certificadas por un laboratorio especializado en iluminación ubicado en el Distrito Federal.
4. Proceso de venta. El proceso de ventas de ILUMEX se inició en abril de 1995 y concluyó en diciembre de 1998. Los principales elementos en este proceso fueron los siguientes:
- a. *Venta de las lámparas*. Para la venta de las lámparas se diseñaron e instalaron, principalmente en las áreas de atención al público de las agencias de la CFE, módulos de venta específicos del proyecto. Asimismo, el proyecto fue promovido en todos los medios de comunicación.
- b. *Condiciones de venta*. Los únicos usuarios de la CFE con derecho a compra de venta de lámparas fueron los que estuvieran en tarifa doméstica y al corriente de sus pagos. Se vendieron un máximo de diez lámparas por usuario, ya sea al contado o a plazos de hasta 12 bimestres, a pagar con el recibo del servicio eléctrico. Para la entrega de las lámparas se requirió de la firma de un contrato de compra-venta entre el adquiriente y el fideicomiso.
- c. *Pago*. Los compromisos establecidos entre el usuario de la CFE y el fideicomiso fueron comunicados a la CFE para su posterior cobro por ésta. En caso de existir algún retraso o problema de pago de las LCF por parte del usuario, la CFE no interrumpía el servicio sino que

sólo se lo comunicaba al fideicomiso para que éste llevase adelante las acciones legales correspondientes.

### La evaluación

El proceso del proyecto ILUMEX implicó un análisis preciso de diversos impactos (económicos, ambientales y de mercado) de un programa de ahorro de energía, lo cual ocurrió por primera vez en México y en el propio Banco Mundial (De Buen y Masera, 1994). Para esto fue necesario recabar y analizar información diversa:

- a. Encuestas a usuarios. Para evaluar el impacto de ILUMEX en la transformación del mercado de lámparas y en el reconocimiento y aceptación de las LCF por los usuarios, realizaron encuestas entre éstos, participantes y no-participantes en el proyecto.
- b. Mediciones eléctricas en casas. Para establecer el ahorro de energía y el impacto sobre la demanda en *hora pico* del proyecto, se llevaron a cabo dos campañas de medición de tiempo de uso y de factor de coincidencia de las LCF en las propias casas de los usuarios en 1997 y en 1998.
- c. Auditoría de certificación y verificación de impacto ambiental. Dado que el GEF y el gobierno Noruego hacen donaciones en función de las reducciones estimadas de gases de efecto de invernadero, la evaluación del impacto de ILUMEX en este aspecto fue un aspecto muy importante. Para esto se hizo una extensa auditoría que incluyó comentarios al diseño y operación del proyecto para establecer el grado de replicabilidad y de sustentabilidad de proyectos de este tipo (Telnes, 1999). Igualmente, por ser un punto clave en proyectos realizados en el marco de los mecanismos considerados dentro del Protocolo de Kioto, se calcularon líneas base. Esta auditoría la llevó a cabo una empresa noruega.

### Los resultados

El proyecto ILUMEX logró cumplir con la mayor parte de las expectativas de quienes lo diseñaron y operaron (Vargas 1999).

1. Lámparas vendidas. Por medio de ILUMEX se vendieron, de abril de 1995 a diciembre de 1988, 2.45 millones de LCF (1.31 millones en Guadalajara y 1.15 millones en Monterrey), superando ampliamente las expectativas de venta definidas en el proceso de diseño del proyecto.
2. Impacto en la red eléctrica. Se logró un ahorro de energía eléctrica por 302 GWh y se evitó una demanda asociada por 56 MW.
3. Impacto ambiental. Se evitó la emisión de 233 miles de toneladas de CO<sub>2</sub> en función de la mezcla de generación de electricidad en los puntos donde se ahorró la energía con el uso de las LCF.

## CONCLUSIONES

Como hemos expuesto, el llevar adelante proyectos que permitan reducir la emisión de gases de efecto de invernadero requiere no sólo de financiamiento sino también de desarrollo institucional y de procesos técnicos complejos. Para el caso del proyecto ILUMEX se requirió, primero, de un proceso evolutivo al interior de la CFE, en donde se desarrollaron y apropiaron protocolos y metodologías nuevas para atender a sus usuarios en actividades más allá del medidor de consumo eléctrico. Igualmente, por parte del Banco Mundial se tuvieron que desarrollar métodos nuevos de diseño y evaluación de proyectos. Además, el proyecto requirió del diseño e implantación de estructuras organizacionales para la toma de decisiones y operación del mismo.

En general, también se desarrollaron y aplicaron estrategias de mercadotecnia, mecanismos de venta, sistemas de control y seguimiento de venta y pago de equipos. Además, el proyecto requirió del diseño y aplicación de encuestas, de mediciones puntuales, de pruebas de laboratorio y de algoritmos de cuantificación de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Además de los resultados concretos de ILUMEX, la experiencia y los instrumentos establecidos por medio del proyecto han sido de gran valor para proyectos posteriores en México y en el mundo. Específicamente, los mecanismos establecidos en ILUMEX fueron adoptados en México por el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE), el cual no sólo ha continuado la labor de promoción y venta de la lámparas compactas fluorescentes, sino que también ha diseñado e implantado, con gran éxito, programas de incentivos para equipos de uso comercial e industrial. A su vez, ILUMEX ha sido modelo para otros proyectos similares del GEF en varias partes del mundo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Blanc, A. y O. De Buen. 1994. Residential Lighting Efficiency in Mexico: The Road to ILUMEX. En: ACEEE *1994 Summer study on energy efficiency in buildings*, ACEEE, septiembre de 1994. Asilomar, California.
- De Buen, O. y O. Masera. 1994. Evaluation of the Global Environmental Facility-The Case of ILUMEX, Mexico. Pp.116-121. En: E. Bowles I. y G. Prickett. *Reframing the Green Window: An Analysis of the GEF Pilot Phase Approach to Biodiversity and Global Warming and Recommendations for the Operational Phase, Appendix*. Washington, D.C.: Conservation International and Natural Resources Defense Council.
- Masera, O., O. de Buen y R. Friedmann. 1991. Consumo Residencial de Energía en México: Estructura, Impactos Ambientales y Potencial de Ahorro. En: *Primer Encuentro Sobre Energía y Medio Ambiente en el Sector Residencial Mexicano*, UCB-UNAM, diciembre de 1991. México D.F.
- Reyes, B. 1999. Estudios de Mercado, Guías de Operación y Metas del Proyecto ILUMEX. En: *Memoria Técnica del Seminario Internacional ILUMEX*. México: Comisión Federal de Electricidad.
- Sathaye, J., R. Friedmann, S. Meyers, O. De Buen, A. Gadgil, E. Varegas y R. Saucedo. 1993. Economic Analysis of ILUMEX, a Project to Promote Energy-Efficient Residential Lighting in Mexico. *Energy Policy*.
- Telnes, E. 1999. La Auditoría de Certificación y Verificación. ILUMEX, Concepto y Metodología. En: *Memoria Técnica del Seminario Internacional ILUMEX*. México: Comisión Federal de Electricidad.
- Valera, A. 1999. Características Técnicas para las Lámparas Fluorescentes del Proyecto ILUMEX en el Sector Doméstico. En: *Memoria Técnica del Seminario Internacional ILUMEX*. México: Comisión Federal de Electricidad.
- Vargas, E. 1999. El Proyecto ILUMEX: Una Visión General. En: *Memoria Técnica del Seminario Internacional ILUMEX*. México: Comisión Federal de Electricidad.

## Notas

---

\* Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.

1. Es el momento del día en que un sistema eléctrico tiene la mayor demanda; es decir, cuando el mayor número de equipos está prendido y exigiendo electricidad de la red eléctrica.





# Metodologías para calcular el coeficiente de emisión adecuado para determinar las reducciones de gases efecto invernadero (GEI) atribuibles a proyectos de eficiencia energética y energías renovables

*Oscar Vázquez Martínez\**  
*y Beatriz Del Valle Cárdenas\*\**

## ANTECEDENTES

Existe un creciente interés en el medio por conocer las bases para calcular los beneficios (mitigación de gases) que aporta la realización de los proyectos de eficiencia energética y de energías renovables (EE/ER), con los que se logra mitigar los GEI. Este interés se debe a un fuerte desarrollo internacional de acciones y estructuras para fomentar y registrar este tipo de proyectos. Además existen especulaciones que tienden a considerar valores altos en los precios de la tonelada de CO<sub>2</sub> evitada en un futuro mercado de emisiones, lo que significa que la rentabilidad de un proyecto podría mejorarse a partir del tipo de bonos o incentivos económicos derivados de la venta de las reducciones de GEI. Son precisamente estas cuestiones financieras las que vuelven imprescindible sentar las bases para evaluar las emisiones evitadas. La metodología (o el conjunto de metodologías) de evaluación enfrenta el reto de cumplir con los siguientes requerimientos: debe ser tan sencilla y transparente que brinde confianza a los usuarios; debe ser tan completa como para considerar la diversidad existente entre los proyectos de EE/ER y debe, además, ser un reflejo fiel de la realidad del Sistema Eléctrico Nacional y de los acuerdos internacionales sobre el tema.

De hecho, la experiencia obtenida en los últimos años, durante los cuales algunas instituciones nacionales adoptaron diferentes métodos para cuantificar la reducción de los GEI, puso en evidencia situaciones de gran relevancia: por un lado se lograba satisfacer las necesidades particulares de estas instituciones, pero, por el otro, la evaluación de un mismo proyecto con diferentes métodos arrojaba diferencias lo suficientemente significativas como para empezar a cuestionar el valor de los proyectos y, en consecuencia, a restar atención a su promoción y puesta en funcionamiento. Esta preocupación llevó a la Asociación de Técnicos y Profesionistas en Aplicación Energética (ATPAE) a asumir la iniciativa de proponer una metodología única y congruente para calcular el coeficiente de emisión eléctrico (CEE) adecuado que permitiera determinar las reducciones de GEI generadas por los proyectos de EE/ER que tienen efecto en el sector eléctrico en México.

El cálculo de los CEE para proyectos de eficiencia energética y energías renovables es complicado, tanto por las características del Sistema Eléctrico Nacional como por todos los aspectos que deben tomarse en cuenta; por ejemplo: i) el sitio donde se obtienen los ahorros, ii) el tipo de plantas de generación del sistema eléctrico que se desplazan, y iii) las repercusiones que provocan las pérdidas del sistema. Se juzgó entonces necesario llevar a cabo un estudio que permitiera proponer un mecanismo para establecer los CEE adecuados para México.

El uso de esta metodología única y consistente traerá diferentes beneficios: hará más transparentes y congruentes los cálculos de reducción de emisiones de GEI, lo que permitirá una mejor comparación y una mayor competitividad entre proyectos; reducirá los costos de gestión de la preparación de éstos; posicionará a México como un país preparado para desarrollarlos; y promoverá la implantación de proyectos de eficiencia energética y de energías renovables.

En este trabajo se presenta un resumen de los estudios realizados por la ATPAE para fundamentar la selección del coeficiente de emisión que mejor aplique en México para los proyectos de EE/ER.

## COEFICIENTES DE EMISIÓN DE GEI ELÉCTRICOS (CEE)

El CEE proporciona la cantidad en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes de los tres principales GEI (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) que se logran reducir o evitar por cada MWh generado o evitado, y es la base de la reducción de las emisiones de GEI atribuibles a la instrumentación de los proyectos de ahorro de energía

eléctrica, energías renovables y cogeneración, que impactan en la generación de energía eléctrica.

## METODOLOGÍAS EVALUADAS

Se consideraron tres categorías de metodologías para calcular los CEE que ya fueron reconocidas en el ámbito internacional como las mejores opciones para este tipo de proyectos; de estas metodologías se derivan seis coeficientes de emisión que se describen a continuación:

### Promedio del sistema

Considera la información promedio de todas o de algún tipo particular de plantas de generación del sistema eléctrico. Con esta metodología se definieron los siguientes coeficientes de emisión:

*CEE-Todas:* Toma en cuenta el promedio de todas las plantas del parque de generación de energía eléctrica que componen el sistema.

*CEE-Termoeléctricas:* Considera el promedio únicamente de las plantas termoeléctricas que usan combustibles fósiles.

### Operación marginal

Esta metodología considera las plantas marginales, que son las primeras en verse afectadas por las variaciones en la demanda de energía. El coeficiente de emisión de GEI eléctrico obtenido al aplicar esta metodología fue:

*CEE-Marginales:* Utiliza las plantas incluidas dentro de la categoría de marginales.

### Prospectiva de plantas:

Se instrumenta a partir de la información sobre las plantas adicionales, cuya construcción está prevista para el futuro. Los coeficientes de emisión obtenidos con esta metodología fueron:

*CEE-Prospectiva-Todas*: Incluye las plantas consideradas en la *Prospectiva del Sistema Eléctrico Nacional* (SEN) publicada anualmente por la Secretaría de Energía (SENER).

*CEE-Prospectiva-Termoeléctricas*: Sólo considera las plantas termoeléctricas que usan combustibles fósiles incluidas en la prospectiva del SEN.

*CEE-5 Recientes*: Se evalúa con las últimas cinco plantas instaladas en un sistema eléctrico, y representa una aproximación a la metodología de prospectiva de plantas sin usar datos proyectados: se calcula con cifras históricas conocidas de estas últimas plantas.

## ANÁLISIS REALIZADOS

Para evaluar tanto los puntos fuertes como los débiles de las metodologías consideradas y los coeficientes obtenidos, se realizaron dos tipos de análisis. El primero fue un *análisis cuantitativo* que consistió en comparar los valores de los diferentes CEE calculados y determinar qué coeficientes eran más precisos de acuerdo con el funcionamiento actual y futuro del SEN. Para ello se consideraron varios elementos, como la corrida de un modelo de despacho con proyecciones a 10 años,<sup>1</sup> la variación de los resultados por los cuatro sistemas del SEN (Sistema Interconectado, Noroeste, Baja California y Baja California Sur), y la influencia de las pérdidas por transmisión y distribución. Por otra parte, se realizó un *análisis cualitativo* para determinar aspectos importantes de los coeficientes que están más relacionados con cuestiones prácticas. En particular, se evaluaron los seis CEE respecto a los siguientes criterios: disponibilidad de la información, exactitud, costo, transparencia y congruencia internacional. Estos análisis llevaron a la selección de los coeficientes recomendados.

## COEFICIENTE DE EMISIÓN SELECCIONADO

De acuerdo con los análisis técnicos cuantitativos y cualitativos en el estudio aquí realizado, el CEE que mejor representa la reducción de emisiones es un Híbrido que contenga a la vez las características de las plantas actuales del sistema eléctrico (parque de generación actual), y las de las plantas nuevas a instalar (prospectiva de plantas). Los análisis muestran que el impacto sobre

las plantas actuales está mejor representado por el CEE-Marginales. Sin embargo, el CEE-Termoeléctricas ofrece una excelente aproximación numérica al CEE-Marginales y cuenta con una alta transparencia y una mayor facilidad de cálculo; además, el CEE-Termoeléctricas presenta una diferencia respecto al CEE-Marginales inferior a 1% para el Sistema Interconectado y Noroeste, y de 7.8% para el Sistema Baja California Sur. El impacto sobre las plantas futuras está mejor representado por el CEE-Prospectiva-Todas, el cual se utilizó para proyectar a años futuros. Sin embargo, debido a que este coeficiente se basa en proyecciones, utilizando en la mayoría de los casos datos estimados, el impacto se puede aproximar con buena precisión con datos históricos fácilmente disponibles, según lo demostrado en este estudio. Los análisis apoyan la recomendación de tomar como aproximación las últimas 5 plantas instaladas en el sistema eléctrico (CEE-5 Recientes) para representar el efecto de la prospectiva, de acuerdo con los lineamientos internacionales. Entonces, para llegar a una aproximación simple y clara, que también está fundamentada en lineamientos internacionales, el CEE-Híbrido recomendado se compone de dos partes iguales (50% / 50%) de los coeficientes que representan mejor el impacto total en el Sistema Eléctrico (CEE-Termoeléctricas y CEE-5 Recientes).

El cuadro 1 presenta los CEE-Híbridos recomendados para proyectos en los diferentes sistemas del Sistema Eléctrico Nacional,<sup>2</sup> así como un promedio nacional. Los valores que se presentan son para los años 1995 a 2001, sin embargo es el año 2001 el último año para el cual se tiene información histórica

CUADRO 1. VALORES DE LOS CEE RECOMENDADOS PARA PROYECTOS PEQUEÑOS Y GRANDES, 2001

CEE-HÍBRIDO* (tCO <sub>2</sub> EQ. / MWH), DATOS HISTÓRICOS 1995-2001					
AÑO	SISTEMA INTERCONECTADO	SISTEMA NOROESTE	SISTEMA BAJA CALIFORNIA	SISTEMA BAJA CALIFORNIA SUR	TODO EL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL
1995	0.6341	0.6911	0.6673	0.7810	0.6273
1997	0.6317	0.6171	0.6810	0.7877	0.6263
1998	0.6401	0.6029	0.6913	0.8228	0.6332
1999	0.6378	0.6247	0.7029	0.8172	0.6301
2000	0.6380	0.6244	0.6627	0.8232	0.6612
2001	0.6521	0.6157	0.6029	0.8085	0.6539

\*CEE-Híbrido: 50% CEE-Termoeléctricas + 50% CEE- 5 Recientes.

editada de manera oficial. Conforme se publiquen datos más recientes, se recomienda actualizar cada año los valores del CEE-Híbrido.<sup>3</sup> También se sugiere aplicar el coeficiente del 2001 a proyectos instrumentados desde ese año hasta que se publiquen nuevos CEE basados en datos más recientes.

## CONGRUENCIA INTERNACIONAL

Aunque se tomaron en cuenta las directivas internacionales donde se establece la separación entre proyectos pequeños y grandes,<sup>4</sup> cuyas definiciones son acuerdos tomados por la Junta Ejecutiva del Mecanismo de Desarrollo Limpio, MDL (ver el capítulo *Los mecanismos del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio Climático*, de A. Guzmán, I. Laguna y J. Martínez, en la sección II), y que corresponden a las que se acordaron previamente en la Séptima Conferencia de las Partes (COP-7), de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, llevada a cabo en Marrakech, Marruecos, en el año 2001. Los análisis sugirieron que se utilice este mismo CEE-Híbrido para todos los proyectos en México, independientemente de su tamaño. El CEE-Híbrido recomendado aquí se basa en datos fácilmente disponibles, tiene un bajo costo de estimación, y cuenta con una transparencia alta. Además:

- Para proyectos pequeños, este coeficiente coincide con una de las opciones ya aprobadas por el Panel de Metodologías del MDL, por lo que su uso ya tiene el consentimiento de la Junta Ejecutiva.
- Para proyectos grandes, este estudio demuestra que el coeficiente híbrido cumple con el criterio deseado de proporcionar un valor conservador de las emisiones evitadas. Este conservadurismo se basa en dos elementos. Primero, el componente del CEE-Híbrido que representa el impacto sobre las plantas generadoras existentes (CEE-Termoeléctricas). Segundo, México continúa la transición hacia plantas generadoras de electricidad relativamente menos contaminantes, como son las centrales de ciclo combinado de gas natural. Por lo tanto, el componente del CEE-Híbrido que representa el impacto sobre las plantas a construir (CEE-5 Recientes) representa un valor comparable pero conservador a las tecnologías cada vez más limpias que todavía usan combustibles fósiles.

## PERIODO DE APLICACIÓN DE LOS COEFICIENTE DE EMISIÓN

La COP-7 definió dos opciones para los periodos de acreditación de las reducciones de emisiones de un proyecto. En la primera se establece que el CEE permanece constante por periodos de hasta siete años durante la vida útil del proyecto, y que puede renovarse por dos periodos adicionales de máximo siete años cada uno hasta terminar la vida útil del proyecto, se utiliza el CEE calificado en el año en que empieza cada periodo (periodo de acreditación renovable, según el documento de diseño de proyectos del MDL). Para la segunda opción, se puede usar un solo coeficiente por los primeros 10 años del proyecto. En caso de optar por la primera opción, en este trabajo se sugiere aplicar a cada proyecto un coeficiente constante para cada periodo de siete años; el CEE recomendado es el publicado más recientemente; por ejemplo en este año (2003) el CEE más reciente es el del 2001, y es el que se aplicaría a un proyecto desarrollado hasta ahora (julio del 2003).

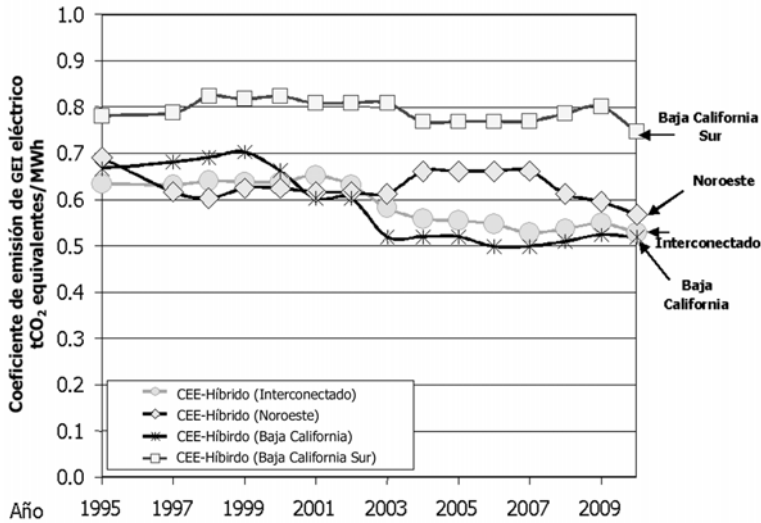
## PROYECCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE EMISIÓN PARA EL PERIODO 2002-2010

Para entender mejor el comportamiento de los coeficientes de emisión a lo largo de los años, se evaluaron los valores del CEE-Híbrido desde el año 1995 hasta el 2010, y se aprovecharon los resultados de las corridas del modelo de despacho. Para los años 1995 al 2001 se utiliza el CEE-5 Recientes, para calcular el CEE-Híbrido, mientras que para los años 2002-2010 se utiliza el CEE-Prospectiva-Todas, ya que los datos de las últimas 5 plantas instaladas no existen (gráfica 1).

## COEFICIENTES DE EMISIÓN POR BLOQUE HORARIO

Adicional al análisis realizado de los coeficientes de emisión en promedio, se realizó un análisis por bloque horario para los tres horarios tarifarios existentes en México: base, intermedia y punta. El análisis se aplicó a las plantas existentes en el sistema, y en particular a los coeficientes generados mediante la metodología de operación marginal (CEE-Marginales) usando las corridas del modelo de despacho para proyectar 10 años hacia el futuro. El análisis indicó que en promedio para el periodo 2001-2010, el CEE-Marginales (punta) es 9.8% mayor al CEE-Marginales (promedio), el CEE-Marginales (intermedia) es 4.8% mayor al promedio, y el CEE-Marginales (base) es 13.4%

GRÁFICA 1. PROYECCIONES DE LOS CEE-HÍBRIDO RECOMENDADOS  
HASTA EL AÑO 2010



menor que el promedio. Se considera que estos valores (cuadro 2) pueden usarse como factores para ajustar el CEE-Híbrido por bloque horario para reflejar de manera más precisa las emisiones evitadas durante estos periodos.<sup>5</sup>

Es importante recalcar que la parte horaria de la metodología es opcional. Sin embargo, esta opción ha surgido por inquietudes en el medio en México, y ya que se tienen datos fiables en este sentido, se pone a la disposición del usuario de la metodología, con el interés de que lo aproveche. En el

CUADRO 2. FACTORES DE AJUSTE DE COEFICIENTES DE EMISIÓN PROMEDIO A COEFICIENTES DE EMISIÓN POR BLOQUE HORARIO

BLOQUE HORARIO	FACTORES DE AJUSTE*
Horario base	0.866 ó (1-0.134)
Horario intermedio	1.048
Horario punta	1.098

\*Multiplicar el CEE-Híbrido (promedio) por el factor de ajuste para trasladarlo a los diferentes bloques horario; los factores se consideran aplicables a los CEE-Híbridos del 2001 a 2005.



CUADRO 3. EJEMPLO DEL CEE-HÍBRIDO 2001 POR BLOQUE HORARIO

SISTEMA	CEE-HÍBRIDO* (TCO <sub>2</sub> EQ./MWH), 2001			
	PROMEDIO	HORARIO BASE	HORARIO INTERMEDIA	HORARIO PUNTA
Interconectado	0.6521	0.5647	0.6834	0.7160
Noroeste	0.6157	0.5332	0.6453	0.6760
Baja California	0.6029	0.5221	0.6318	0.6620
Baja California Sur	0.8085	0.7002	0.8473	0.8877
Promedio Nacional	0.6539	0.5663	0.6853	0.7180

\*CEE-Híbrido: 50% CEE-Termoeléctricas + 50% CEE-5 Recientes.

cuadro 3 se presentan los resultados de los CEE por bloque horario al aplicarles los factores de ajuste, presentados en el cuadro 2, a los CEE promedio.

## CONCLUSIONES

Los resultados presentados aquí muestran la sencillez con la que se pueden aplicar los coeficientes desarrollados y recomendados. También vale la pena resaltar que el coeficiente recomendado (CEE-Híbrido) es conservador (resulta en reducciones de emisiones menores) debido a que el elemento referente a plantas existentes (CEE-Termoeléctricas) es inferior a los coeficientes calculados mediante modelos de despacho (CEE-Marginales), y el elemento referente a plantas futuras (CEE-5 Recientes) refleja la transición en México hacia plantas menos contaminantes. Este conservadurismo es deseable, ya que asegura que no se estarían sobreestimando las emisiones evitadas, lo cual es consistente con el enfoque del Panel de Metodologías del MDL. Esto debería agilizar la aprobación de la metodología recomendada en este estudio y de los proyectos que la utilizan. En resumen, la ventaja de los CEE recomendados es que representan una buena aproximación a la realidad; del lado conservador, son fáciles de aplicar, y son relativamente fáciles de calcular. No obstante, los desarrolladores de grandes proyectos podrían elaborar sus propios coeficientes con cálculos más detallados y modelos de despacho adicionales si consideran que tal esfuerzo y costo esté justificado por el tamaño o importancia de sus proyectos. En tal caso, los análisis desarrollados en este trabajo podrían servir como apoyo o guía adicional.

Los resultados finales presentados aquí se apegan a las recomendaciones de la Junta Ejecutiva del MDL respecto a los CEE que se deben aplicar a los

proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio. Cabe enfatizar que para proyectos grandes esta metodología se tiene que someter a la consideración del Panel de Metodologías del MDL para su aprobación, y que esta sumisión tiene que hacerse junto con la presentación de un proyecto, por medio de un Documento de Diseño de un Proyecto MDL (CDM Project Design Document, PDD), siguiendo los lineamientos del Panel de Metodologías del MDL. De igual manera se requiere someter a la consideración del Panel un proyecto pequeño o grande en el cual se quisieran aprovechar los CEE por bloque horario.

## BIBLIOGRAFÍA

- ATPAE (Asociación de Técnicos y Profesionistas en Aplicación Energética). 2002. *¿Cómo acreditar la reducción de emisiones de GEI?: Experiencia Internacional*. PA Consulting Group, Tellus Institute, Consultoría y Servicios en Tecnologías Eficientes, S.A. de C.V.
- . 2002. *Pronóstico de Plantas Marginales: Modelaje*. PA Consulting Group, Consultoría y Servicios en Tecnologías Eficientes, S.A. de C.V.
- . 2003. Justificación para la Selección de la Metodología Versión 4.1. Proyecto: *Metodologías para Seleccionar el Coeficiente de Emisión Adecuado para Determinar las Reducciones de GEI Atribuibles a Proyectos de Eficiencia Energética y Energías Renovables*. PA Consulting Group, Tellus Institute, Consultoría y Servicios en Tecnologías Eficientes, S.A. de C.V.

## Notas

---

- \* Gobierno del Distrito Federal – Secretaría del Medio Ambiente. Comité de Energía y Medio Ambiente de la ATPAE.
- \*\* Consultoría y Servicios en Tecnologías Eficientes S.A. de C.V. Comité de Energía y Medio Ambiente de la ATPAE.
1. *Pronóstico de Plantas Marginales: Modelaje*, ATPAE, PA Consulting Group, Consultoría y Servicios en Tecnologías Eficientes S.A. de C.V., Septiembre del 2002.
  2. El Sistema Noroeste toma en cuenta a los estados de Sonora y Sinaloa; el Sistema Baja California al estado del mismo nombre; el sistema Baja California Sur a este mismo estado; y el Sistema Interconectado toma en cuenta al resto de los estados de la República Mexicana.

3. La Comisión Federal de Electricidad generalmente publica los datos del año anterior necesarios para poder actualizar los coeficientes de emisión en el mes de junio o julio de cada año, así que los nuevos coeficientes podrían estar listos a partir de agosto de cada año.
4. De acuerdo con estos lineamientos, se consideran como proyectos “pequeños” los de ahorro de energía eléctrica y cogeneración que obtienen ahorros menores o iguales a 15 GWh/año, mientras que para la nueva capacidad instalada como en el caso de energías renovables, se consideran como “pequeños” cuando la capacidad instalada es menor o igual a 15 MW. Cuando rebasan estas cifras, los proyectos se denominan “grandes”.
5. Se considera además que estos factores son válidos para los coeficientes de emisión evaluados en el año 2001, y por un periodo de 5 años. Es decir, se podrían aplicar hasta los coeficientes actualizados al año 2005. Para aplicarlos a los años posteriores se recomienda actualizarlos, mediante un análisis similar al descrito en este trabajo.



# Mercado interno de permisos de emisiones de carbono.

## Estudio de caso, PEMEX

*Salvador Gómez Avila\**

### ANTECEDENTES

LAS ACCIONES PARA CONTRIBUIR al control del cambio climático global fueron iniciadas en Petróleos Mexicanos desde 1995, año en que se publicó el primer inventario de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional y en el que la empresa participó de manera decidida, presentando sus estimaciones con base en los consumos totales de combustible.

En 1999, con apoyo de la SEMARNAT y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), se llevó a cabo un taller con especialistas del más alto nivel del sector académico nacional e investigadores y empresarios internacionales, con la finalidad de introducir el tema en los niveles ejecutivos de la empresa y preparar a los profesionistas encargados de las áreas de planeación, operación y protección ambiental de las cuatro subsidiarias y del corporativo de Petróleos Mexicanos.

En la actualidad, en coordinación con las autoridades de Energía y de Medio Ambiente y organismos internacionales como la ONU y la Asociación Regional de Compañías de Petróleo y Gas Natural en América Latina y el Caribe (ARPEL), PEMEX ha venido profundizando en el análisis de este fenómeno y sus impactos en las condiciones de vida de las generaciones actual y futura, así como el papel de la industria petrolera en su prevención y control.

Nuestro país se ha distinguido por el apoyo que ha brindado a la ratificación del Protocolo de Kioto, y a la futura instrumentación de los mecanismos de flexibilidad —Implementación Conjunta, Mecanismo de Desarrollo Limpio y Comercio de Emisiones— diseñados para facilitar el cumplimiento de las metas de reducción de los países Anexo I (ver el capí-

tulo *Los mecanismos flexibles del protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de Guzmán A., I. Laguna y J. Martínez, en la sección II). En la industria petrolera mundial, PEMEX ha venido destacando por las acciones que realiza para contribuir al combate del cambio climático.

La participación de PEMEX en el Mecanismo de Desarrollo Limpio, además de constituir un medio para el logro de sus metas ambientales y de desarrollo sustentable, facilitará el acceso a tecnología y fuentes de ingresos establecidos en el Protocolo de Kioto, como producto de la comercialización de los certificados producidos por sus reducciones de CO<sub>2</sub>.

México contribuye con 1.6% de las emisiones de GEI mundiales y se ubica entre los primeros quince países generadores de este contaminante (ver el capítulo *Los principales emisores, emisiones históricas*, de J. L. Arvizu, en la sección I). Durante el año 2003, PEMEX emitió 39.6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, equivalentes a cerca de 9% de bióxido de carbono generado por nuestro país.

Nuestra empresa es un importante consumidor de hidrocarburos en el país, pero por medio de una serie de acciones concretas consideradas en el Sistema Integral de Administración de la Seguridad y Protección Ambiental (SIASPA), como el Programa Institucional de Ecoeficiencia, que incluye el de Ahorro de Energía, de Agua y Producción más Limpia, ha venido reduciendo de manera consistente sus emisiones en el año 2000, 2001 y 2002, aunque en el 2003 se registró un incremento de 7.2% en las emisiones de CO<sub>2</sub>, al pasar de 36.9 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en el 2002 a 39.6 millones en el 2003.

Este aumento en las emisiones de CO<sub>2</sub> se debió al crecimiento en la producción, sustitución de gas natural por combustóleo en las Refinerías y retrasos en la última etapa del proyecto de compresión de gas en plataformas marinas de PEMEX Exploración y Producción y a la entrada en operación de plantas en el proceso de reconfiguración de refinerías.

PEMEX Refinación tuvo las emisiones más altas de CO<sub>2</sub> durante 2003 con 16.1 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, equivalentes a 40.7% del volumen total. PEMEX Exploración y Producción emitió 11.5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, correspondiendo a 29.1% del global emitido en PEMEX. De las emisiones de GEI, típicamente 72% se produce en equipos de combustión, 23% en quemadores de campo y el restante 5% en campos y plantas de proceso.

Las áreas de oportunidad para reducir nuestras emisiones de CO<sub>2</sub> se ubican en los proyectos de eficiencia energética, cogeneración, sustitución de combustibles, control de emisiones fugitivas, compresión de gas, usos

alternativos y reinyección de CO<sub>2</sub>, así como en el desarrollo de proyectos forestales para captura de carbono.

A la fecha, PEMEX ha tomado diversas medidas que contribuyen a la reducción de CO<sub>2</sub>, entre las que destacan las siguientes:

- Se inició la cuantificación de emisiones desde 1997 y el establecimiento de metas de reducción a partir de 1999, por ser este gas el más importante en términos de volumen; posteriormente se agregarán los que por sus efectos sigan en importancia, como el metano.
- Se creó la Red de Ahorro de Energía, y a partir de julio de 1999 se dio inicio a las campañas SIASPA de Ahorro de Energía y Protección Ambiental con buenos resultados económicos y del medio ambiente. Como consecuencia, a partir de 2001 se cuenta con una Campaña Permanente de Uso Eficiente y Ahorro de Energía.
- Siguiendo la premisa que indica que para controlar hay que medir y para un rendimiento de cuentas transparente, a partir de 1999 PEMEX inició la publicación de su Informe de Seguridad, Salud y Medio Ambiente, ahora Informe Anual de Desarrollo Sustentable.
- Para fortalecer su capacidad en la identificación de proyectos de ahorro de energía, durante 2001 se inició un programa para la formación de especialistas en auditorías energético-ambientales.
- Con el propósito de elevar la calidad de la información, mejorar sus procesos de captura y procesamiento, ya que es utilizada para elaborar los reportes institucionales y como insumo para las operaciones del mercado, se inició en el mismo año la implantación del Subsistema de Información de Seguridad Industrial y Protección Ambiental (SISPA) en todos los centros de trabajo de la empresa.

## EL MERCADO INTERNO DE PERMISOS DE EMISIONES DE CARBONO

Como se mencionó anteriormente, el esquema considerado del Protocolo de Kioto en el que Petróleos Mexicanos participará es el Mecanismo de Desarrollo Limpio.

PEMEX inició la operación del mercado interno de permisos de emisiones de carbono a partir de junio de 2001, en cuyo diseño e implantación se ha contado con el apoyo de Environmental Defense, una organización no-gubernamental con experiencia en el desarrollo de estos sistemas.

Participan 25 Unidades de Negocios (UN): las cuatro regiones de PEMEX Exploración y Producción, las seis refinerías de PEMEX Refinación, siete complejos procesadores de gas de PEMEX Gas y Petroquímica Básica, y ocho complejos petroquímicos de PEMEX Petroquímica. Por su parte, la Auditoría Corporativa de Protección Ambiental coordina el desarrollo y operación del Mercado.

Si bien otras empresas petroleras de clase mundial ya cuentan con este mecanismo, cabe mencionar que PEMEX se ubica a la vanguardia en este terreno, al ser una de las primeras empresas en el mundo que cuenta de forma voluntaria con un mercado de este tipo.

Mediante este mecanismo se busca estimular la competencia entre sus subsidiarias para el desarrollo de prácticas operacionales y proyectos costo-efectivos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, además de adquirir la experiencia empresarial necesaria para participar en futuros mercados globales. Con la implantación del Mercado se busca también incorporar el concepto ambiental en los procesos de planeación, presupuesto y operación de Petróleos Mexicanos.

La implantación del Mercado Interno de Permisos fue programada en dos etapas:

Fase 1. De corto plazo, comprende del año 2001 al 2003. Tiene como meta el reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en 1% respecto a las registradas en 1999. Durante esta fase de aprendizaje y desarrollo, se trabajó en los conceptos básicos del sistema, así como en las reglas de operación y en la plataforma electrónica para las operaciones en tiempo real de las transacciones comerciales del Mercado, denominado Sistema de Registro de Transacciones (SRT).

Este sistema está en la Intranet de PEMEX, en el sitio: [www.dcsipa.pemex.com/carbono](http://www.dcsipa.pemex.com/carbono); en el mismo se pueden consultar los antecedentes y las reglas de operación del Mercado, así como los sitios de interés relacionados con el tema del cambio climático.

El SRT es un mercado ciego, es decir, las transacciones se realizan sin identificar la UN compradora o vendedora, con lo que se reduce la posibilidad de prácticas comerciales desleales.

El funcionamiento del Mercado para el años 2003 presentó los siguientes resultados:





Figura 1. Portada del Sistema de Registro de Transacciones.

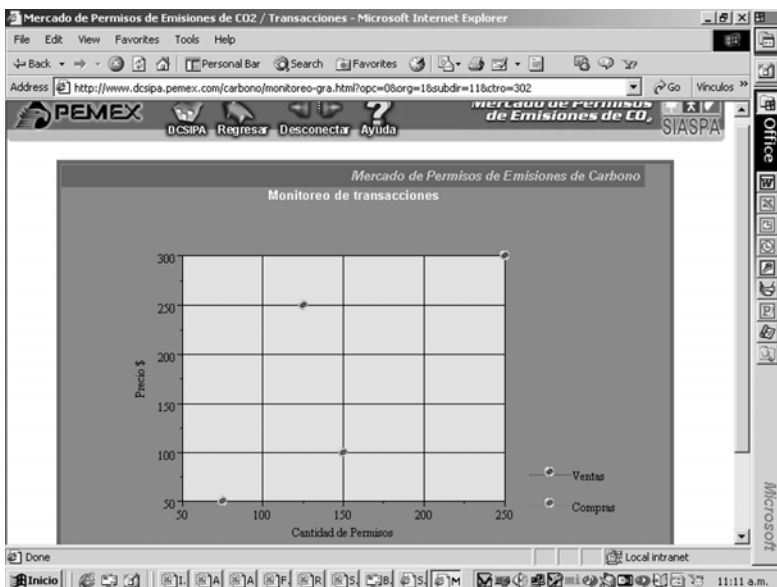


Figura 2. Pantalla del Sistema de Registro de Transacciones.

- De un total disponible de 5,351,772 toneladas de CO<sub>2</sub> se comercializaron 4,418,695 toneladas, equivalentes a 82.6% del total.
- Se realizaron 127 transacciones comerciales con un valor virtual de 293 millones de pesos.
- El saldo de permisos en el Banco del Mercado a diciembre de 2003 ascendía a 1,532,026 toneladas de CO<sub>2</sub>.

## MONITOREO DEL MERCADO

Fase 2. Largo plazo (2004 a 2010). Con la información y la experiencia obtenida en esta primera etapa se analizará la meta de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> para el periodo 2004-2010, y una vez que sea evaluada por las autoridades de Energía y de Medio Ambiente del gobierno mexicano, se hará pública.

En la determinación de este compromiso de reducción de emisiones se estará observando el principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas, sin comprometer la capacidad de crecimiento productivo de la empresa, en el entendido de que el objetivo es que éste sea una contribución real de PEMEX para enfrentar el cambio climático global.

Actualmente, la comercialización de permisos se realiza con valores monetarios virtuales; se gestionará que en periodos posteriores se utilicen valores reales en las operaciones del Mercado.

Un importante objetivo a largo plazo es la incorporación del concepto ambiental en la evaluación de proyectos, privilegiando aquellos cuya rentabilidad

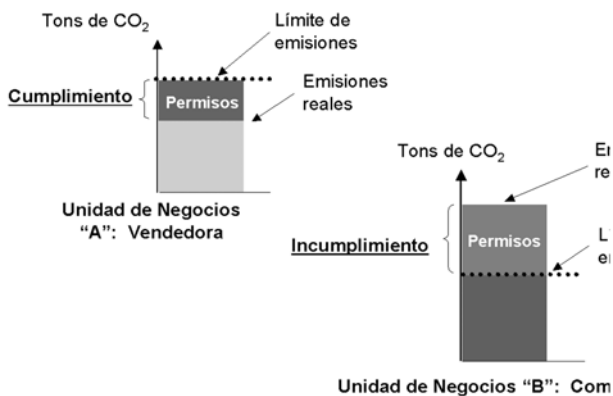


Figura 3. Posiciones de cumplimiento e incumplimiento.

se incrementa al incluir el valor monetario derivado de la comercialización de los permisos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Paralelamente, en esta etapa se deberá contar con proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio en ejecución.

El funcionamiento del Mercado consiste en la asignación a cada UN de un límite de emisiones permitidas —un permiso equivale a una tonelada de carbono— que deberán comercializar una vez realizada la reducción. Las emisiones reales por debajo de esta cifra tope darán a la UN la capacidad de ofertar sus permisos sobrantes, los cuales serán adquiridos por aquellas que rebasen el límite permitido, para llegar al cierre del periodo con un número equivalente de Permisos, a las toneladas autorizadas para el periodo.

Al cierre de éste, se cuantifican los permisos excedentes, los cuales permanecen en el banco administrado por la Auditoría Corporativa de Protección Ambiental, y se realiza el balance final del Mercado para el periodo concluido.

El precio inicial de los permisos ofertados es establecido por la UN vendedora; sin embargo, mediante las negociaciones que se realizan entre la parte vendedora y compradora en el SRT, al final se llega a un precio que fija el mercado, que inclusive puede ser diferente al inicial. Todas las transacciones realizadas se registran en el SRT y se almacenarán en el mismo para efectos de auditoría.

El sistema de cómputo diseñado por PEMEX para la realización y registro de transacciones del Mercado incluye tres estratos para su acceso y consulta: el nivel corporativo puede consultar las transacciones de todas las UN de las cuatro subsidiarias; la Auditoría Corporativa de Protección Ambiental y los directivos de la subsidiaria consultan las transacciones de las UN de su subsidiaria; y sólo el comercializador está autorizado para realizar las transacciones, modificaciones y consulta de su UN.

Para dar confiabilidad al mercado, los datos de las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen del Subsistema de Información de Seguridad Industrial y Protección Ambiental (SISPA). Éste incluye módulos de información para cada uno de los diferentes factores ambientales: agua, suelo y aire, entre otros. Tiene como principio que el suministro de los datos sea hecho por el personal operativo en las plantas o equipos que generan las emisiones. Esto permite verificar y auditar la información con el menor porcentaje de error, dando certeza a la reducción de emisiones que se comercializan en el Mercado.

## Notas

---

\* Auditor Corporativo de Protección Ambiental, Petróleos Mexicanos.



# Modelación del impacto económico de la mitigación de emisiones de GEI<sup>\*</sup>

*María Eugenia Ibararán*<sup>\*\*</sup>

## INTRODUCCIÓN

EN TODOS LOS PAÍSES, el uso de la energía es uno de los principales motores del crecimiento económico. México no es la excepción. Como resultado de ello, las políticas que afectan al sector de la energía tienen un impacto sobre el resto de la economía y sobre el ambiente. Esto hace imprescindible contar con un modelo capaz de estimar el efecto de distintas políticas sobre la economía, el sector de la energía y el medio ambiente (ver el capítulo *Escenarios de emisiones futuras en el sistema energético mexicano*, de J. Quintanilla, en esta sección).

Existen básicamente dos tipos de enfoques para modelar el sector de la energía. Uno es el enfoque agregado, que parte de ciertos supuestos de crecimiento económico y de consumo sectorial de energía para determinar así la demanda de energía por sector; al agregar dichas demandas se obtiene la demanda total de energía por parte de la economía. Dentro de estos modelos agregados se encuentran los modelos de equilibrio general, que incorporan además precios relativos de los bienes y servicios e ingreso de los individuos, pudiéndose obtener a partir de éstos, cambios en el comportamiento final de los agentes económicos. Otro enfoque está dado por los modelos de usos finales. Éstos parten de la desagregación del uso de energía por sector y por uso final; empleando ciertos parámetros técnicos calculan la demanda total de energía de la economía. Cada uno de estos tipos de modelos generan resultados sumamente distintos debido a los supuestos que incorporan y al objetivo para el que cada modelo fue construido.

Tanto los modelos de equilibrio general como aquellos de usos finales son complementarios, ya que responden a distintas preguntas. La integración de estos modelos permite analizar el impacto de diferentes políticas en el sector de la energía sobre el medio ambiente y sobre el resto de la economía. A grandes rasgos, el mecanismo de integración propiamente dicho toma como base la estructura del modelo de equilibrio general e incorpora el módulo de demanda total de combustibles calculada a partir del modelo de usos finales. Con el modelo integrado de esta manera se podrá entonces ver el impacto que tienen sobre los distintos sectores de la economía diferentes políticas que se traducen en un cierto nivel de demanda de combustibles (y energía secundaria), así como los cambios resultantes en precios relativos y en ingreso real y, por ende, su efecto sobre el bienestar de los agentes económicos.

En la primera sección se hace una cuidadosa pero breve diferenciación entre los modelos de usos finales y los modelos agregados, en particular modelos de equilibrio general. Asimismo, a partir del análisis de los modelos existentes, se justifica por qué fue necesario construir un nuevo modelo para México aun cuando ya existen algunos. La segunda parte entra al análisis detallado de cada uno de los modelos a utilizar en el modelo integrado. En particular se describe el modelo BRUS II-M y el modelo de equilibrio general computable BOYD-M. La tercera parte explica técnicamente el proceso de integración de estos dos modelos. En la cuarta sección se plantean los escenarios a simular y se explica la racionalidad detrás de cada uno de ellos. Finalmente, en la quinta parte se presentan y discuten los resultados, así como las líneas de investigaciones futuras.

## CLASIFICACIÓN DE MODELOS DE ENERGÍA

Existen básicamente dos tipos de enfoques para modelar el sector de la energía: los modelos de usos finales y los modelos agregados o de equilibrio general (ver el capítulo *Mitigación de emisiones de carbono y prioridades de desarrollo nacional*, de O. Masera, en esta sección).

Los modelos de usos finales (o *bottom-up*) estiman la demanda de energía a partir del consumo en cada sector. Estos consumos finales de energía se agregan, obteniéndose así la demanda sectorial de energía, suponiendo ciertas tasas de crecimiento en cada sector, cambio tecnológico y cierto comportamiento de los individuos. Finalmente se agregan las demandas sectoriales para determinar la demanda agregada por energía de la economía,

tanto por electricidad como por tipo de combustible. La demanda por electricidad a su vez se traduce en los requerimientos de combustibles para producirla. Se obtiene así un vector que representa la demanda total de combustible, para la producción de energía tanto primaria como secundaria. Los sectores que en general incluyen el módulo de demanda de energía son: agropecuario, residencial, industrial, transporte y servicios. La oferta de energía de la economía se estima a partir de las plantas productoras de energía, tanto refinerías y plantas de gas como plantas generadoras de electricidad. La diferencia entre la demanda de energía y la oferta existente se resuelve añadiendo la capacidad de producción.

Dentro de los modelos agregados de la economía (o modelos *top-down*) hay varios tipos, mismos que se diferencian por el distinto nivel de agregación de los mismos. Un primer grupo se podría denominar modelos deterministas. Éstos parten de estimaciones de crecimiento del producto interno bruto (PIB) tanto para la economía en su conjunto como para sector de la misma, y por medio de coeficientes de consumo de energía por unidad de producto previamente definidos, se obtiene el nuevo consumo de energía por sector y para la economía. Los supuestos detrás de estos tipos de modelos son: que no hay cambio tecnológico; es decir, que los coeficientes de uso de energía por sector permanecen constantes a través del tiempo; que el crecimiento económico es la fuerza única tras el uso de la energía, y que otras variables económicas, como precios e ingreso, no tienen impacto alguno sobre el uso de energía.

Otro grupo de modelos que también representan a la economía en su conjunto son los modelos de equilibrio general computable. Se trata de modelos macroeconómicos que simulan la interacción entre los distintos sectores. Se basan en modelar el comportamiento agregado con parámetros estimados a partir de relaciones históricas entre variables. Dentro de estos tipos de modelos hay modelos específicos para el análisis del uso de energía y otros para el análisis de la economía en general. La demanda de bienes y servicios, o de energía en este caso, se calcula a partir de preferencias, precios relativos e ingreso (o consumo) de los individuos, sujeto a su restricción presupuestal. La oferta se calcula a partir del problema de maximización de utilidades (o minimización de costos) planteado por el productor cuya restricción es la tecnología. La demanda de energía de cada sector se estima en función de los precios relativos de la energía, de los precios de los demás bienes y servicios, del ingreso de la economía (a nivel agregado y sectorial)

y de un índice de eficiencia energética, generalmente determinado de manera exógena al modelo. Las virtudes de este tipo de modelos son que se trata ante todo de un análisis de equilibrio general, donde la información se ve retroalimentada al modelo y se llega a nuevas situaciones de equilibrio para toda la economía. Esto permite hacer un análisis del impacto sectorial de distintas políticas. Por otro lado, incluye variables económicas como precios e ingreso que afectan el comportamiento de los distintos agentes, en particular en términos del efecto sobre el consumo de energía.

Para la conformación del modelo como herramienta de análisis, se llevó a cabo una evaluación detallada del tipo de modelos que se han desarrollado en México -o para su uso en México- que pudieran servir para analizar el impacto de distintas políticas sobre el medio ambiente. De un universo de modelos se seleccionaron cuatro modelos: el Modelo de Demanda de Energía (MODEMA),<sup>1</sup> el Long-Range Energy Alternative Systems (LEAP), el Modelo de Escenarios Energéticos y de Emisiones para México (MEEEM)<sup>2</sup> y el STAIR-M (Services, Transportation, Agriculture, Industry, and Residential Model for Mexico). Los modelos analizados, aun cuando son sumamente detallados y contienen información técnica muy valiosa, pusieron en claro la falta de un modelo que integre información económica y técnica simultáneamente.

## DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS A INTEGRAR

El modelo de usos finales de energía, BRUS II-M, se diseñó para calcular el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a dicho consumo. Permite evaluar políticas muy específicas de reducción de emisiones y de ahorro de energía sobre el ambiente y el sistema de energía. El año de referencia respecto al cual está calibrado es 1996. El modelo contiene una descripción detallada de los sectores de demanda: residencial, servicios, industria (incluyendo agricultura) y transporte, donde cada uno de ellos se ve afectado por el crecimiento demográfico y económico. Por su parte, la oferta está integrada por tres sectores: plantas generadoras de electricidad, refinerías y plantas de gas.

En particular, éste es un modelo de largo plazo que hace proyecciones hasta el año 2020, pero que sólo calcula tres años: un año base (1996), un año intermedio (2004) y uno final (2010).<sup>3</sup> A diferencia de modelos enfocados a un solo sector o industria, este modelo produce resultados confiables para el sistema de energía ante la introducción de cambios en cualquiera de los sectores descritos.



La descripción del lado de la demanda corresponde a la misma clasificación que aparece en el Balance Nacional de Energía. Los sectores agregados son: el sector residencial, el de servicios (que incluye empresas privadas y públicas), el sector industrial y el sector del transporte, que comprende los medios de transporte privados y públicos. Los factores que determinan la demanda neta de energía son: el producto interno bruto (PIB), el crecimiento de la población, la tasa real de interés, los precios de la energía, y la elasticidad precio e ingreso de la energía. Algunos de estos parámetros, como las elasticidades, se calculan a partir de técnicas de regresión múltiple.

Al correr el modelo se obtiene un vector de demanda de energía tanto primaria como secundaria†por sector de consumo y combustibles de las distintas tecnologías y las emisiones de gases de efecto invernadero. La oferta de energía se genera a partir de dos subsectores: petróleo y gas, por un lado, y electricidad, por el otro. En el subsector petróleo y gas se determina el balance entre la demanda y la oferta de combustibles fósiles, incluyendo importaciones y exportaciones, así como el consumo de combustible y de electricidad por parte de depósitos de petróleo y gas, de cada una de las refinerías y de las plantas de gas. Además, este módulo estima el costo económico de la operación y el mantenimiento de estas plantas y refinerías. Es importante aclarar que estos dos sectores sólo son reportados en BRUS II-M, pero el modelo no es capaz de optimizar la oferta de combustible y gas por sí mismo. El subsector electricidad simula la oferta de electricidad requerida con el fin de satisfacer la demanda de energía eléctrica y así estimar la demanda por combustible y los costos de operación, mantenimiento y operación.

Las emisiones estimadas por el modelo son bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), partículas suspendidas (PM), compuestos orgánicos volátiles (NMHC), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y monóxido de carbono (CO). De éstas,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$  en particular son gases que dan origen al efecto invernadero. Las emisiones se generan tanto por el lado del consumo como por el de la producción de energía y varían dependiendo del combustible utilizado, el proceso de combustión y la tecnología de producción empleada en el sector que consume la energía. Este modelo permite obtener las emisiones de GEI asociadas al consumo final de energía en presencia de distintas políticas energéticas.

Aun cuando BRUS II-M es un modelo útil y un primer paso necesario hacia la conformación de un modelo integrado, no considera el efecto de cambios en precios ni en ingreso sobre la demanda y oferta de energía. Por

otro lado, no evalúa los efectos de las distintas políticas del sector de la energía sobre el bienestar de la población (distribución de ingreso), o de las variables macroeconómicas (tasa de ahorro, balanza comercial y crecimiento económico). Además, aun cuando contiene gran cantidad de información detallada por el lado de la producción y consumo de energía, el modelo no incorpora los ajustes en los distintos sectores como nueva información para hacer iteraciones adicionales del modelo. En este sentido es que se sigue considerando un modelo de equilibrio parcial. Esto hace indispensable integrar este modelo de usos finales con un modelo de equilibrio general. Para ello se ha seleccionado el modelo BOYD-M.

El objetivo de construir un modelo de equilibrio general computable como BOYD-M es cuantificar el efecto de distintas políticas sobre el crecimiento de los distintos sectores, sobre el consumo, los precios y el nivel de bienestar agregado. En particular, el modelo BOYD-M se diseñó para usarse de manera interactiva con el modelo de energía BRUS II-M y mostrar cómo es que las políticas en el sector de la energía tienen efecto sobre otros sectores económicos que están relacionados directamente con este último y con los demás sectores. También se diseñó para medir el impacto de distintas políticas de impuestos sobre el uso de combustibles, el bienestar de los consumidores y la tasa de crecimiento de las emisiones.

Está desagregado en nueve sectores productivos que producen 16 bienes, cuatro categorías de ingreso, siete bienes de consumo final, sector externo y el gobierno. Las variables económicas que determina el modelo son: inversión, acumulación de capital, producción por sector, consumo de los agentes y por sector, importaciones y exportaciones y precios relativos, todo calculado por cada año entre 1996 y 2011.

Este modelo en particular está diseñado para simular el funcionamiento del sector de la energía en México y mostrar la interrelación entre sectores. Por ende, contiene determinadas características que no son comunes a modelos de equilibrio general computable en el nivel nacional. Primero, la producción de las refinerías se divide en siete diferentes combustibles en vez de modelarse mediante un solo producto. La producción del sector refinería se divide en gasolina, queroseno, coque, combustóleo, petroquímicos, gas LP y diesel. Para permitir que haya sustitución entre los combustibles, se introduce una elasticidad de transformación (o de sustitución) entre ellos. Por lo tanto, estos siete combustibles se utilizan como insumos para los nueve sectores productivos y para los siete sectores de consumo, y también se intercambian en los mercados internacionales.

Al mismo tiempo, la producción del Subsector Petróleo y Gas Natural también se divide en sus componentes; es decir, producción de petróleo y producción de gas natural. Al igual que en el sector de refinería, los dos productos no se obtienen necesariamente en proporciones fijas y esta relación puede alterarse de acuerdo con su elasticidad de transformación. También es cierto para este sector que el petróleo y el gas natural producidos se pueden utilizar como insumos en otros sectores productivos y de consumo, y también venderse a los consumidores extranjeros.

## INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS DE ENERGÍA

Técnicamente, la integración de estos dos tipos de modelos parte del modelo de equilibrio general. Para integrar los modelos será necesario plantear el problema de equilibrio general como un *problema de complementariedad* (Mathiesen 1985 y Cottle y Pang 1992). Esto permite incorporar la información proveniente de los módulos del modelo de usos finales sobre las distintas tecnologías de producción de energía, en particular el índice de eficiencia energética. Al incluir estas partes al modelo de equilibrio general, se incrementa la solidez analítica del modelo resultante. A los sectores obtenidos a partir del modelo de usos finales se les representa como restricciones al problema de maximización. Las opciones tecnológicas de los demás sectores se siguen modelando mediante funciones neoclásicas continuas de producción. La formulación del modelo y su solución es por medio del formato de complementariedad utilizando MPSGE / GAMS; este paquete simplifica mucho el proceso computacional. La formulación del modelo de equilibrio general como problema de complementariedad está tomada de Böhringer (1998).

La integración de estos dos modelos se lleva a cabo introduciendo la información resultante del módulo de demanda del modelo de usos finales BRUS II-M, al modelo de equilibrio general BOYD-M. Una vez hecho esto, se corre el modelo de equilibrio general para obtener un nuevo equilibrio de cantidades y precios. Este nuevo equilibrio resultará del equilibrio general de la economía, a diferencia de las demandas estimadas a partir de BRUS -M, mismas que provienen de un modelo de equilibrio parcial. Como último paso se alimenta el nuevo vector de demanda de combustibles (demanda ajustada de energía) obtenido a partir de BOYD-M a BRUS II-M. Esto permite determinar las emisiones resultantes de esta demanda ajustada de combustibles.

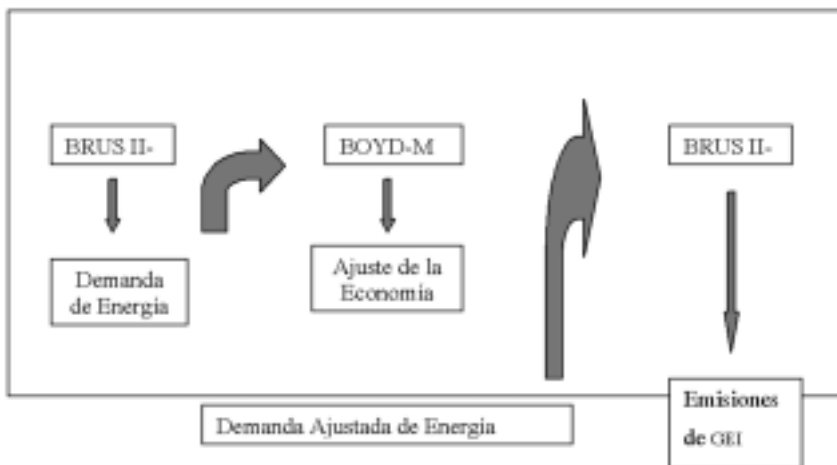


Figura 1. Integración de los modelos

El modelo integrado tiene la ventaja de que, por un lado, presenta una visión de la economía en su conjunto y por sector, incorporando criterios de eficiencia. Además, se puede hacer un análisis del impacto distributivo de distintas políticas. Por otro lado, también contiene elementos de costo-efectividad provenientes del modelo de usos finales. El modelo integrado se puede utilizar para analizar una gran variedad de políticas como efectos de cambios en precios, y de distintos incentivos y restricciones tecnológicas, así como de distintas normas de eficiencia energética sobre los diferentes sectores que estén relacionados con la producción y el consumo de energía. Asimismo, el modelo integrado permite analizar los impactos ambientales de distintas políticas de precios y tecnológicas. Por último se utiliza para simular el efecto de distintas políticas de formación de precios de la energía y el efecto de distintos niveles de inversión en el sector de la energía sobre el resto de la economía. Los escenarios aquí discutidos deben servir como ejemplos del tipo de políticas que se pueden simular por medio del modelo, pero no como el universo de escenarios que éste es capaz de simular.

A pesar de la gran utilidad de este modelo, hay un punto en el que se debe tener cuidado al interpretar los resultados: la interacción de la dos metodologías y, más aún, las dos conceptualizaciones del sector de la energía, tiende a relajar el fundamento teórico de la relación entre las distintas variables.

## ESCENARIOS Y PARÁMETROS

Los escenarios que se simulan son:

*Escenario 1. Crecimiento tendencial: políticas de 1996.* Simula el efecto de seguir con las mismas políticas energéticas antes y después de 1996. Dichas políticas están caracterizadas por un bajo desarrollo de los yacimientos de gas natural nacionales, la construcción de plantas termoeléctricas para la generación de electricidad, poco esfuerzo para reducir el consumo de gasolina y la continuación en el uso de queroseno y diesel para la generación de electricidad en el medio rural. Asimismo, este escenario permite determinar cuál hubiera sido el nivel de emisiones de GEI de México si no se hubiera llevado a cabo ninguna política distinta a las que estaban vigentes en 1996. Esto se hace con el fin de poner en claro que aun cuando no se hayan asumido compromisos explícitos, se ha incurrido en políticas que han reducido las emisiones de este tipo de gases y que, como se verá al comparar este escenario con otros, esto ha tenido un costo para la economía mexicana en términos de crecimiento.

*Escenario 2. Instrumentación de políticas de acuerdo con las prospectivas de energía.* En este caso se simulan los efectos de una combinación de políticas del sector de la energía que ya se estaban llevando a cabo en 1996 o que se pensaban introducir próximamente. Las políticas incluidas son (1) la construcción de ductos para la distribución de gas natural; (2) el uso residencial de dicho gas en 20% del transporte urbano en la ciudad de México; (3) el programa de bombillas de luz fluorescente (ILUMEX) para un uso más eficiente de la electricidad en el sector residencial; (4) el mayor uso de la tecnología de ciclo combinado para la generación de electricidad; (5) la reducción en el uso de gas LP para combustión; (6) la desaparición de queroseno del uso industrial, y (7) el incremento en el uso del coque en la industria del cemento. Esto responde a lo planteado en la Prospectiva de Gas Natural y en la Prospectiva del Sector Eléctrico publicadas por la Secretaría de Energía (1998-2008).

*Escenario 3. Eliminación de subsidios a la electricidad.* En este escenario se eliminan los subsidios generalizados al uso de la electricidad en México. Dado que estos subsidios son sustanciales, los efectos esperados son relati-

vamente grandes. Además, difieren de manera importante por sector de consumo. La eliminación de estos subsidios, por lo tanto, debiera generar resultados muy distintos para los distintos sectores tanto productivos como de consumo.

*Escenario 4. Impuestos al contenido de carbón de los combustibles fósiles.* Se ha discutido en foros internacionales que una forma de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es mediante un impuesto al contenido de carbón de los distintos combustibles fósiles. Para medir el impacto de esta propuesta, este escenario simula el efecto de fijar un impuesto al contenido de carbón del carbón mineral, el petróleo y el gas natural y LP en México y permite calcular sus efectos sobre los de la economía y distintos sectores.

*Escenario 5. Interacción de políticas actuales y la eliminación de subsidios a la electricidad.*

*Escenario 6. Interacción de políticas actuales e impuestos a los combustibles.*

*Escenario 7. Interacción de las tres políticas anteriores simultáneamente.*

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se evalúan los resultados de los distintos escenarios en toda la economía mexicana y se contrastan con los impactos en el PIB, en la balanza de pagos y en el nivel de capital acumulado.

El modelo BRUS II-M permite calcular con bastante nivel de detalle las emisiones de contaminantes globales que resultan del uso y generación de energía. En particular informa resultados para CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, compuestos orgánicos volátiles no metálicos (COVNM), CO, partículas y CH<sub>4</sub>.

A mayor tasa de crecimiento económico, mayor generación de emisiones. Esto resulta del hecho de que dicho crecimiento se sustenta en un mayor uso de energía y, por lo tanto, mayor cantidad de contaminación.

La eliminación de subsidios a la electricidad, como política adicional a la introducción de las políticas planteadas en las perspectivas, genera resultados favorables en términos de emisiones. Se reduce la generación de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, partículas y CH<sub>4</sub>. Es particularmente notable la reducción de SO<sub>2</sub> y compuestos orgánicos volátiles.

La introducción de un impuesto al contenido de carbón de los combustibles fósiles también logra importantes reducciones en el crecimiento de los contaminantes, en particular de COV. Sin embargo, un impuesto de esta naturaleza no tiene, en general, resultados tan satisfactorios como la eliminación de subsidios a la electricidad. Es decir, en términos de emisiones, es preferible eliminar el subsidio que introducir el impuesto.

Para medir la sensibilidad del uso de energía y, por tanto, de las emisiones a distintos niveles de impuestos a los combustibles, se simuló el efecto de un impuesto más alto. Aun con un mayor impuesto se mantienen los resultados anteriores. Es decir, se logra una mayor reducción de emisiones con la eliminación del subsidio a la electricidad que con la introducción de un impuesto a los combustibles.

Finalmente, al simularse la interacción de las políticas de la perspectiva con la eliminación de subsidios a la electricidad y los impuestos a los combustibles, se logra la mayor reducción en la tasa de crecimiento de todos los contaminantes, tratándose de impuestos tanto bajos como altos. Además, la interacción de políticas plantea un mejor escenario en términos de emisiones que con cualquiera de los escenarios analizados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Böhringer, C. 1998. The Synthesis of Bottom-Up and Top-Down in Energy Policy Modeling. *Energy Economics* 20:233-248.
- Cottle, R. W. y J. S. Pang. 1992. *The Linear Complementarity Problem*. New York: Academic Press.
- Mathiesen, L. 1985. Computation of economic equilibrium by a sequence of linear complementarity problems. In economic equilibrium-model formulation and solution. *Mathematical Programming Study* 23:144-162.

## Notas

---

- \* Este proyecto estuvo financiado en parte por el Energy Sector Management Assistance Program, manejado por el Banco Mundial. Estuvo a cargo de la Secretaría de Energía y de la SEMARNAP de septiembre de 1998 a diciembre de 2000. Colaboró en él el Dr. Roy Boyd, de la Universidad de Ohio.
- \*\* Universidad de las Américas-Puebla.

1. Este modelo fue desarrollado por Mariano Bauer y Juan Quintanilla, del Programa Universitario de Energía, UNAM.
2. Este modelo fue desarrollado por Claudia Sheinbaum, del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
3. Los periodos para los que se resuelve el modelo se pueden modificar para incorporar distintas opciones.



# Potencial de participación del sector privado mexicano en el mecanismo de desarrollo limpio

*Gabriel Quadri de la Torre\**

EL PROTOCOLO DE KIOTO, del cual México es signatario, plantea los llamados *mecanismos de flexibilidad*, mediante los cuales los países que han asumido compromisos (Anexo B) de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, pueden recurrir a distintos tipos de transacciones e iniciativas extraterritoriales de cumplimiento.

Uno de esos mecanismos de flexibilidad es el *Mecanismo de Desarrollo Limpio* (MDL), que ofrece la oportunidad a los países del Anexo B de reducir emisiones por medio de proyectos emprendidos en el territorio de naciones en vías de desarrollo que no forman parte del Anexo B (ver el capítulo *Los mecanismos flexibles del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de A. Guzmán, I. Laguna y J. Martínez, en la sección II).

Dado que esos proyectos pueden significar transferencias importantes de tecnología y flujos apreciables de inversión extranjera directa, es previsible vislumbrar una intensa competencia entre países potencialmente receptores para lograr ser anfitriones del mayor número de proyectos.

El éxito de cada nación potencialmente receptora va a depender tanto de ventajas comparativas naturales como el potencial eólico, la radiación solar, etc. † como de ventajas competitivas relacionadas con el marco jurídico e institucional, y de la aptitud de las empresas nacionales para el desarrollo de proyectos MDL.

Factores cruciales serán el potencial real del sector privado mexicano para involucrarse en las etapas de identificación de proyectos, así como en su promoción, diseño, ejecución, financiamiento y seguimiento.

Una participación exitosa del sector privado mexicano en el MDL va a depender de su capacidad de establecer alianzas con empresas extranjeras

mediante procesos de inversión extranjera directa, aportación de capital de riesgo, *joint venture* y otro tipo de sociedades en participación, créditos a la exportación, licencias y transferencia de tecnologías, contratos de compra, autoabastecimiento o autogeneración de energía renovable a empresas multinacionales con operaciones en México, contratos de servicios, concesiones de servicios públicos, etc.

Un elemento adicional de éxito estará referido a la eficiencia de los vínculos que puedan establecer las empresas mexicanas con la autoridad nacional designada encargada de aprobar que los proyectos MDL que se lleven a cabo en nuestro país cumplan con los criterios de desarrollo sustentable que se establezcan tanto en el nivel nacional como en el local.

En el contexto anterior, es claro que México requiere asumir iniciativas que le permitan ponderar con objetividad el alcance de la participación del sector privado en proyectos MDL. Es igualmente importante que nuestro país cuente con un panorama de competitividad de empresas privadas en el MDL en distintos escenarios sectoriales, frente al panorama que enfrentarán las empresas de otros países en vías de desarrollo.

Así, es claro también el imperativo de identificar necesidades de reforma administrativa, regulatoria o jurídica que le permitan al país aprovechar todo el potencial del sector privado mexicano en el MDL y posicionarse como un oferente de créditos de emisión de primer nivel, cuya eficiencia ambiental no pueda ser fácilmente impugnada por terceros y que de esta manera provean un alto valor agregado.

Por otro lado, es indispensable que México avance en la construcción de un inventario de proyectos de mayor viabilidad, sobre todo en el sector industrial y energético, con el fin de nutrir actividades de promoción de los mismos entre el sector privado mexicano a corto plazo, y evitar con ello un rezago frente a otros países competidores y sus empresas.

Es obvio, igualmente, que México requiere construir a la brevedad la capacidad institucional que le permita al sector privado participar exitosamente en el MDL, mediante la definición de vínculos institucionales y operativos con la autoridad nacional designada y con aquellas dependencias responsables del desarrollo de criterios técnicos para las metodologías de cuantificación, las líneas base, los factores de emisión y/o captura, así como también con los encargados de la tramitación y aprobación expedita de proyectos y de la facilitación de criterios y procedimientos de validación, monitoreo, cuantificación, verificación y certificación.

En este contexto es necesario evaluar el potencial del mercado de participación del sector privado mexicano en el MDL, identificando oportunidades en proyectos y sectores específicos, así como elementos de desarrollo institucional para la identificación, promoción y facilitación de proyectos.

En una estrategia ganar-ganar, las autoridades y el sector privado deben evaluar el potencial de participación de las empresas mexicanas en los mercados derivados del MDL en sectores y en tipos de proyectos específicos.

Esta evaluación permitiría ofrecer un panorama claro sobre las diferentes opciones de alianza entre empresas mexicanas y empresas extranjeras, así como identificar aquellos sectores que por razones estructurales, económicas o institucionales no sean susceptibles de participar al menos en acciones tempranas, pero que podrían irse incorporando en periodos posteriores.

Por estas razones es indispensable preparar un inventario preliminar de proyectos (o cartera de proyectos) MDL para el sector privado mexicano e identificar mecanismos de incentivo jurídico, económico e institucional para una participación exitosa de empresas ubicadas en el territorio nacional en el MDL.

De manera complementaria es necesario establecer lineamientos para el desarrollo de vínculos eficientes entre las empresas mexicanas y el Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y de Captura de Gases de Efecto Invernadero, cuyo decreto de creación apareció en el *Diario Oficial de la Federación* del 23 de enero del 2004. Dicho Comité es la entidad nacional encargada de identificar, promover y facilitar proyectos MDL y trabajar en los criterios de desarrollo sustentable y los lineamientos que un proyecto MDL deberá satisfacer en aras de ser nacional e internacionalmente reconocido y aprobado.

Una vez que se lleven a cabo las actividades antes mencionadas será posible elaborar el diseño organizacional e institucional más adecuado, así como los ajustes jurídicos y técnicos necesarios para que las empresas mexicanas se involucren exitosamente en el MDL, de tal forma que se puedan reducir los elevados costos de transacción que la arquitectura internacional ha impuesto sobre los proyectos MDL en aras de garantizar la integridad ambiental.

Estos aspectos también permitirán la selección de alternativas contractuales, corporativas y financieras que se adecúen a las diferentes alianzas estratégicas entre empresas mexicanas y empresas extranjeras para el desarrollo de proyectos MDL.

## Notas

---

\* Centro de Estudios de Políticas Públicas para el Desarrollo Sustentable.



Sección V  
La información, formación de recursos humanos  
y la sensibilización social



# Las comunicaciones nacionales de cambio climático

*Adrián Fernández\** y *Julia Martínez\*\**

LAS PARTES DE LA CONVENCIÓN Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) tienen la obligación de transmitir la información relacionada con la aplicación de ésta —acciones que realizan en la materia— en un documento denominado Comunicación Nacional, de conformidad con el principio de “responsabilidades comunes pero diferenciadas”, consagrado en la Convención.

El contenido y el calendario para su presentación ante la Conferencia de las Partes, (CoP, por sus siglas en inglés) de la Convención son diferentes, dependiendo del Anexo al que pertenezcan. Los países desarrollados y los que se encuentran en transición a economías de mercado son Partes del Anexo I; mientras que los países en desarrollo están clasificados como Partes no Anexo I. Como se verá más adelante, los primeros debieron enviar la comunicación inicial dentro de los seis meses siguientes a la entrada en vigor de la Convención para ellos. Los segundos, antes de transcurridos tres años, o de la disponibilidad de recursos financieros para hacerlo.

En la CoP se establece la frecuencia para la presentación de comunicaciones posteriores. Sin embargo, la excepción son los 48 países clasificados por la Convención como los menos adelantados, ya que pueden hacerlo a su discreción.

Las comunicaciones nacionales constituyen la vía mediante la cual se puede resaltar y diseminar los logros obtenidos en acciones específicas, y también los problemas y preocupaciones sobre el cambio climático, hacia una audiencia amplia del país, que incluye a personas encargadas de elaborar políticas. La preparación de las comunicaciones es un proceso que debe involucrar la evaluación continua, técnica y analítica, de dichas ac-

ciones y cuyo logro importante es servir como herramienta estratégica para enfrentar el cambio climático. La información resultante también se utiliza como material educativo; como recurso informativo para la Conferencia de las Partes, para otros organismos internacionales y en la colaboración bilateral.

Dicha información es plasmada en un documento escrito en uno de los cinco idiomas oficiales de las Naciones Unidas (chino, español, francés, inglés y ruso), acompañado de una versión electrónica de la misma. Se aconseja que lleve un resumen ejecutivo, acompañado de su traducción al inglés, cuando sea el caso, para favorecer la difusión del mismo.

Para los interesados en conocer su contenido, el Secretariado prepara cada año un informe de recopilación y síntesis de las mismas.

### ¿CUÁNTOS PAÍSES EN DESARROLLO HAN PRESENTADO SUS COMUNICACIONES NACIONALES?

Al mes de octubre del año 2004, ciento dieciocho Partes, de 155 no incluidas en el Anexo 1 de la Convención, habían presentado sus comunicaciones iniciales, y la cifra continúa en aumento. Por región, el porcentaje de avance es el siguiente: 77% de los países africanos, con 40 comunicaciones; 68% en Asia, con 37; 91% en Latinoamérica y El Caribe con 32; y 60% de otras regiones con 6 de éstas.

De la región de América Latina no han presentado sus comunicaciones iniciales Brasil, Venezuela y Suriname; de África: Angola, Camerún, Guinea Ecuatorial, Gabón, Guinea Bissau, Liberia, Libia Árabe Jamahiriya, Mozambique, Ruanda, San Tomás y Príncipe y Sierra Leona; de Asia y Medio Oriente: Afganistán, Arabia Saudita, Bahrain, China, Chipre, Emiratos Árabes Unidos, Kuwait, Myanmar, Oman, Qatar, Siria y Turquía; de Oceanía: Fiji, y Tonga. De Europa Bosnia y Herzegovina, San Marino y Serbia y Montenegro.

Aunque la CoP aún no ha fijado un plazo para la presentación de las segundas comunicaciones nacionales, México lo hizo en julio del 2001 ([www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)), Corea en diciembre del 2003 ([www.keei.re.kr/keei/main\\_eng.html](http://www.keei.re.kr/keei/main_eng.html)), y Uruguay en mayo del 2004 ([www.cambioclimatico.gub.uy](http://www.cambioclimatico.gub.uy)).



## ¿CON QUÉ APOYO FINANCIERO SE CUENTA PARA LA PREPARACIÓN DE COMUNICACIONES NACIONALES?

La Convención menciona que a los países que figuran en el Anexo II de la Convención (países miembros de la Organización de Cooperación para el Desarrollo Económico [OCDE], que al mismo tiempo son parte del Anexo I, sin incluir a las Partes con economías en transición), se les solicita dar financiamiento a los países en desarrollo para que cumplan sus obligaciones ante ésta. La mayor parte de este financiamiento es canalizado por medio del mecanismo financiero de la Convención, el Fondo Mundial para el Medio Ambiente, FMMA, “Global Environmental Fund, GEF, en inglés”, a través de sus agencias de instrumentación: El Banco Mundial, BM ([www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)) el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA ([www.unep.org](http://www.unep.org)), y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo ([www.undp.org](http://www.undp.org)).

Por su parte, el GEF ha asignado cerca de 1.3 mil millones de dólares para actividades de cambio climático en países en desarrollo desde 1991; sin embargo, al 2003, sólo 3% había sido utilizado para el financiamiento de comunicaciones. En noviembre del año pasado, el Consejo de este mismo organismo aprobó 60.2 millones de dólares para los años 2004-2009 ([www.undp.org/cc/index2.html](http://www.undp.org/cc/index2.html)). Estos fondos se canalizarán a través del Programa de Comunicaciones Nacionales para Cambio Climático, que es un “proyecto paraguas” del GEF, PNUD, y el PNUMA consistente de tres componentes de financiamiento: las Partes llevarán a cabo actividades de “auto evaluación” para la preparación de la documentación de proyectos, con un financiamiento de 1.95 millones de dólares; 52.65 millones para comunicaciones nacionales de 130 Partes no-Anexo I; y 5.6 millones para el Programa de Apoyo a Comunicaciones Nacionales, del PNUD, que brinda importante asistencia técnica a los países en desarrollo.

Alrededor de 6.9 millones han sido otorgados de manera bilateral.

## ¿CON QUÉ AYUDA TÉCNICA CUENTAN LOS PAÍSES EN DESARROLLO PARA ELABORAR SUS COMUNICACIONES?

En la Quinta Reunión de la COP, en 1999, se estableció un Grupo Consultivo de Expertos sobre Comunicaciones Nacionales de las Partes no incluidas en el Anexo I de la Convención (GCE), con el fin de mejorar la preparación de

éstas, que funcionó por tres años. En la octava Conferencia, en el 2002, las partes decidieron prolongar el mandato de este grupo y aprobaron directrices nuevas para la elaboración de comunicaciones. Cabe mencionar que desde su inicio hasta fines del 2004, México formó parte del GCE.

Este Grupo examina las comunicaciones nacionales sometidas e identifica y evalúa las dificultades que tienen los países en el uso de las guías y metodologías existentes y emite recomendaciones al respecto, a fin de que las Partes mejoren los siguientes aspectos: la recolección de la información; el uso de factores de emisión y de información por actividad; y el desarrollo de metodologías, incluyendo para vulnerabilidad y adaptación. Además revisa y analiza los programas bilaterales y multilaterales que existen; y da asesoría técnica a través de talleres participativos.

El Secretariado de la Convención también facilita asistencia técnica y financiera para la preparación de comunicaciones, lo cual es de gran importancia para la labor del CGE, principalmente en la organización de talleres; la colaboración con programas de apoyo bilaterales y multilaterales; la difusión de información; las reuniones de grupos de expertos; y la promoción del intercambio de información y capacitación.

Para la difusión de información, el Subprograma de Instrumentación de las Partes no Anexo I del Secretariado, elabora un boletín de noticias titulado: Actualización en comunicaciones no-anexo I (NAI Update) después de cada sesión de los Órganos Subsidiarios, y lo envía a los puntos focales y coordinadores nacionales de proyectos de comunicaciones nacionales.

Otra iniciativa del Secretariado, es el denominado CC:FORUM, que realiza presentaciones para el intercambio de información, durante las sesiones de los Órganos Subsidiarios de la Convención y de la Conferencias de las Partes. Es importante destacar que están abiertas a todos los participantes.

En el sitio Web de la Convención puede consultarse el estado de preparación de las comunicaciones, junto con una lista de proyectos de mitigación incluidos en algunas de éstas. Para mayor información sobre reuniones e información actualizada, ver <http://unfccc.int/program/imp/nimp1.html>.1

Otra instancia importante es el Programa para el Apoyo de Comunicaciones Nacionales “National Communications Support Programme”, arriba mencionado, que cuenta con financiamiento del PNUD/GEF, para preparar y difundir materiales técnicos, a través de talleres temáticos regionales y subregionales, en materia de inventarios; mitigación y adaptación; transfe-

rencia de tecnología y evaluación de necesidades; y en la integración de las políticas de cambio climático en el desarrollo. Cuenta con un sitio web: [www.undp.org/cc/index2.html](http://www.undp.org/cc/index2.html) y con un servidor para enviar información mensual a una lista de correos electrónicos, sobre resultados de proyectos, lecciones aprendidas y otras noticias. También cuenta con un boletín de noticias trimestral.

Cabe mencionar que los países en desarrollo pueden recibir, de manera directa, ayuda técnica y financiera de las Partes del Anexo II.

### ¿QUÉ ELEMENTOS DE INFORMACIÓN DEBEN CONTENER LAS COMUNICACIONES NACIONALES DE LOS PAÍSES EN DESARROLLO?

Para facilitar la presentación de la información de manera coherente, transparente, comparable y completa, en la Segunda Reunión de la Conferencia de las Partes, celebrada en 1996, se adoptaron directrices para la elaboración de comunicaciones nacionales iniciales de las Partes no incluidas en el Anexo I de la Convención, las cuales fueron utilizadas por cerca de 110 países. Sin embargo, estas Partes informaron sobre problemas metodológicos, institucionales, financieros, etc. Así que en la CoP 8, en 2002, se decidió adoptar nuevas guías. Éstas, junto con las guías de la entidad operacional del mecanismo financiero de la Convención, el GEF, deben utilizarse para comunicaciones iniciales que estén por comenzarse y para la preparación de las segundas y terceras.

Si comparamos las primeras guías con las del 2002, vemos que antes sólo se solicitaba: a) una descripción de las circunstancias nacionales; b) el inventario de emisiones antropogénicas, por las fuentes y la absorción por los sumideros, de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, con la utilización de metodologías comparables que tendría que aprobar la Conferencia de las Partes; c) una descripción general de las medidas que se han adoptado o se prevén adoptar para aplicar la Convención, y cualquier otra información que el país considere relevante para que se alcancen los objetivos de ésta; y d) comentar las necesidades y problemas financieros y tecnológicos que enfrenta el país en materia de cambio climático.

Ahora, dada la relativa complejidad de las nuevas guías, las Partes de la Convención solicitaron al Secretariado la elaboración de un manual del usuario, que una vez terminado ha facilitado mucho el seguimiento de éstas.

Dicho manual contó con la asesoría, comentarios y sugerencias del Grupo Consultivo de Expertos en Comunicaciones Nacionales de las Partes no-Anexo I de la Convención.

### ¿CUÁL ES LA INFORMACIÓN QUE PIDEN LAS NUEVAS GUÍAS A LOS PAÍSES EN DESARROLLO?

Las nuevas guías o directrices establecen criterios parecidos a los que se aplican a los países desarrollados, ya que las comunicaciones nacionales deben contener los siguientes capítulos:

Primero se debe dar una descripción de las prioridades de desarrollo nacional y regional, con objetivos y circunstancias sobre la base de cuáles serán abordadas desde el punto de vista de cambio climático y sus impactos adversos. Esta descripción puede incluir información sobre la geografía, el clima y la economía que pudiera afectar la habilidad para mitigar o adaptarse al cambio climático, así como sus necesidades específicas y preocupaciones sobre los efectos adversos del cambio climático y/o de su impacto en la instrumentación de medidas de respuesta, como se especifica en varios artículos de la Convención.

La mencionada información es básica para entender la vulnerabilidad del país, su capacidad y opciones para adaptarse a los efectos adversos del cambio climático, al igual que su elección en tratar las emisiones de gases de efecto invernadero en el contexto del desarrollo sustentable.

Se pide que todas las secciones y temas principales se refieran a la situación nacional y a las prioridades de desarrollo. La descripción de las circunstancias nacionales podría contener la siguiente información:

- Características geográficas, que incluyan clima, bosques, uso de suelo y otras características ambientales.
- Población: distribución de las tasas de crecimiento, densidad y otras estadísticas de vida.
- Economía: que incluya energía, transporte, industria, minería, turismo, agricultura, pesca, desechos y salud.
- Educación: las instituciones de investigación científica y tecnológica.
- Cualquier información considerada como relevante por el país, incluyendo necesidades y preocupaciones específicas derivadas de

los efectos adversos del cambio climático. Las necesidades específicas de los países menos adelantados al adoptar medidas con respecto al financiamiento y a la transferencia de tecnología. Esto se aplica en especial a los países cuyas economías dependan en gran medida de los ingresos generados por la producción, el procesamiento y la exportación de combustibles fósiles y productos asociados de energía intensiva, o de su consumo, o del uso de combustibles fósiles cuya situación les ocasione serias dificultades.

- Los países en desarrollo deben informar sobre los arreglos institucionales importantes para la preparación de comunicaciones nacionales de manera continua, como la distribución de responsabilidades en las diferentes áreas del gobierno y en las instituciones académicas y de investigación; los Comités de Cambio Climático (fecha de establecimiento y mención sobre sus miembros); participación de otras personas involucradas en el tema; y sobre grupos o equipos de expertos en inventarios, vulnerabilidad y adaptación, etc.

## INVENTARIOS NACIONALES DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

El inventario nacional de emisiones es un elemento clave de las comunicaciones, ya que sirve para ubicar a los países como emisores en el contexto mundial. Por lo tanto se deberá informar la manera como se ha organizado su elaboración.

### ¿QUE HAY DE NUEVO EN MATERIA DE INVENTARIOS?

Las siguientes publicaciones resultan de utilidad para que los países elaboren y perfeccionen sus inventarios nacionales: las guías para la preparación de comunicaciones nacionales y el manual de la CMNUCC para el usuario de éstas; las Guías de Buenas Prácticas del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, PICC, aprobadas en el 2000; y las recientemente aprobadas, 2003, para uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura; también la base de datos de factores de emisión del PICC.

Es importante destacar que el PICC aprobó, en noviembre del 2003, los términos de referencia, el índice y el plan de trabajo para la preparación de las

Guías del PICC, 2006, para Inventarios Nacionales de Emisiones Gases Efecto Invernadero, que en su momento substituirán las Guías revisadas, 1996.

Las Partes no-Anexo I deberán estimar sus inventarios para el año de 1994 en su comunicación inicial o de manera alternativa el año de 1990.

Para la Segunda Comunicación lo estimarán para el año 2000, y los países menos desarrollados escogerán el año que mejor les convenga.

Las nuevas guías mencionan también que al realizar el segundo inventario se debe revisar la información proporcionada en el primero, lo cual es muy conveniente para facilitar la interpretación de algunos cambios posibles con respecto al inicial. Si algún país deseara informar para otros años, lo puede hacer, esto también aplica para países que preparan su comunicación inicial o incluso la tercera. Lo que resulta ahora novedoso es que los resultados del inventario deben estar ligados al análisis de la mitigación

### ¿CUÁLES SON LAS METODOLOGÍAS QUE SE PUEDEN UTILIZAR PARA LA ELABORACIÓN DE INVENTARIOS?

Las Guías Revisadas del PICC, 1996, para estimar e informar los inventarios nacionales, constan de 3 volúmenes: el I y el III sobre metodologías, que sólo se encuentran en inglés; el volumen II que contiene todos los cuadros metodológicos y explicaciones relevantes sobre cómo realizar el cálculo de las emisiones, también se encuentra disponible en Francés, Español, y Ruso. Estos documentos se pueden encontrar en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm>. La utilización de las guías se maximiza al hacer uso del programa de cómputo desarrollado para calcular y estimar emisiones.

Estas guías se complementan con Las Guías de Buenas Prácticas y Manejo de la Incertidumbre en Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, que ofrecen asesoría en la selección del nivel del método, en los factores de emisión y en la información por actividad. Resultan de gran ayuda para mejorar la transparencia y consistencia, del inventario, y también para manejar la incertidumbre. Se pueden acceder en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/gpgaum.htm>

En materia forestal están las Guías de buenas prácticas en uso y cambio de uso de suelo y silvicultura, que fueron aprobadas en el seno del PICC y se repartieron a los países en la Novena Conferencia de las Partes, en 2003.

A diferencia de los países en desarrollo, los países Anexo I tienen la obligación de informar sobre las emisiones de los denominados gases "F", esta-

blecidos en el Anexo B del Protocolo de Kyoto: los hidrofluorocarbonos (HFCs), los perfluorocarbonos (PFCs) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Las nuevas guías conminan a las partes no-Anexo 1 a dar información sobre emisiones de éstos, al igual que de emisiones, por fuente, de otros gases de efecto invernadero indirecto, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles no metano (COVNM). Lo anterior se facilita con el uso del programa de inventarios, que de manera automática resume esta información. Otros gases no controlados por el Protocolo de Montreal, como los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), incluidos en las guías del PICC, pueden ser incluidos a discreción de las Partes.

La información desagregada sobre emisiones de la aviación internacional y de los barcos que abastecen combustible es también requerida en la medida de lo posible, sin embargo no deberán ser contabilizadas en los totales nacionales.

#### PROGRAMAS QUE CONTIENEN MEDIDAS PARA FACILITAR LA ADECUADA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

La información incluirá los programas nacionales y regionales, y las actividades y medidas que faciliten la adaptación, será necesario relacionar esta información con la vertida en el apartado de circunstancias nacionales.

Para empezar, es necesario describir algunas de las condiciones de la línea base, como el clima, efectos de desastres, y capacidad de respuesta; población y seguridad alimentaria; urbanización, vivienda, y recursos hídricos; clima y salud, etc.

Las “Guías técnicas del PICC para evaluar los impactos del cambio climático y la adaptación” incluyen métodos con modelos predictivos y cuantitativos, estudios empíricos, opiniones de expertos y herramientas para la toma de decisiones. Sin embargo, la elección de estos métodos dependerá del enfoque y amplitud de la evaluación, por sus posibilidades sociales, económicas y políticas y también a su aceptación cultural. Es conveniente mencionar el posible seguimiento que se le daría a esta evaluación. Hay que recordar que las adaptaciones no son sólo respuestas a efectos específicos (por ejemplo diques marinos) sino que también incluir políticas generales población, de desarrollo económico, de uso del suelo, etc.

Los modelos regionales del clima que se pueden utilizar son por ejemplo el MAGICC\_SCENGEN y el PRECIS, también hay otras herramientas

para anidar (obtener información a escalas pequeñas) a partir de los Modelos de Circulación General.

El PNUD/GEF ha publicado en 2004, manuales y documentos técnicos que cubren la temática de adaptación, modelación del clima regional, escenarios socio-económicos, inventarios de gases de efecto invernadero, evaluación de necesidades tecnológicas, y evaluación de capacidades para que las Partes no Anexo I elaboren su segunda comunicación nacional,

El Marco para las Políticas de Adaptación del PNUD (Adaptation Policy Framework, APF) contiene nueve documentos técnicos, con el fin de que los países produzcan estrategias, políticas y medidas de adaptación. Consideramos que es un gran esfuerzo académico realizado con expertos de muchas regiones. Sus documentos de trabajo se pueden encontrar en [www.undp.org/cc/apf.htm](http://www.undp.org/cc/apf.htm). También en este año se publicaron las Guías para el Usuario del APF, que abordan el tema de la variabilidad climática actual y eventos extremos y evalúa las experiencias climáticas recientes.

Las Guías para los Planes Nacionales de Adaptación (NAPA por sus siglas en inglés) también aportan conocimientos importantes. [www.unfccc.int](http://www.unfccc.int).

## PROGRAMAS QUE CONTENGAN MEDIDAS PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO

Es importante mencionar que aunque no se requiere que los países en desarrollo tengan compromisos de reducción de emisiones, el que lleven a cabo acciones de mitigación y de evaluación conllevan beneficios adicionales (cobeneficios) para el desarrollo sustentable, tales como la reducción de partículas contaminantes; el aumento en la eficiencia y efectividad tecnológica; la reducción en la congestión vial, cuando se lleva a cabo un cambio de transporte privado a público, etc.

Los programas deben incluir una descripción de las principales tendencias de desarrollo económico y social que incluya las emisiones esperadas de gases de efecto invernadero en energía, procesos industriales, agricultura, cambio de uso del suelo y bosques y manejo de residuos.

Para poder mejorar el conocimiento del esfuerzo potencial de las acciones del país, es importante destacar los recursos técnicos utilizados en la evaluación de la mitigación, explicando cuáles son y qué son, en que sectores de la economía se aplican; huecos de información detectados; limitaciones de los recursos técnicos, etc.



Algunos modelos que se pueden utilizar son, para el análisis de abajo hacia arriba, (*Bottom-up*), el modelo STAIR, para energía en servicios, transporte, agricultura, industria y residencial; el GACMO para el análisis de proyectos de mitigación; el COPATH, que contiene hojas de cálculo para la estimación de flujos de carbono asociados al uso forestal; el LEAP, que es un sistema de planificación de alternativas energéticas de largo alcance; el ETO que compara las fuentes de abasto para la identificación de opciones de bajo costo; el EM que es un manual ambiental para la inclusión de información ambiental y costos en la toma de decisiones de proyectos energéticos, especialmente para países en desarrollo. En lo que respecta a los modelos de arriba hacia abajo (*top-down*) está el MARKAL\_Macro, de optimización en energía-economía ambiente (combinación de *bottom-up* y *top-down*: ENPEP, que es un programa para evaluar la energía y la electricidad y para modelar sistemas energéticos.

En particular la definición del escenario de la línea base es de fundamental importancia para el resultado del cálculo de los costos de mitigación. Se debe incluir información sobre los impactos de instrumentar opciones o estrategias de mitigación identificadas en relación a la línea de base o proyecciones de la línea base *business as usual*, donde no hay políticas puestas en práctica diseñadas a reducir emisiones de gases de invernadero para evaluar los sacrificios de situar recursos adicionales para llevar a cabo políticas comparadas con el caso de ausencia de éstas.

Es importante incluir la evaluación macroeconómica, con la información sobre la descripción cualitativa de los principales impactos de las estrategias nacionales de mitigación al cambio climático,

También es importante la identificación de las barreras y oportunidades para la instrumentación de la mitigación, como el apoyo financiero y la evaluación de opciones tecnológicas para las diferentes opciones en varios sectores.

Es aconsejable elaborar una lista de proyectos que reduzcan emisiones y aumentan las remociones en sumideros en el contexto de la comunicación o aparte, con costos de implementación; descripción del potencial de mitigación; del concepto de proyecto que incluya beneficios sociales y ambientales; e información sobre los problemas para su instrumentación.

*Sobre la investigación, la capacitación y la sensibilización del público en cambio climático*, se pide que se informe de actividades realizadas a nivel nacional y regional en cambio climático, de observaciones sistemáticas

del clima y redes de investigación global; y sobre las investigaciones meteorológicas, atmosféricas. También es importante informar sobre los programas de investigación que contienen medidas para mitigar el cambio climático, facilitar la adecuada adaptación y el desarrollo de factores de emisión e información por actividad.

Hay que informar también sobre lo que respecta al nivel de sensibilización y entendimiento de la población con respecto del problema del cambio climático, el acceso a la información y la participación pública. También es importante identificar las necesidades y prioridades y las carencias de información para la educación, el entrenamiento y la capacitación en cambio climático.

### CREACIÓN DE CAPACIDADES TÉCNICAS

Para la preparación de comunicaciones nacionales es indispensable la creación y el fortalecimiento de estas capacidades, este es un tema que trasciende de manera horizontal los sectores involucrados. Se debe expresar los requerimientos y necesidades del país en este rubro; las actividades en proceso, y la promoción de la cooperación Norte-Sur y Sur-Sur.

La información es una parte integral del proceso de preparación de comunicaciones nacionales, el uso de sistemas de información es clave para poder archivar y actualizar los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero; las evaluaciones de la vulnerabilidad y la adaptación y los análisis de mitigación. Las redes de información dan acceso de información nacional, regional y global. Es conveniente informar sobre los esfuerzos para compartir la información, entre países y regiones; y la contribución a estas redes, además del acceso y el uso de las tecnologías para el intercambio de información.

### ASUNTOS TÉCNICOS, FINANCIEROS Y DE CAPACIDADES

Las Partes no Anexo I deberían informar sobre los fondos provistos por los países Anexo I en la elaboración de sus comunicaciones, al igual que de los apoyos recibidos del GEF, a través de sus agencias, o a través e programas bilaterales o con instituciones multilaterales.

También en esta sección, las Partes propondrán proyectos a ser financiados, para reducir emisiones, para reducir las fuentes y aumentar los sumi-

deros, los cuales deberán identificar tecnologías, equipos y materiales requeridos; la estimación de todos los costos incrementales correspondientes y de los beneficios esperados.

## LAS COMUNICACIONES NACIONALES PRESENTADAS POR MÉXICO

*La primera comunicación de México* fue presentada a la Conferencia de las Partes en 1997, siendo el segundo país en hacerlo, ya que Uruguay fue el primero.

Estados Unidos, que es parte del Anexo II de la Convención, proporcionó fondos de manera directa, a través de su Programa de Apoyo a Comunicaciones Nacionales, para que el Instituto Nacional de Ecología coordinara el Estudio de País sobre Cambio Climático (1994-1996).

De tal manera, que la Primera Comunicación se basó principalmente en los resultados de dichos estudios: el Primer Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, que se realizó con cifras de 1990, el cual sirvió para situar a nuestro país como emisor en el contexto mundial. También el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente/GEF aportó fondos para este inventario (ver el capítulo *Los gases de efecto invernadero y sus emisiones en México*, de L. G. Ruiz y X. Cruz, en la sección I).

Además se presentaron los estudios de la evaluación de la vulnerabilidad de nuestro país al cambio climático en las áreas de hidrología, bosques, agricultura, zonas costeras, asentamientos humanos y sequía y desertificación. El texto completo y su resumen ejecutivo traducido al inglés se puede encontrar en: [www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/download/c-clima.pdf](http://www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/download/c-clima.pdf).

Se requirió la participación de un grupo numeroso de expertos, de más de 15 instituciones académicas y gubernamentales del país, para la elaboración del inventario y de los demás estudios. Fue necesario organizar un primer taller en 1994, con el fin de reunirlos para conocer las investigaciones que llevaban a cabo, relacionadas con el tema, e invitarlos a participar en este esfuerzo multidisciplinario de cambio climático.

Cabe mencionar que a partir del Estudio de País, muchos de estos investigadores han seguido trabajando en este tema como tal, las publicaciones nacionales e internacionales de los grupos de trabajo sigue en aumento cada año.

## La Segunda Comunicación de México

La elaboración de la Segunda Comunicación Nacional de México inició en el 2000, en un contexto de importancia, dado que el Protocolo de Kioto de la CMNUCC fue ratificado por unanimidad, en el Pleno del Senado de la República, el 29 de abril de ese año. Se presentó durante la Octava Conferencia de las Partes COP8, en el año 2001.

De lo más relevante de este documento fue la actualización del Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero al año de 1996, ya que las cifras de 1998 se obtuvieron sólo en el área de energía, dado que no contamos con cifras actualizadas sobre cambio de uso de suelo y silvicultura, por falta de validación en campo del Inventario Nacional Forestal, cuya elaboración inició en el 2000. Esta actualización fue financiada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Se puede consultar una base de datos interactiva del inventario en: <http://www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/inventario/index.html>

También se describieron las políticas de mitigación en el área forestal y de energía; se realizaron escenarios de emisiones futuras, con supuestos de crecimiento del producto interno bruto que finalmente no se han alcanzado; se hizo un recuento de las actividades de investigación científica y tecnológica del país del 1997 al 2001, y de la cooperación internacional realizada en el mismo período. [www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/download/segonal.pdf](http://www.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/download/segonal.pdf).

### Otras publicaciones relevantes

Dos años después de publicada la Segunda Comunicación, el Instituto Nacional de Ecología, INE/Semarnat, con el fin de mantener documentadas las actividades realizadas en el tema, publicó a fines del 2003 el libro “Avances en materia de cambio climático en México 2001-2002”, cuya versión electrónica se puede encontrar en:

[www.ine.gob.mx/dgicurg/cc\\_estudios.html](http://www.ine.gob.mx/dgicurg/cc_estudios.html), al igual que su traducción completa al inglés.

Para que el INE coordinara de mejor manera algunas investigaciones, era importante conocer el potencial de la investigación sobre cambio climático en México, para lo cual solicitó a la UNAM, en el 2003, un censo sobre los

investigadores, la institución donde laboran y la temática de sus proyectos. Se localiza en: [www.ine.gob.mx/dgicurg/potencial.html](http://www.ine.gob.mx/dgicurg/potencial.html).

Es importante destacar que ambas comunicaciones fueron financiadas con recursos del gobierno mexicano y que para su elaboración se utilizaron las primeras guías de la Convención, dado que las nuevas fueron aprobadas hasta el 2002

## CUMPLIMIENTO DE LAS PARTES ANEXO I EN MATERIA DE SUMISIÓN DE COMUNICACIONES NACIONALES A LA CONVENCION

Los países desarrollados y los que tienen economías en transición a economías de mercado forman Parte del Anexo I y son los siguientes países: Australia, Austria, Belarus\*, Bélgica, Bulgaria\*, Canadá, Croacia\*, República Checa\*, Dinamarca, Estonia\*, Comunidad Europea, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría\*, Islandia, Irlanda, Italia, Japón, Latvia\*, Lichtenstein, Lituania\*, Luxemburgo, Mónaco, Holanda, Nueva Zelanda, Noruega, Polonia, Portugal, Rumanía\*, Federación Rusa\*, Eslovaquia\*, Eslovenia\*, España, Suecia, Suiza, Turquía, Ucrania\*, Reino Unido de la Gran Bretaña e Irlanda del Norte y Estados Unidos. (\*países con economías en transición).

Son 39 los que han presentado su primera comunicación, que debieron entregarla a los seis meses de que la Convención entrara en vigor para ellos; la segunda comunicación tuvieron que presentarla el 15 de abril de 1997 (o el 15 de abril de 1998 para las Partes con economías en transición, son 36 los que lo han hecho; y la tercera el 30 de noviembre del 2001; son 32 los que han cumplido. La Comunidad Europea ha presentado un documento en cada una de estas ocasiones. Le fecha de sumisión de su cuarta comunicación será el 1 de enero del 2006. Estas comunicaciones son revisadas a profundidad por un grupo de expertos de la Convención. También deben presentar al Secretariado de la Convención sus inventarios de emisiones y sumideros de gases de efecto invernadero para el 15 de abril de cada año.

El Secretariado de la Convención preparó una interesante compilación y síntesis de los resultados de las terceras comunicaciones de las Partes Anexo I, que se puede consultar en el documento de la Convención: UNFCCC/SBI/2003/7, del 16 de mayo del 2003 ([www.unfccc.int](http://www.unfccc.int)).

Los países desarrollados incluyen en su comunicación los siguientes elementos de información:

*Una descripción de sus circunstancias nacionales*, de cómo éstas afectan a las emisiones y a la absorción de gases de efecto invernadero.

*Los inventarios nacionales de emisiones*, con cuadros resumen, donde se incluyan los equivalentes en bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y las tendencias de las emisiones.

*Las políticas y medidas* adoptadas para cumplir los compromisos contraídos con la Convención. El proceso de formulación de políticas; deberán incluir proyecciones cuantitativas para los años 2005, 2010, 2015 y 2020, en forma tabulada, por sectores y gases junto con los datos reales correspondientes al período 1990-2000 ó al último año disponible.

*Evaluación de la vulnerabilidad, efectos del cambio climático y medidas de adaptación*. En este rubro deberán informar también sobre la cooperación en los preparativos para la adaptación y para la protección y rehabilitación de zonas, particularmente de África, afectadas por la sequía y la desertificación, así como por las inundaciones.

*Recursos financieros y transferencia de tecnología*. Aquí debe ir la información sobre el aporte de recursos nuevos y adicionales a los países en desarrollo para la elaboración de sus comunicaciones nacionales, para cubrir la totalidad de los gastos convenidos que efectúen.

Se comentará de manera detallada sobre la asistencia prestada a las Partes que son países en desarrollo y especialmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático, para sufragar los gastos de adaptación a esos efectos.

Por último se cubrirán las secciones de: investigación y observación sistemática del clima; y educación, capacitación y sensibilización del público.

Es importante destacar que cualquier grupo de países podrá presentar una comunicación conjunta, siempre que incluya información sobre el cumplimiento por cada una de esas Partes.

En lo que respecta a la información catalogada como confidencial, el Secretariado la compilará de manera que se proteja, antes de ponerla a disposición de los órganos que la transmiten y examinan.

El Secretariado hace públicas las comunicaciones en el momento en el que son presentadas a la Conferencia de las Partes.

## CONCLUSIONES

Las comunicaciones nacionales continuarán siendo instrumentos estratégicos de gran importancia para el proceso mismo de la Convención, y como una de las herramientas más importantes para llamar la atención de los tomadores de decisiones de los países.

La calidad de la información presentada en las comunicaciones nacionales de los países en desarrollo es cada vez mejor y más transparente; no obstante, las nuevas guías y el manual preparado para facilitar su seguimiento serán de gran utilidad para este proceso. Además ahora se cuenta con metodologías revisadas y actualizadas, que junto con el apoyo técnico del Grupo Consultivo de Expertos sobre Comunicaciones Nacionales de las Partes no-Anexo I de la CMNUCC y demás asistencia técnica y financiera disponible, ayudarán a la creación y fortalecimiento de capacidades institucionales con este fin.

## BIBLIOGRAFÍA

- CMNUCC, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1999. PNUMA/IUC. Bonn Alemania.
- INE-SEMARNAT (Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). *México 2ª Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* [en línea] [fecha de consulta: abril de 2004]. Disponible en <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/index.html>.
- IPCC-NGGIP (1997). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IPCC. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm>.
- IPCC-NGGIP (2000). Good Practice Guidance an Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, IPCC. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/gpgaum.htm>.
- UNDP (United Nations Development Programme). The National Communications Support Programme [en línea] [fecha de consulta: abril de 2004]. Disponible en <http://www.undp.org/cc/index2.htm>.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 1998. El Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Publicado por la Secretaría del Cambio Climático con el apoyo de la Oficina de

Información sobre las Convenciones del PNUMA. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.

UNFCCC. 2003. Reporting on Climate Change: user manual for the guidelines on national communications from non-Annex I Parties. 30 pp.

## Notas

---

\* Director General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y Global. INE/SEMARNAT.

\*\* Directora de Investigación sobre Cambio Climático. INE/SEMARNAT.



# El papel de las organizaciones de la sociedad civil ante el cambio climático global

*Martha Delgado Peralta\**

## SURGIMIENTO Y DESARROLLO DEL MOVIMIENTO AMBIENTALISTA

EL REPORTE DEL CLUB DE ROMA sobre *Los límites del crecimiento*, elaborado en 1972,<sup>1</sup> cuestionó de manera determinante el modelo de desarrollo que conocemos, y puso en tela de juicio las tesis hasta entonces asumidas de que la naturaleza era inagotable y gratuita. Las sociedades modernas comenzaron a reconocer los principios de Barry Commoner, uno de los padres del ecologismo: que todos los seres vivos somos interdependientes; que las emisiones contaminantes no se destruyen sino que siempre van a otra parte; que no existe «comida gratuita» y que su producción cuesta en energía; y que la naturaleza es más sabia que nosotros, pues ha evolucionado en millones de años para llegar a su estado actual.<sup>2</sup>

En esa época, el abordaje de los asuntos ecológicos se hacía desde las instituciones académicas y de investigación, aunque un poco antes, el 22 de abril de 1970, veinte millones de ciudadanos estadounidenses habíandemandado la creación de una agencia gubernamental para la atención de los asuntos ambientales, en la que hoy se considera la primera celebración del Día de la Tierra, lo cual derivó en la creación de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency) en dicho país.

La preocupación sobre la situación del ambiente se llevó con carácter de alarma a la *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano*, en Estocolmo en 1972, ante la publicación de numerosos trabajos científicos que alertaban sobre el deterioro ambiental del planeta. Entre ellos destacan las obras de Barry Commoner,<sup>3</sup> Rachel Carson,<sup>4</sup> Edward Goldsmith<sup>5</sup> y E. F. Schumacher.<sup>6</sup>

Eran tiempos en los que las Naciones Unidas decidieron atender lo que parecía ser un hecho: el equilibrio ecológico del planeta se perdía, y los seres humanos con nuestro modo de vida teníamos una responsabilidad en ello.

Ahí nació el ecologismo, ante el grito de miles de jóvenes que promulgaron: ¡no tenemos más que un solo planeta! Militantes de izquierda, pacifistas, feministas, hippies, biólogos y místicos, se reunieron ante las puertas de la conferencia oficial con una coincidencia: la defensa del medio ambiente era impostergable. De golpe, el ecologismo alcanzó una dimensión contestataria, ciudadana y transnacional.

A partir de los años setenta y ochenta empezaron a surgir en todo el mundo organizaciones de la sociedad civil que se movilizaron para concientizar a la sociedad sobre la importancia de proteger el medio ambiente, y para proponer a los gobiernos acciones para revertir el deterioro ecológico. Estos grupos fueron bautizados en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) realizada en Río de Janeiro en 1992, como organismos no gubernamentales (ONG).

Durante la década de los ochenta surge el movimiento ecologista en México, motivado por el rechazo a la instalación de la planta nuclear en Laguna Verde, y en los últimos 20 años, la problemática ambiental de nuestro país se ha consolidado como una de las preocupaciones más significativas de nuestra sociedad.

Durante los últimos diez años, y a partir de la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, en 1992, el desarrollo de las organizaciones ambientalistas ha sido vertiginoso: se han multiplicado en número y en lugares; han especializado sus causas, algunas hacia los temas *verdes*, como la conservación de la biodiversidad y la protección de especies en peligro; otras hacia temas *cafés*, como la contaminación del aire y el agua, o el manejo de sustancias tóxicas; otras más trabajando temas transversales, como la educación ambiental o la legislación ambiental; algunas de éstas organizaciones se han profesionalizado e institucionalizado hasta contar con importantes estructuras y presupuestos, y otras incluso se han internacionalizado para enfrentar la batalla contra el deterioro ecológico de manera global.

En el mundo, la democratización política ha avanzado para ofrecer a los grupos de la sociedad la oportunidad de intervenir más directamente en la toma de decisiones, y a partir de los noventa en México comienzan a abrirse espacios de participación pública.

Ante el alejamiento del Estado y la sociedad, las ONG se convierten en catalizadoras de algunas demandas públicas y ciudadanas. Lejos de actuar en los espacios tradicionales de intermediación utilizados por los sindicatos, las confederaciones o los grupos de presión, las organizaciones de la sociedad civil crean un nuevo sector que con el tiempo se ha convertido en un interlocutor obligado del gobierno y ha generado capacidades para generar recursos privados dirigidos al beneficio colectivo, para desarrollar directamente programas sociales muy diversos con bajos costos y alta eficiencia, para generar opinión pública y exponer sus inconformidades en los medios de comunicación, y para negociar sus iniciativas y sus acuerdos con los poderes ejecutivo y legislativo.

En el ámbito internacional, actualmente casi todas las reuniones de las Naciones Unidas cuentan con espacios públicos de participación, y existen organizaciones civiles que trabajan, algunas con los gobiernos, otras cuestionándolos, y otras más haciendo ambas cosas (cuando la madurez gubernamental lo permite), para cumplir con sus misiones.

Pero... ¿en qué consiste la demanda ambiental y por qué requiere de una tarea cívica comprometida? Sin duda, la causa ambiental será una de las que más movilicen a la sociedad en el siglo XXI, primero, porque no ha tenido la suficiente jerarquía en los gobiernos, y por ello el deterioro ambiental avanza sin obstáculos; segundo, porque los problemas ambientales, hoy por hoy, rebasan la frontera de la relación hombre-naturaleza, pues afectan la calidad de vida de la gente, ponen en tela de juicio las decisiones económicas y los modelos de desarrollo vigentes, plantean importantes retos culturales, y atentan contra la supervivencia del hombre y del planeta.

El tema ambiental se conecta inevitablemente con los intereses básicos de la gente, tanto en lo social (posibilidades de desarrollo, crecimiento económico, propiedad colectiva de los recursos naturales como bienes públicos, demanda de servicios agua, energía, turismo), como en lo individual (consumo de productos seguros, protección de la salud, desarrollo de una cultura que privilegia “lo natural”, rescate de valores tradicionales “de contacto” con la naturaleza).

## LOS GRUPOS AMBIENTALISTAS Y EL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN LA ESCENA INTERNACIONAL

El reconocimiento científico de que la temperatura de la superficie del planeta se eleva por causas antropogénicas, ha enfrentado a las organizaciones ambientalistas a fuertes retos, pues es un problema ambiental multicausal, que involucra, por un lado, temas *verdes* como la deforestación, y por otro temas *cafés*, como son las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Es también un fenómeno con causas y consecuencias que no se restringen al ámbito ecológico, sino que afectan de manera importante otros aspectos sociales tales como la autosuficiencia alimentaria, la seguridad, el uso del suelo, la salud, el desarrollo, el transporte, la energía, la biodiversidad, etc. Además es un fenómeno global cuyos efectos no se dejan ver precisamente en donde se ocasiona el problema, sino en otras partes y en lapsos muy inciertos.

La socialización del discurso sobre cambio climático y la movilización ciudadana en su favor, representan retos importantes para las organizaciones ambientalistas en el mundo entero. Siguiendo a Gough y Shackley,<sup>7</sup> algunos de estos retos son:

- Las causas del problema son globales en su origen y se encuentran altamente distribuidas en las sociedades, por lo que no hay “culpables” tangibles y es difícil encontrar enemigos precisos contra quienes combatir.
- Los temas a tratar son complejos y se han tornado altamente técnicos en su discusión y análisis. Su explicación debe procesarse didácticamente para ser comprendidos cabalmente por el público.
- Los impactos locales del cambio climático no se prevé que sean muy dramáticos en el corto plazo. Para concientizar a la población sobre los efectos del cambio climático y promover la adaptación de las comunidades al fenómeno, será necesario recurrir a instituciones académicas y científicas que puedan ofrecer ejemplos concretos y demostrados.
- Las formas de atacar el problema son muy variadas. No existen soluciones únicas, políticas obvias, o tecnologías que resolverán el asunto de una vez por todas. La respuesta al cambio climático, entonces, requiere considerar separadamente medidas de mitigación y de adap-

tación, y en ambos casos son muchas las opciones y las razones para adoptar una u otras soluciones.

Cuando abordamos el problema del calentamiento global, ya no estamos requiriendo de la sociedad su conciencia ecológica, como pudo pretender el espíritu inicial del ecologismo, cuando se proponía cuidar los árboles, respetar a los animales o no tirar basura en la calle. Aunque importantes, éstos resultan problemas sencillos de resolver, ante la erosión y empobrecimiento de nuestros suelos por la utilización de plaguicidas; el calentamiento global, que según las predicciones ocasionará sequías, inundaciones, enfermedades, pobreza y extinción de ecosistemas; la pérdida de la autosuficiencia alimentaria por la utilización globalizada de semillas transgénicas; el desabasto de agua que en pocos años enfrentaremos, o los efectos de una crisis energética mundial.

Por ello, el problema del cambio climático global es una de las causas ambientales más complejas, y que implicará más activismo social en los próximos 20 años, ya que su solución requiere de la convergencia de diversas medidas, que van desde revertir la pérdida de la superficie forestal en el mundo, hasta reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y desarrollar las energías renovables lo antes posible.

Esto representa un esfuerzo sin precedentes de índole política y económica, pues los altos niveles de vida en países desarrollados descansan sobre la quema de combustibles fósiles, y las energías renovables continúan fuera del mercado; los países pobres tienen derecho al desarrollo, pero quizá no tendrán las mismas oportunidades de desarrollarse a costa de emitir GEI, además de que están viendo avanzar la deforestación de manera vertiginosa, ante la necesidad de sobrevivencia de su población más empobrecida, y a la falta de recursos para ofrecer a éstas comunidades alternativas de desarrollo distintas al aprovechamiento indiscriminado de sus recursos naturales. Además, en el mundo actual, con economías petrolizadas, sociedades dinerarias y consumistas, y prioridades cada vez más tendentes a la guerra y la destrucción, tendrá que hacerse acopio de muchos principios y valores para actuar en beneficio colectivo.

Por ello, las negociaciones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático Global ([www.unfccc.int](http://www.unfccc.int)), y su Protocolo de Kioto, han sido muy complicadas, y lejos de ser terreno fértil para ir experimentando cómo lograr el desarrollo sustentable, han evidenciado la poca

voluntad política existente para integrar lo ambiental a las políticas económicas. Consideramos que la forma como se resuelvan las controversias que se han generado en torno a estos instrumentos, será decisiva para determinar la viabilidad del desarrollo sustentable en el mundo.

En estas circunstancias, las ONG juegan un importante papel, pues son la voz de un considerable conjunto de ciudadanos que no se sienten adecuadamente representados por sus Estados. Su acción es muy efectiva cuando logran presionar a los gobiernos mediante la opinión pública para influir en sus decisiones, sobre todo en las negociaciones internacionales. En materia de cambio climático, las ONG han ido jugando un rol cada vez más trascendente en las negociaciones de la Convención Marco y de su Protocolo de Kioto, al monitorear el cumplimiento de los acuerdos, dando seguimiento a su ratificación, observando los resultados de la instrumentación de acciones y compromisos, entre otras actividades. De acuerdo con Kal Raustiala, dicha participación de las ONG incrementa la habilidad tanto técnica como política de los Estados para ir reglamentando los tratados internacionales.<sup>8</sup>

Las ONG intervienen en las Conferencias de las Partes (comúnmente llamadas CoP) organizadas por la ONU para que los países avancen en los acuerdos firmados en Río de Janeiro (Agenda 21, Convenio sobre Biodiversidad, Convención sobre Cambio Climático, Declaración sobre Bosques, Convenio sobre Desertificación y Carta de la Tierra). En especial en las *Conferencias de las Partes sobre Cambio Climático*, las ONG han venido realizando eventos paralelos, con el cabildeo de políticas con las delegaciones de los países participantes, editando boletines (ECO), dando seguimiento a las posiciones de los gobiernos y del sector privado, también con interlocución continua con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)) organismo asesor integrado por científicos y expertos, desarrollando sus capacidades científicas, y proponiendo alternativas y soluciones a los complicados laberintos en que se ha convertido el Protocolo de Kioto.

## TIPOS DE ONG Y SUS MÉTODOS

En términos generales, y excepto por la participación de ONG de países insulares, del Tata Energy Research Institute y del Centre for Science and Environment de la India, las organizaciones ambientalistas que han desarrollado un trabajo sistemático y permanente en materia de cambio climático,

y que han sido líderes en las campañas para lograr compromisos de los gobiernos, son las grandes coaliciones ambientalistas internacionales como World Wide Fund for Nature (WWF)<sup>9</sup> ([www.panda.org](http://www.panda.org)), Greenpeace Internacional ([www.greenpeace.org](http://www.greenpeace.org)) y Friends of the Earth ([www.foei.org](http://www.foei.org)), surgidas en países desarrollados.

De acuerdo con Clair Gough y Simon Shackley, existen tres diferentes tipos de ONG participando en asuntos de cambio climático con influencia internacional:

1. Activistas. Grupos ecologistas como los arriba mencionados, con alta presencia en la opinión pública, alta capacidad de investigación y que desarrollan estrategias de movilización social y de mercadotecnia comunicativa para promover sus causas.
2. Grupos de científicos y analistas. Versados en la técnica y política del cambio climático, con capacidad de discutir temas específicos con líderes de alto nivel, como por ejemplo The Pew Center on Global Climate Change ([www.pewclimate.org](http://www.pewclimate.org)), el Worldwatch Institute ([www.worldwatch.org](http://www.worldwatch.org)), el World Resources Institute ([www.wri.org](http://www.wri.org)), el Tata Energy Research Institute ([www.teriin.org](http://www.teriin.org)) y el Centre for Science and Environment ([www.oneworld.org/cse/](http://www.oneworld.org/cse/)).
3. Alianzas de empresarios. Representan los intereses del sector privado. Algunas de ellas son: The Global Climate Coalition ([www.globalclimate.org](http://www.globalclimate.org)), el World Business Council for Sustainable Development ([www.wbcsd.ch/aboutus.htm](http://www.wbcsd.ch/aboutus.htm)), y el Business Council for a Sustainable Energy Future ([www.bvse.org](http://www.bvse.org)).<sup>10</sup>

Siguiendo a Gough y Shackley,<sup>11</sup> las ONG desarrollan diferentes métodos o estrategias donde utilizan distintos especialistas profesionalizados para penetrar en audiencias diversas y movilizarse conforme al contexto político. Entre estas estrategias se mencionan:

- a) Creativas políticas de solución. Se elaboran propuestas, se analizan los temas y conceptos desde distintas perspectivas, se plantean soluciones alternativas a los problemas que enfrentan las negociaciones de cambio climático, etc.
- b) Construcción de conocimiento. Por medio de documentos se introducen nuevas evidencias para probar teorías que apoyan o desaprue-

ban determinadas propuestas. La legitimidad de esta estrategia depende de la independencia y objetividad de los autores de los documentos y de la solidez de sus investigaciones.

- c) Cabildeo y campañas. Utilizando tecnologías de mercadeo se forma opinión pública respecto de los asuntos ambientales, “vendiendo” al público la gravedad de la problemática planteada e involucrándolo en la necesidad de participar.

## PRAGMATISMO CIENTÍFICO *VERSUS* EQUIDAD NORTE-SUR

La Red de Acción Climática (Climate Action Network o CAN, por sus siglas en inglés) ([www.climatenetwork.org](http://www.climatenetwork.org)), fue creada en 1989 y ha participado activamente en las Conferencias de las Partes sobre Cambio Climático (CoP), desde la CoP 1 en Berlín en 1995. En dicha ocasión, el CAN reunió en consenso a las organizaciones ambientalistas para llamar la atención de los gobiernos sobre la importancia de reconocer que los países desarrollados no podían resolver solos el problema del cambio climático global. Sin embargo, después de Berlín los intereses del sector privado y la complejidad científico-teórica del tema hicieron que el papel de las organizaciones de la sociedad civil fuera de bajo perfil.

Las organizaciones de los países desarrollados, o “del norte”, comenzaron a dominar el CAN, pues tuvieron los suficientes recursos económicos para contar con personal técnico altamente calificado, que de tiempo completo se dedicó a seguir las negociaciones, a analizar la Convención Marco y a cabildear. Las organizaciones de los países en desarrollo, o “del sur”, se limitaron a aceptar la agenda de trabajo que establecieron las organizaciones “del norte”, aunque esta agenda en un principio soslayaba el tema de la equidad<sup>12</sup> en la determinación de los compromisos de cada país para reducir su emisión de gases de efecto invernadero.<sup>13</sup>

Aunque el CAN ha jugado un importante papel en las negociaciones, es necesario decir que las posiciones de los grupos ambientalistas que participan en las cumbres no siempre son las mismas. De hecho, en materia de cambio climático se distinguen muy drásticamente las visiones de los países llamados “del norte” (desarrollados) de las “del sur” (en desarrollo). Un claro ejemplo ha sido la inclusión de sumideros<sup>14</sup> en el Mecanismo de Desarrollo Limpio<sup>15</sup> (MDL) que prevé el Protocolo de Kioto. Las organizaciones “del norte” (que además son las más fuertes y dominan el CAN) proponían la



exclusión de los sumideros del MDL, con el argumento de que ello obligaría a los países desarrollados al progreso inmediato de las energías renovables para el cumplimiento de sus compromisos de reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Se argumentaba que la inclusión de sumideros en el MDL continuaría la tendencia a emitir GEI, pues se tendría la coartada de “comprar” la captura del carbono emitido en exceso. El punto de vista de las organizaciones “del sur” era distinto, pues la inclusión de los sumideros en el MDL favorecería la asignación de recursos económicos a proyectos de captura de carbono en zonas boscosas, cuyos habitantes viven en muchas ocasiones en extrema pobreza, viéndose obligados a aprovechar sus recursos naturales (en éste caso a talar los árboles) para sobrevivir. Finalmente las actividades de aforestación y reforestación han sido incluidas en el mecanismo, pero con enormes restricciones.

En ocasiones, las organizaciones “del norte” y el CAN han sido criticadas por perder de vista el objetivo final de las negociaciones en la Convención, que es *lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático*.<sup>16</sup> Han interpretado este objetivo pragmáticamente, olvidando que para lograrlo es necesario tener en cuenta que los países tienen distintos niveles de responsabilidad en el problema y que sus posibilidades de participar en las reducciones son muy diferentes.

Ante la actitud del gobierno de los Estados Unidos de no ratificar el Protocolo de Kioto si los países en desarrollo no aceptan algunos compromisos para reducir GEI, la discusión de las últimas Conferencias se ha concentrado en la decisión de este país de ratificar el Protocolo de Kioto.

Esta situación provocó que muchas organizaciones “del sur” se desprendieran del CAN, por considerar que el pragmatismo que dominaba a los grupos “del norte” soslayaba el tema de la equidad en las negociaciones, y llevaba al CAN a trabajar únicamente lo concerniente estrictamente a lo “ecológico” del cambio climático, sin entrar al fondo del problema, en donde definitivamente las inequidades han contado mucho y determinan la viabilidad de las estrategias para combatir el calentamiento global.

Algunas ONG “del sur” animadas por el Centre for Science and Environment (CSE) se juntaron en 1994 en Nueva Delhi para expresar la necesidad de equidad en el marco de las negociaciones de la Convención, en general, y en los mecanismos de comercio de emisiones incluidos en el Protocolo de Kioto en particular. Ahí formaron el Grupo de Equidad Sudasiático,

el cual se expandió durante la CoP 4, en Buenos Aires, dando lugar al Grupo de Equidad Atmosférica que actualmente cuenta con participantes de todo el mundo e interesados en promover la equidad en las negociaciones sobre cambio climático. Sin embargo, el CSE también ha sido criticado severamente por adoptar posiciones muy radicales en sus propuestas sobre equidad.

Algunas ONG internacionales comenzaron a desarrollar mucha experiencia en materia de política y ciencia del cambio climático, y sus expertos comenzaron a integrarse a lo que se ha denominado la “comunidad epistémica”.<sup>17</sup> Esta comunidad se ha convertido en una fuerza con enorme influencia en las negociaciones, cuyo bastión para defender sus argumentos es el apego al conocimiento científico en la materia, a diferencia de quienes incorporan contenidos éticos a sus propuestas, análisis y argumentaciones.<sup>18</sup>

Ante el distanciamiento de organizaciones “del sur” del Climate Action Network (CAN), antes de la CoP 6, que se realizó en Bonn en el año 2000, el CAN intentó formar un Grupo de Trabajo sobre Equidad. Sin embargo, la convocatoria en un principio no fue atendida por las organizaciones “del sur”. Ante las críticas de que el CAN continúa trabajando fuertemente vigilando las negociaciones en temáticas para iniciados, como lo son las condiciones para incluir sumideros en el MDL, el comercio de emisiones, las líneas base, la evaluación del cumplimiento, los mecanismos flexibles, el “aire caliente” o *hot air*, entre otros temas, y de que continúa adoleciendo de un análisis político y social que incorpore principios de equidad entre las naciones participantes, el CAN sostuvo una reunión especial sobre equidad en mayo del 2002, en el marco de la Cuarta Reunión Preparatoria que se realizó en Bali, Tailandia, rumbo a la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible que se llevó a cabo en agosto del 2002 en Johannesburgo.

#### ANÁLISIS REGIONAL DE LA PARTICIPACIÓN DE ONG EN CAMBIO CLIMÁTICO POR MEDIO DE LA RED DE ACCIÓN CLIMÁTICA (CLIMATE ACTION NETWORK)

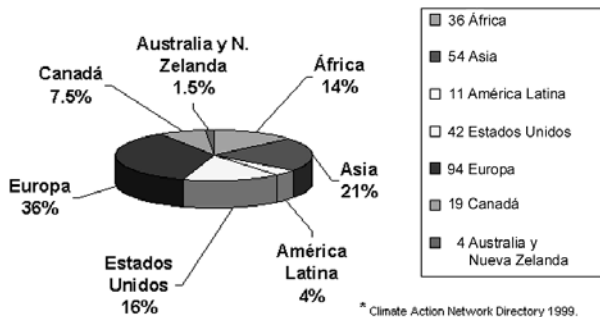
Actualmente existen cerca de 320 organizaciones de los cinco continentes que pertenecen al CAN, que sin duda es la alianza más importante de organizaciones ambientalistas en materia de cambio climático. La composición y áreas de trabajo de las organizaciones que pertenecen al CAN nos dicen mucho sobre lo que hacen las organizaciones ambientalistas, e ilustran los

rezagos que enfrentamos en América Latina y en México en cuanto a la incorporación del tema en la agenda de los grupos.

Como podemos observar en la figura 1, es en Estados Unidos donde en 1999 había un mayor número de organizaciones trabajando sobre cambio climático, pues contaba con 42 grupos que representaban 16% del total existente. En Europa existía también un importante número de grupos (94) que representaban 36% del total. Para esa época, en América Latina se registraban únicamente 11 grupos como miembros del CAN, aunque es importante destacar que a raíz de la Cuarta Conferencia de las Partes (CoP 4) realizada en 1998 en Buenos Aires, Argentina, en este país se involucraron en el tema más de 60 organizaciones que se unieron en una importante coalición llamada el Foro del Buen Ayre ([www.foroba.org.arg](http://www.foroba.org.arg)), siendo actualmente las organizaciones argentinas de las más activas en Latinoamérica.

Sin embargo, la participación de las organizaciones latinoamericanas en las negociaciones del clima ha sido muy pobre. Incluso han quedado al margen de los debates norte-sur que han enfrentado al CAN con organizaciones pertenecientes a países en desarrollo de la India, Asia y África. Aunque la Red Latinoamericana de Acción Climática (RELAC), que es la división regional del CAN, cuenta con una importante membresía de organizaciones, son pocas las que están verdaderamente involucradas en las negociaciones, y están sumamente desorganizadas. Las ONG que la conforman no han tenido la capacidad de establecer una estructura organizativa básica para la Red, ni un

GRÁFICA 1. DISTRIBUCIÓN POR REGIÓN DE ORGANIZACIONES DEL CLIMATE ACTION NETWORK EN 1999\*



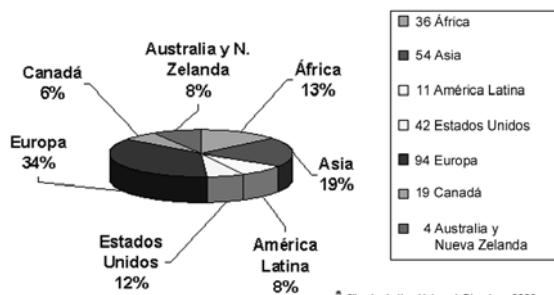
mecanismo de elección claro de sus dirigentes. Mucho menos han logrado consensuar una postura que defienda los intereses comunes de la región.

Como podemos observar en la figura 2, para el año 2000 el número de organizaciones participantes en el CAN se incrementó considerablemente. De 260 que aparecen en el directorio de 1999, se elevaron a 324 para el año 2000, lo que significa un aumento de casi 25%. Lo anterior, debido a la relevancia que ha venido adquiriendo el tema, pero también a que las organizaciones ambientalistas han ido incorporándose poco a poco a demandar la ratificación del Protocolo de Kioto y a la ejecución de proyectos sobre el tema.

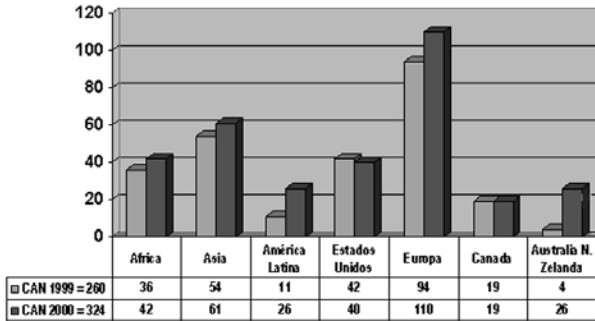
Como lo indica la figura 3, en donde comparamos el número de organizaciones por región que componían el CAN en 1999 y en el 2000, casi en todo el mundo se incrementó ligeramente el número de organizaciones participantes, excepto en los Estados Unidos, que disminuyó de 42 a 40 grupos, y en Canadá, que permaneció igual. En América Latina se duplicaron las organizaciones miembros del CAN, y en Australia y Nueva Zelanda se multiplicó dicho número por seis.

La participación de las organizaciones africanas y asiáticas en asuntos de cambio climático ha sido nutrida, aunque sin comparación con el número de organizaciones del mundo desarrollado. Lo anterior, en el caso africano, debido a las importantes amenazas de elevación de las temperaturas en un continente ya de por sí caliente, y en el caso asiático por los riesgos de inundaciones que presentan algunos países insulares del continente.

GRÁFICA 2. DISTRIBUCIÓN POR REGIÓN DE ORGANIZACIONES DEL CLIMATE ACTION NETWORK EN 2000\*



GRÁFICA 3. INCREMENTO DE ORGANIZACIONES QUE PERTENECEN AL CLIMATE ACTION NETWORK DE 1999 A 2000\*



\* Climate Action Network Directory 2000.

En América Latina, lamentablemente las organizaciones ambientalistas no han tomado la causa como propia, aun cuando las afectaciones por sequías, inundaciones y pérdida de la diversidad biológica pueden ser muy serias si continúa elevándose la temperatura del planeta. Sin embargo, en países como Argentina, Uruguay, Chile, Costa Rica, Brasil y Venezuela, aunque cuentan con pocas organizaciones involucradas en el tema de cambio climático, éstas son activas y han desarrollado importantes capacidades y proyectos.

### LAS ONG MEXICANAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

El caso mexicano es distinto. El tema del cambio climático está siendo reivindicado con un peso mayor por instituciones académicas, y desde la sociedad civil, por académicos y científicos que participan en grupos ambientalistas o que pertenecen a organizaciones civiles que realizan proyectos productivos. El abordaje se ha hecho en casos prácticos por parte de comunidades aliadas con instituciones académicas, que participan en proyectos de instrumentación conjunta para reducir el cambio climático con acciones de reforestación para la captura de carbono.<sup>19</sup> Aun así, existen pocas organizaciones ambientalistas que están involucradas en este tipo de acciones. Las únicas organizaciones mexicanas que participan en el CAN y en la Red Latinoamericana de Acción Climática son el Grupo de Estudios

Ambientales ([www.laneta.apc.org/gea](http://www.laneta.apc.org/gea)) y la Unión de Grupos Ambientalistas ([www.union.org.mx](http://www.union.org.mx)), cuyo trabajo ha sido, desde 1999, sensibilizar a sus miembros sobre el problema del cambio climático por medio de la realización de seminarios, mesas redondas y foros.

Aunque son muchas las voces que se pronuncian por que los gobiernos emprendan acciones más concretas para evitar el calentamiento global, en la sociedad civil mexicana predomina el interés individual por el tema, y la actividad científico-académica, quedando la participación ciudadana y la movilización de las organizaciones ambientalistas en un plano muy menor.

#### ACTIVIDADES DE LAS ONG EN MATERIA DE CAMBIO CLIMÁTICO

Pero, ¿cuál es el papel que pueden jugar las ONG y por qué es importante? En otras latitudes, las organizaciones que están participando realizan distintas acciones. Regresando a las que pertenecen al CAN, en un análisis que hemos hecho de las actividades que las organizaciones reportan en su directorio del año 2000, encontramos que las acciones más desarrolladas (véase el Cuadro 1).

En México, una de las acciones urgentes que los grupos ambientalistas deben realizar es el apoyo a la construcción de capacidades en todos los sectores sociales para enfrentar el problema: la difusión de información, sensibilización y concientización social, capacitación de actores y educación ambiental son actividades con una alta vocación cívica que pueden ser incorporadas a las agendas ecologistas.

#### EL ACTIVISMO DE LAS ONG AMBIENTALISTAS: PRESIÓN POLÍTICA Y MOVILIZACIÓN SOCIAL

Además de estas tareas permanentes, el trabajo de gestión y cabildeo que deben hacer las organizaciones ambientalistas para presionar a los gobiernos en la ejecución de acciones contundentes para combatir el calentamiento global es importantísimo.

Hasta la fecha, la presión de los grupos ecologistas en las Conferencias ha sido importante gracias a la intensa labor de cabildeo y a la coalición de organizaciones unidas al Climate Action Network. Algunas de las acciones más llamativas se describen a continuación:

1993-2004: Boletín ECO

CUADRO 1. ACCIONES DESARROLLADAS POR LAS ORGANIZACIONES EN EL MUNDO

ACTIVIDAD	ÁFRICA	ASIA	EUROPA	AMÉRICA LATINA	EUA Y CANADÁ	OCEANÍA
1. Ciencia climática	-	++	+	+	+	++
2. Convención Marco y Protocolo de Kioto	+	-	+	+	+	-
3. Monitoreo de gases	-	-	-	-	-	-
4. Energía	++	++	++	+	++	++
5. Transporte	-	-	++	-	++	++
6. Agricultura	++	-	+	-	-	++
7. Forestería	++	++	+	+	-	+
8. Salud	-	-	-	-	-	-
9. Inundaciones y zonas costeras	-	-	-	-	-	+
10. Mecanismos flexibles	-	-	++	+	++	+

++Actividad que realizan 2/3 de las organizaciones de la región.

+Actividad que realizan la mitad de las organizaciones de la región.

-Actividad que realizan menos de la mitad de las organizaciones de la región.

Una de las acciones más sistemáticas e importantes que ha utilizado el CAN para exponer los puntos de vista y preocupaciones de las organizaciones ambientalistas que participan en esta red, es la edición del Boletín ECO ([www.igc.org/climate/Eco.html](http://www.igc.org/climate/Eco.html)), el cual ha sido publicado diariamente durante todas las Conferencias de las Partes sobre Cambio Climático, desde 1993 hasta la fecha. El boletín se distribuye ampliamente a los participantes de las negociaciones, incluyendo a los delegados gubernamentales, y contiene la descripción de las negociaciones al día, editoriales sobre temas polémicos, cuestionamientos a posturas de distintos gobiernos, propuestas, caricaturas, fotografías, el anuncio del fósil del día, entre otras cosas. Ha sido un instrumento de enorme trascendencia para hacer valer la presencia de las ONG en las conferencias.

#### Premio al “Fósil del día” (Fossil of the day)

Los premios “Fósil del día” son presentados por el CAN durante el periodo de negociaciones de las Naciones Unidas sobre cambio climático, en las

Conferencia de las Partes (CoP) de la convención y en el Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico (SBSTA). Durante dichas negociaciones, las organizaciones del CAN diariamente votan para elegir al país peor portado del día. Una vez seleccionados los tres primeros lugares, se ofrece una conferencia de prensa donde los voceros de los ecologistas hacen público el nombre del ganador. Los premios van desde pequeños cactus CoP8 en Nueva Delhi, tabiques de carbón en SBSTA-12 en Bonn, marionetas en SBSTA-13 en Lyon, costales de arena en CoP6 en La Haya, entre otros. La suma de los premios que obtiene cada país se hace al final de cada periodo de negociaciones y se premia a los tres países que acumularon más premios, obteniéndose así al gran ganador de cada periodo.

Esta actividad ha tenido gran difusión y aceptación desde su inicio en la CoP-5, 1999, en Bonn, promovido por el Foro Alemán de ONGS. Desde entonces se ha convertido en un evento reconocido y respetado por todos, logrando evidenciar la poca disposición de algunos países para avanzar en las negociaciones.

#### CoP 6: El dique holandés

Los países que más acumularon premios fueron Canadá, Japón y Estados Unidos, representando al Grupo “Umbrella”; se les premió por retrasar las negociaciones durante los últimos años, por conseguir que se re escribiera el Protocolo de Kioto para incluir diferentes actividades de secuestro de carbono del art 3.4, y por no poner un limite en el uso de los mecanismos flexibles. Además se le dio un reconocimiento especial al presidente de la CoP6 por no haber logrado un acuerdo político entre los países y postergar este periodo de negociaciones a seis meses después.

Un evento particular de la CoP6 fue cuando miles de personas se reunieron en La Haya el 18 de noviembre del 2000, para expresar su preocupación sobre la problemática del cambio climático y sobre las decisiones que se iban a tomar durante estas negociaciones.

Miles de activistas, en su mayoría europeos, construyeron un dique formado por alrededor de 50,000 costales de arena que media aproximadamente un metro y medio de altura por cuatrocientos metros de largo. Se organizó una cadena humana para construir el dique enfrente del centro de convenciones donde se estaban llevando a cabo las negociaciones.



El dique representaba un instrumento de defensa en contra del aumento del nivel del mar, efecto que eventualmente será causado por el cambio climático. El principal coordinador de la manifestación fue Amigos de la Tierra Internacional (Friends of the Earth) ayudado por ambientalistas, organizaciones de derechos humanos, grupos antinucleares, partidos socialistas, grupos en favor de la mujer, grupos pro-animales, grupos en contra del libre mercado, etc.

#### CoP 6.5: El Arca de la Vida en Bonn (Lifeboat)

Los países más premiados en esta sesión fueron Estados Unidos, Canadá y Australia. Esta reunión es considerada como el parteaguas de las negociaciones de cambio climático, y se otorgó el premio "Fósil del siglo" a Estados Unidos, por abandonar el Protocolo de Kioto y retrasar las negociaciones de cambio climático. Muchos estadounidenses y la comunidad internacional reprobaron esta acción; los estudiantes que participaron en la CoP 6.5 entregaron este premio, y reprobaron la decisión de abandonar las negociaciones. Además hicieron un llamado a la comunidad internacional para avanzar con el Protocolo de Kioto sin Estados Unidos.

Una acción muy impresionante realizada en la CoP 6.5 en Bonn, en julio del 2001, fue la construcción del Arca de la Vida (Lifeboat), que fue convocada mundialmente por Friends of the Earth International (Amigos de la Tierra Internacional) y por Freunde der Erde BUND (Amigos de la Tierra de Alemania). El 21 de julio se unieron 4,000 activistas de más de 30 países en el centro de Bonn, Alemania, donde construyeron esta especie de arca de Noé, evocando la necesidad de salvar a un ejemplar de cada especie ante un diluvio ocasionado por el cambio climático. Esta arca, que alcanzó 30 metros de largo, 6 de ancho y 5 de altura, y localizada a 4 kilómetros del sitio donde se celebraba la Conferencia de las Partes sobre Cambio Climático, fue construida con tablitas de madera en las que los ciudadanos y activistas participantes escribieron leyendas exhortando a las naciones a salvar el planeta y evitar el calentamiento global. Durante la construcción, líderes del movimiento ambientalista del todo el mundo expresaron mensajes sobre los efectos devastadores que puede tener el calentamiento global en los países en desarrollo. La construcción del arca fue una manifestación pacífica para exigir a los gobiernos la ratificación

del Protocolo de Kioto, pero que además fungió como una actividad de sensibilización y educativa.

#### CoP 7: Marrakech

Los premios fueron para Japón, Rusia y Canadá. Rusia en particular, por no comprometerse en lograr un acuerdo en Marrakech y por no querer prepararse para la ratificación y entrada en vigor del Protocolo.

Canadá por tratar de bloquear el derecho de las comunidades locales de opinar en la aprobación de los proyectos del MDL que les afecten. También por no querer un sistema de cumplimiento obligatorio y proponer uno voluntario.

#### CoP 8: el Fósil del día

En Nueva Delhi, en el 2002, se continuó otorgando el premio Fósil del día. El primer lugar lo obtuvo Estados Unidos por su comportamiento anti-Kioto durante los 10 días de negociaciones.

El segundo lugar, las organizaciones civiles se lo dieron a Arabia Saudita por oponerse a incluir referencias de la tercera Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático en la Declaración de Nueva Delhi. El tercer lugar lo obtuvo Canadá por sus impactos negativos de los primeros tres días de las negociaciones, en los cuales propuso que la secretaría no considerara propuestas de los no miembros de la convención, como ONGS, para la definición de las reglas finales del Protocolo de Kioto.

#### CoP 9: el Fósil del día continúa

El primer premio en este periodo de negociaciones fue para Estados Unidos junto con el grupo de la OPEP por tratar de desviar la atención en las negociaciones donde se planteaba la necesidad mitigar emisiones ahora, y usar nuevas tecnologías, energía renovable y eficiencia energética. Estados Unidos intentó introducir nuevamente el tema de energía nuclear para alcanzar los objetivos del Desarrollo Sustentable.

Arabia Saudita, por insistir en un “reparto justo” del Fondo Especial para Cambio Climático.

Canadá también lo obtuvo por su actuación en el último grupo de contacto del MDL y por no oponerse a la exclusión específica de Organismos Genéticamente Modificados (OGM), dejando vacíos para poder utilizar OGM en proyectos de MDL alrededor del mundo.

## RETOS DE LAS ONG ANTE LAS NEGOCIACIONES SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

Más allá de las coincidencias o divergencias entre distintas ONG, vale la pena reconocer que uno de sus principales roles, tanto en las negociaciones de cambio climático como en las que se refieren a la utilización de organismos genéticamente modificados (que se desarrollan en el seno de la Convención Marco sobre Biodiversidad), es el de unir esfuerzos para exigir la aplicación del Principio 15 de la Declaración de Río, donde se establece la necesidad de aplicar el criterio de precaución a falta de evidencias científicas contundentes sobre las consecuencias ambientales de ciertas actividades humanas.<sup>20</sup>

Por otro lado, desafortunadamente las reglas que finalmente se establecieron en el MDL sobre participación pública son inciertas y auguran un bajo perfil de la participación social en el tema. En muchos de los casos, dichas reglas son peores a las establecidas por las instituciones financieras multilaterales. Por ejemplo, el tiempo que se ponen a consulta pública los proyectos es de 30 días, mucho menor al que establece el Banco Mundial en sus programas.

Una dificultad muy importante para las organizaciones ambientalistas locales, será que tendrán que comentar materias tan especializadas como financiamiento de carbono, líneas base y adicionalidad, lo cual será muy complicado para aquellas que no cuentan con información y capacitación sobre el tema. Aquí se requerirá el trabajo comprometido de las organizaciones que han venido adquiriendo conocimiento y experiencia en el tema, para asesorar a pequeños grupos que deberán emitir sus opiniones de los proyectos en sus comunidades.

No obstante, el MDL ha previsto dos instrumentos para dar voz a las comunidades donde se realizarán los proyectos, para que participen en ellos (o se opongan a ellos) y para que los monitoreen. Estas iniciativas son el Monitoreo del MDL (CDM Watch [www.cdmwatch.org](http://www.cdmwatch.org)) y el Monitoreo de sumideros (Sinks Watch [www.sinkswatch.org](http://www.sinkswatch.org)). La primera proveerá informa-

ción fácil de utilizar en varios idiomas sobre el MDL y sobre los derechos de los ciudadanos afectados, servirá de sitio de consulta de los proyectos del MDL en todo el mundo. La segunda se enfocará a hacer un escrutinio de los proyectos de captura de carbono particularmente en el MDL, y sus principales actividades serán documentar los impactos sociales y ambientales de las plantaciones forestales a larga escala, y trabajar con las comunidades locales afectadas por impactos negativos potenciales de dichas actividades.<sup>21</sup>

Finalmente es importante destacar que aunque la participación de la sociedad civil organizada en materia de cambio climático se está desarrollando principalmente en el ámbito de las negociaciones internacionales de la Convención Marco y del Protocolo de Kioto, los grupos ambientalistas no debieran restringir su actividad a éstos instrumentos. Plantear otros escenarios de participación, llevar el tema a otras instancias de negociaciones locales, regionales y multilaterales, y realizar tareas al interior del país para el involucramiento de los ciudadanos en tareas de prevención y adaptación son asignaturas pendientes de las ONG en el tema.

## Notas

---

- \* Martha Delgado es diputada local electa, directora ejecutiva de Presencia Ciudadana Mexicana, A.C. y Presidenta de la Unión de Grupos Ambientalistas, I.A.P.
- 1. D. H. Meadows, *et al.* 1972. *Los límites del crecimiento*. Nueva York: Universe Books.
- 2. D. Simmonet. 1987. *En busca de la naturaleza perdida. El ecologismo*. México, D.F.: Ed. Gedisa, pp. 60-61.
- 3. B. Commoner. 1963. *Science and Survival*.
- 4. R. Carson. 1962. *La Primavera Silenciosa*. Boston.
- 5. E. Goldsmith. 1972. *A Blueprint for Survival*. Londres.
- 6. E. F. Schumacher. 1973. *Small is beautiful*.
- 7. G. Clair y S. Simon. 2001. The respectable politics of Climate Change: the epistemic communities and NGOs. *International Affairs* 77 (2): 329-345. p. 330.
- 8. R. Kal. 1997. States, NGOs, and international environmental institutions. *International Studies Quarterly* 41: 719-740, p. 736.
- 9. El WWF se fundó en 1961 en Suiza con el nombre de World Wildlife Fund. Después de los ochenta, y al integrar otras temáticas ambientales a su misión y dejar de limitarse a la conservación de especies silvestres, adoptaron el nombre de World Wide Fund for Nature.

10. *Ibid*, p. 333
11. *Ibid*, 336-339.
12. De acuerdo con el reporte *Equity and global climate change, the complex elements of global fairness* elaborado por el *Pew Centre on Global Climate Change* en 1998, el principio de equidad debe incluir no solo la determinación de quién es responsable de causar el cambio climático global, sino también incorporar –bajo el principio de quien contamina paga- tanto a los que han emitido más GEI en el pasado, como los que emitirán más en el futuro. Partiendo de esa base, el *Pew Centre* clasifica equitativamente a los países de acuerdo con tres variables de equidad: responsabilidad, nivel de vida y oportunidad de reducir las emisiones de GEI de manera más barata, y ha propuesto tres distintas categorías de compromiso dependiendo de la clasificación de los países en estos criterios.
13. A. Agarwaki, S. Narain y A. Sharma (eds.). 1999. *Green Politics*. Nueva Delhi, India: Global Environmental Negotiations 1, Centre for Science and Environment.
14. Según el artículo 1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, por “sumidero” se entiende cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe –o captura– un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero de la atmósfera. Los bosques, por lo tanto, son importantes sumideros.
15. El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) está establecido en el artículo 12 del Protocolo de Kioto, y consiste en una forma específica de instrumentación conjunta de proyectos de reducción de emisiones de GEI, entre países industrializados y países en desarrollo. El MDL pretende apoyar a los países industrializados a cumplir con sus compromisos de reducción, al mismo tiempo en que se ayuda a países en desarrollo para encontrar el desarrollo sustentable. Ha sido un instrumento muy polémico que requiere importantes esfuerzos de certificación y criterios claros para poder funcionar.
16. Artículo 2 de la Convención Marco sobre Cambio Climático.
17. Término introducido por Peter Haas para describir una amplia coalición de científicos, funcionarios públicos, políticos y algunos miembros de ONG, unidos para compartir una interpretación común de la ciencia ante los problemas ambientales.
18. G. Clair y S. Simon. 2001. The respectable politics of Climate Change: the epistemic communities and NGOs. *International Affairs* 77 (2): 329-345, p. 331.
19. Como en el caso del proyecto *Scolec Té* en los altos de Chiapas, donde participaron la Unión de Crédito Pajal, El Colegio de la Frontera Sur y el Instituto de Ecología y Manejo de Recursos de la Universidad de Edimburgo.

- 20.** El criterio de precaución o principio precautorio, se establece en el Principio 15 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y señala que “con el fin de proteger el medio ambiente, los Estados deberán aplicar ampliamente el criterio de precaución conforme a sus capacidades. Cuando haya peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta *no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del medio ambiente.* (el subrayado es nuestro).
- 21.** B. Pearson. 2001. New watchdogs for sinks and CDM. *Boletín HOTSPOT* Diciembre, Climate Network Europe, p. 3.

# La sensibilización y formación de recursos humanos como estrategia de apoyo para revertir el cambio climático

*Tiahoga Ruge y Concepción Velazco\**

HABLAR DE LA FORMA COMO el mundo se ha transformado en los últimos años es inevitable al abordar temas ambientales. Los cambios sociales, políticos, económicos y ecológicos que han ocurrido en el pasado siglo, no tienen precedentes en la historia de la humanidad y ocurren a tal velocidad que no nos permiten ser conscientes de sus múltiples efectos sobre las sociedades y los ecosistemas naturales.

Nuevos y complejos problemas aparecen, y se recrudecen muchos otros que anteriormente no significaban una preocupación para la sociedad. Algunos ejemplos de los grandes temas que han surgido a la discusión pública en el ámbito planetario son: los transgénicos; la clonación; los efectos sociales, económicos y ambientales de los avances de los sistemas de comunicación e información, y el cambio climático.

Hace treinta años, el suponer que la influencia humana tuviera efectos irreversibles sobre el clima era algo impensable para la mayor parte de nosotros; ahora el tema cobra una importancia cada vez mayor debido a sus profundas implicaciones ambientales, económicas, políticas, tecnológicas y sociales.

La complejidad de la situación ambiental demanda formas de acción, y particularmente de organización y cooperación, que permitan hacer más eficientes los esfuerzos para resolverla, tanto de las instancias de gobierno involucradas en el tratamiento de los problemas de conservación, como de todas aquellas dependencias que tienen que ver con los planes de desarrollo del país. También exige sumar las ideas y esfuerzos de la sociedad, incluyendo todos aquellos sectores que de una forma u otra han quedado marginados de la toma de decisiones.

Para estar en posibilidad de plantear medidas que contribuyan a estabilizar el cambio climático, se requiere observar, entender y predecir los cambios de forma que podamos contar con elementos para desarrollar políticas específicas con un enfoque multidisciplinario. Como muchos problemas ambientales, el cambio climático es sólo un síntoma de que nuestra forma de vida y estilo de desarrollo han estado propiciando cambios en las condiciones del ambiente en el que vivimos. El problema es, ¿puede la humanidad convivir de forma armoniosa con esos cambios? En opinión de los expertos en el tema, muchos de los impactos del cambio climático pueden ser visualizados con anticipación; sin embargo, será difícil prever otros, y algunos autores advierten que éstos representan una amenaza para la vida en el planeta.

¿Cuál sería el papel de la educación y de la formación de recursos humanos en el marco de una estrategia para revertir o estabilizar dichos cambios?

Aunque el nacimiento formal de la educación ambiental en el mundo es relativamente reciente (González 1999) año de 1972 en Estocolmo†y en México es aún más joven, su importancia en la construcción, adopción y aplicación del desarrollo sustentable es ampliamente reconocida en diversos ámbitos.

El papel que la educación para el desarrollo sustentable desempeña es muy relevante para la construcción de una forma de vida más armoniosa con el entorno natural, y va desde la promoción de valores, la transmisión de conocimientos sobre la interdependencia de los procesos naturales y sociales, la adquisición de destrezas y aptitudes para habilitar en la resolución de problemas, hasta facilitar información para la definición de criterios y normas de actuación y la orientación de los procesos de toma de decisiones que permitan construir un futuro deseable que garantice el potencial productivo y un ambiente de calidad como uno de los más elementales derechos humanos.

La integración de la educación ambiental a los planes oficiales de nuestro país se remonta a principios de la década de los ochenta, cuando se crea la Dirección de Educación Ambiental, que depende de la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, y es a partir de entonces, y particularmente a raíz de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en 1992, cuando su evolución es más rápida, rebasando el enfoque informativo vinculado con las ciencias naturales para constituirse en una dimensión que atraviesa todos los sectores del conocimiento, tal y como lo establece el Plan Nacional de Desarrollo



2001-2006 (Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos 2001), el cual ubica a la educación como una estrategia central de la política social para el desarrollo de la Nación.

Al respecto, el apartado “Desarrollo social y humano” del PND, dice:

[...] históricamente se ha demostrado que la educación es la base del crecimiento personal y que hoy es factor determinante en el acceso igualitario a las oportunidades de mejoramiento de la calidad de vida: No hay desarrollo humano posible sin educación; por ello, la educación es ante todo un derecho básico, que el Estado y la sociedad tienen la responsabilidad ineludible de hacer efectivo.

En el PND también se señala que:

El desarrollo del país ha provocado un deterioro del entorno natural. Tanto por prácticas productivas inadecuadas, como por usos y costumbres de la población, se ha abusado históricamente de los recursos naturales renovables y no renovables y se han dañado seriamente numerosos ecosistemas en diferentes regiones del país. La falta de conciencia entre la población acerca de la necesidad de cuidar el ambiente ha conducido a ganancias efímeras en los niveles de vida de las generaciones presentes a costa de sacrificios que han de padecer las futuras. Es impostergable la elaboración y aplicación de políticas públicas que conduzcan a un mayor cuidado del medio ambiente. El deterioro ambiental se atribuye por lo general al desarrollo económico; sin embargo, son las decisiones y acciones implantadas por los seres humanos las que subyacen en ese fenómeno. La cultura de la convivencia armónica con la naturaleza requiere impulsarse con gran determinación como punto de partida hacia nuevos estilos de desarrollo, que permitan asentar los niveles de vida de la población, no por periodos cortos, sino de manera sustentable.

Por lo que la educación ambiental para el desarrollo sustentable, en sus distintas modalidades, debe concebirse no como un fin, sino como un medio. Un medio eficaz para transmitir al individuo, de manera continua e integral, la preparación que requiere para enfrentar los retos ambientales, pero sobre todo para relacionarse responsablemente con su entorno y con los demás miembros de la comunidad, siguiendo patrones de consumo

ecológicamente viables, y conforme a una ética basada en principios de justicia, equidad social, democracia, paz y seguridad.

En este marco, una estrategia de educación y formación de recursos humanos para contrarrestar los efectos del cambio climático debe partir de la base común de una estrategia nacional de educación, capacitación y comunicación educativa para el desarrollo sustentable, en el ámbito de la cual se deberá prever la formación de recursos humanos en los sectores clave para el tema; tanto con la finalidad de contribuir a revertir las causas globales de este fenómeno, como para el fortalecimiento de las capacidades que permitan disminuir la vulnerabilidad y enfrentar de mejor forma los riesgos ante los desastres ocasionados directamente por el proceso de cambio climático y sus sinergias con los riesgos naturales habituales.

Un factor muy relevante para el éxito de cualquier proceso educativo es su vinculación directa con las políticas y proyectos del país sobre cambio climático. A este respecto, es importante agregar a lo que señala el punto 21 de la declaración de México en Johannesburgo, que la educación no puede lograr cambios tangibles si no está acompañada con los instrumentos necesarios para aplicar los conocimientos adquiridos; en este sentido es indispensable que una política dirigida al combate de la deforestación no sólo se apoye en procesos de capacitación para el impulso de alternativas productivas, sino que acompañe también con los instrumentos económicos que permitan su éxito comercial.

Por otra parte, aunque los avances de México en materia de educación ambiental son muchos, hablar de la existencia de una estrategia específica de sensibilización y de formación de recursos humanos que atienda al tema de cambio climático aún está lejos. Hasta el momento, la disponibilidad de los datos en materia de cambio climático satisface los requerimientos de los usuarios especializados (ver secciones anteriores); sin embargo, se requiere mejorar la disponibilidad de los mismos para una audiencia más amplia, así como desarrollar e instrumentar una estrategia de formación de recursos humanos que además de ayudar a disminuir la emisiones de gases de efecto invernadero, permita disminuir la vulnerabilidad de nuestro país ante el cambio climático.

Lo anterior no quiere decir que el tema se encuentre totalmente desatendido. Tanto en el ámbito gubernamental como en el no gubernamental ha sido abordado en distintos foros, y se han llevado a cabo numerosos esfuerzos no vinculados para atender al problema en sus distintos escena-

rios y facetas (ver los capítulos *La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, de E. de Alba, y *México y La participación de países en desarrollo en el régimen climático*, de F. Tudela, en la sección II).

En materia de educación y formación de recursos humanos para el desarrollo sustentable, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, por medio del Centro de Capacitación para el Desarrollo Sustentable, CECADESU, ha buscado una mayor efectividad en las acciones realizadas con distintas estrategias, entre las que destacan: la construcción, desde el ámbito local, de los *Planes Estatales de Educación Ambiental, Capacitación y Comunicación Educativa para el Desarrollo Sustentable* (PEEACCE) con miras a lograr integrar, en el mediano plazo, una Estrategia Nacional de Educación Ambiental; otra es la revisión del marco legal necesario para contar con un piso institucional adecuado para el desarrollo de las acciones; y, finalmente, la búsqueda de mecanismos alternativos de financiamiento para fortalecer la acción pública.

Hasta agosto de 2003, los estados de Aguascalientes, Michoacán, Campeche, Colima y Zacatecas culminaron la elaboración de sus planes estatales; 12 estados más, cuentan con un documento preliminar: Tabasco, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Hidalgo, México, Morelos, Puebla, Quintana Roo y Sinaloa, y 12 estados más se encuentran en proceso de integrarlo: Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Chiapas, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Querétaro, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas y Veracruz.

Unos de los proyectos gubernamentales que tiene una vinculación más estrecha con el tema, es la Cruzada por los Bosques y el Agua, la cual es un llamado a actuar juntos sociedad y gobierno en proyectos locales o regionales para la conservación, restauración y manejo sustentable de los bosques y el agua de México, con la finalidad de revertir a la destrucción acelerada de la vegetación natural de nuestro país y los trastornos en la disponibilidad de agua, que en ocasiones redundan en sequías interminables y en otras en inundaciones, torrentes incontrolables y deslaves.

En el marco de la Cruzada, se cuenta con una estrategia educativa y de capacitación que está concentrando su trabajo en zonas críticas del país a fin de buscar resultados concretos en un corto plazo. La Cruzada se inició en el año 2001 y se encuentra en su tercer año de trabajo.

Otros programas relevantes al tema son la Estrategia de Educación y Conciencia Pública que nuestro país está por iniciar en el marco de la Con-

vención Ramsar, así como el Programa denominado *Enseñando y Aprendiendo para un Futuro Sustentable*, elaborado por la UNESCO y dirigido a maestros, y que nuestro país buscará adaptar al contexto mexicano. Dicho Programa se encuentra en marcha como proyecto piloto en la Reserva de la Biosfera de Sierra Gorda, en el estado de Querétaro.

El reto es unificar y enfocar todos estos esfuerzos alrededor de objetivos comunes enmarcados en una política nacional para el cambio climático. Para lograr esto, se requiere recuperar y manejar los datos e información existentes y desarrollar recursos educativos versátiles y flexibles que puedan ser utilizados con una amplia gama de destinatarios, así como proporcionar herramientas de trabajo mediante la capacitación a cada miembro de la sociedad (padres, maestros, estudiantes, consumidores, líderes locales, manufactureros, granjeros, legisladores, publicistas, etc.) a fin de incrementar sus oportunidades de contribuir con acciones concretas a frenar el cambio climático y sus resultados.

Es necesario asegurarse de que cualquier esfuerzo para la formación de recursos humanos sea sistemático y continuo para mejorar el uso de los datos e información en todas las etapas del proceso de planeación y dar un mejor sustento al proceso de toma de decisiones, tanto en el sector gubernamental como en el productivo.

Algunos de los aspectos clave que se requiere fomentar a través de la capacitación son:

- El uso de indicadores y herramientas en el proceso de toma de decisiones y en la formulación de nuevas políticas.
- El mejoramiento de las prácticas de los sectores industrial, agrícola y del transporte para controlar y reducir la tasa de crecimiento de emisiones de gases de efecto invernadero.
- El manejo de tecnologías o medidas de mitigación para controlar y reducir la tasa de crecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero.
- La creación de capacidades para la integración de elementos de adaptabilidad al cambio climático en las estrategias para el desarrollo sustentable.

En cuanto a los sectores involucrados, además de considerar como destinatarios y partícipes de la misma al sector educativo, las instituciones guber-

namentales, el público en general, los medios masivos y las organizaciones no gubernamentales, se requiere concentrar el desarrollo de los proyectos de sensibilización y formativos en audiencias específicamente seleccionadas, por el peso que tienen en la puesta en práctica de soluciones desde su ámbito de actuación. Estas últimas incluyen, entre otros, los siguientes sectores:

- Energía.
- Recursos naturales y manejo forestal.
- Sector industrial: la pequeña y mediana industrias.
- Transporte.
- Desarrollo urbano.

Un requisito fundamental para el éxito de la estrategia es la participación decidida de cada sector, la cual sólo puede lograrse mediante una aproximación directa. Cada uno de ellos debe estar al tanto de cómo contribuye al cambio climático, cuáles son las consecuencias y qué puede hacerse para mitigar el problema. Las medidas de mitigación propuestas y la información ofrecida a cada uno deben tomar en consideración sus necesidades específicas y los recursos con los que se cuenta.

## BIBLIOGRAFÍA

- Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. 2001. *Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006*. México: Presidencia de la República. Talleres Gráficos de la Nación.
- González G., Edgar. 1999. Otra Lectura a la historia de la Educación Ambiental en América Latina y el Caribe. *Tópicos en Educación Ambiental* 1(1): 9-26.

## Notas

---

- \* Coordinadora general y secretaria técnica, respectivamente, del Centro de Educación y capacitación para el Desarrollo Sustentable, Semarnat.



# El informador y el cambio climático

*Alejandro Ramos\**

ESTE TEXTO NO BUSCA abordar el fenómeno del cambio climático a fondo, pues en capítulos anteriores los expertos ya lo analizaron, y nos presentaron un panorama amplio y descriptivo sobre éste y sus manifestaciones. Por el contrario, estas líneas llevan la intención de explorar nuevas formas de cobertura y presentación de la información, en donde la reflexión del tema ocupe un espacio importante en los medios. Vale decir, trascender a la misma nota informativa, romper estructuras de la prensa y generar una reflexión en la sociedad. Algo así como generar un periodismo reflexivo, donde el presentismo no domine siempre la información del día y con el cual ayudemos a que el auditorio se cuestione lo que pasa en su entorno y con ello busque a las fuentes para ampliar su campo informativo.

Para quienes tenemos ese compromiso con la sociedad, de trabajar día a día la reproducción del acontecer público, también estos fenómenos nos invitan a cambiar nuestros contenidos, y no sólo hablamos de que sean verídicos, esto se da por hecho, sino que la reproducción del acontecer vaya con un plus que sea útil, claro y de interés.

Hoy en día, la prensa escrita tiene un reto mayor para seguir cautivando a los lectores, pues en desventaja con los medios electrónicos, debe persuadir y captar público a partir de la buena redacción, así como de una presentación llamativa de la información, y máxime cuando se trata de temas ambientales. De tal manera que me abocaré a esbozar sólo algunas reflexiones sobre la cobertura que hoy en día hacemos del fenómeno de cambio climático, y brindar algunas aportaciones sobre cómo incidir en la población más allá de una simple lectura de la nota informativa.

A principios de la década de los noventa, el tema del cambio climático empezó a ser citado con mayor frecuencia en los medios. En aquellos años,

a nivel mundial, la alerta sobre el fenómeno crecía y entonces era común leer o escuchar que a él estaba ligada la actividad humana. El desarrollo de las sociedades ha tenido un impacto serio hacia el ambiente (para mayor información ver la sección I *Las bases científicas*). La huella es clara, el uso de los combustibles fósiles en la industria, en el área de servicios y en el transporte, principalmente, hoy le dan otra manifestación al clima en el mundo, así como sus consecuentes impactos devastadores (ver la sección III *Impactos, vulnerabilidad y adaptación*). De ahí surgían para el lector nuevos conceptos como el de gases de efecto invernadero (tales como el bióxido de carbono, el metano, óxidos de nitrógeno y los cloroflucarbonados), los cuales al paso de los años se han ido acumulando en la atmósfera, y como bien lo han citado los expertos, el aumento de estos gases tóxicos provoca una alteración en el clima del planeta.

La difusión de desastres naturales sigue una lógica del periodismo, cubrir y difundir lo que pasa en el momento, presentar la noticia, ser oportunos en la nota. De tal manera que las torrenciales lluvias que caen sobre alguna región del país o del mundo y causan estragos son nota importante, así como cuando hay sequías extremas que dejan sin alimento y agua a pueblos enteros, o que los fríos de otoño o invierno son más intensos y las nevadas más feroces. Eso pasa y por tal se debe informar. Hasta ahí el medio informativo cumple. Sin embargo, el tema del cambio climático obliga a la prensa a no sólo quedarse con la devastación del momento, los fenómenos recientes abren un escenario que los medios como tales aún no explotan a través de otras estructuras informativas. Siguen la inercia en las coberturas, y las interrogantes que el reportero o el editor deberían hacerse sobre estos fenómenos no se dan. O se dan, pero únicamente en la superficie.

Ante esto, no se trata redescubrir qué son y cómo trabajan los medios, simplemente vale la aplicación de otros métodos en la confección del acontecer. Así pues, ¿cómo difundir el fenómeno de cambio climático a la población? ¿Cómo hacer que la nota informativa del día trascienda y llegue a un público receptivo? ¿Hasta dónde un medio de información debe asumir un rol adicional para hacer reflexionar a la gente sobre los problemas ambientales? ¿Cómo hacer para que las notas informativas que abordan temas como el cambio climático y sus impactos en la sociedad sean precisas, claras, útiles y de interés para la población?

Estas preguntas son sólo algunas de las interrogantes que pasan por la mente del periodista, así como del editor de temas ambientales, principal-



mente. El tema en sí mismo no es sencillo, pues los medios no abren amplios espacios para tratar temas con la profundidad con la que se debe, al menos en estos casos. Vale decir que los medios de información buscan la nota inmediata, la noticia, lo que tenga impacto periodístico del día. Y si el impacto del día es el desastre natural en una determinada región entonces esa es la nota y así se cubrirá. De tal forma que a la población sólo tendrá una estructura informativa de lo que ocurrió en un lapso corto, es decir, el ayer, lo inmediato, el presentismo sin contexto.

Un lector, así como un auditorio de medios electrónicos, demanda en ocasiones más información, precisión y hasta métodos pedagógicos para que le presenten los temas como el cambio climático. Las preguntas para quienes estamos en la trinchera informativa son frecuentes por parte de un público cada vez más ávido por saber los impactos que causa la devastación de recursos naturales.

Es claro a estas alturas que una cobertura ambiental es muy diferente a la política. En este último escenario, la declaración del actor político es suficiente para dar a conocer un enfoque específico y para trazar nuevas estrategias en ese ámbito. Mientras que para la agenda ambiental, la simple declaración no basta para cumplir un objetivo informativo, cosa que hasta la fecha es muy común en los medios; hace falta más creatividad en la agenda de trabajo, en la presentación de la información y en los seguimientos que se hagan sobre el tema.

Si tratáramos de cuantificar, al menos en la prensa escrita, lo que se ha difundido en los últimos cinco años el asunto del cambio climático veríamos que la información sería mínima y estaría reducida a coberturas de foros con especialistas, sobre congresos, declaraciones oficiales o bien sobre las cumbres internacionales en donde se abordan los compromisos para reducir los gases efecto invernadero (ver la sección II *Reacción del mundo ante el problema: la colaboración internacional* y el capítulo *La participación de la sociedad civil organizada* de M. Delgado en esta sección).

Las declaraciones abundan, y para un auditorio con poca información al respecto poco o nada le dice que México esté aplicando medidas para reducir sus emisiones tóxicas a la atmósfera. ¿Por qué? Porque para el auditorio muchas declaraciones están muy alejadas de su entorno, para la gente si no le afecta de forma inmediata (que sea muy objetivo), pues no habrá interés o reacciones oportunas al respecto.

Lo que un lector leyó sobre el cambio climático en este año, lo más probable es que ya lo haya olvidado. Y tal vez se vuelva a interesar hasta que se

presente alguna alteración severa en el clima, hasta que su escenario inmediato sea afectado. ¿Qué hacer entonces? ¿Cómo decirle al auditorio que mientras siga empleando energía fósil seguirá contribuyendo a la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera? ¿Cómo crear una adicción en la lectura sobre estos temas en la población en general?

El reto que tenemos los hacedores de la información ambiental es muy grande, pues a estas alturas la presentación de la simple nota informativa no basta. El informador, como mínimo, debe estar bien documentado en la materia, prácticamente tomar clases con los hacedores de la ciencia, y en paralelo ofrecer un plus en la información que vende en su propio medio; es decir, una nota en la prensa escrita debe ir acompañada de otros paquetes informativos, así como un riguroso balance y enriquecimiento de las fuentes que hablan.

Es necesario aclarar que en este trabajo no hay recetas ni fórmulas periodísticas; sí hay retos, y planeación y estrategias informativas. Cada medio sabe de sus políticas editoriales, de espacios y tiempos. Sabe también que existen temas que hoy en día son estratégicos no sólo para el medio sino para la sociedad y para el planeta. Indudablemente, la clave está en las manos de los informadores, y de nosotros dependerá la precisión, la utilidad y lo interesante de los contenidos.

Ahora bien, en términos de retos para los medios es muy importante seguir cautivando al público. Pero para lograrlo y mantenerlo, el informador debe entender los fenómenos como el cambio climático, documentarse, consultar bases de datos, comparar información, buscar a expertos y a las voces más autorizadas en la materia. Y aunque suene ridículo, prácticamente el informador debe o debería hasta 'tomar clases' con los científicos o investigadores.

Es claro a la fecha encontrar en la mayoría de los medios informativos estructuras noticiosas cargadas con declaraciones del momento, se ensaya poco la proyección, pero vista ésta a través de la voz de los expertos. Es ahí donde debemos incidir, donde se debe documentar y ampliar los paquetes informativos en varias dimensiones. Los problemas ambientales del mundo, país y de la Ciudad de México crecen, sin exagerar, se multiplican, y las acciones de respuesta al menos por parte de los informadores es mínima. Domina la coyuntura, la declaración o la tragedia. ¿Qué hacer?, vale pues, formar más a los informadores ambientales y desarrollar más los temas ambientales, darle un giro a la cobertura periodística; es decir, suprimir el

peso de las declaraciones oficiales y darle mayor fuerza y difusión al trabajo ambiental, bien investigado y documentado.

En un medio impreso las infografías (el manejo de gráficos con poco texto) son muy útiles para que los lectores comprendan de una pincelada lo complejo del problema del cambio climático. Reitero que el periodismo requiere de notas útiles, interesantes y claras para el lector, y recurrir a este tipo de apoyos gráficos ayudará en la formación de la sociedad. Además, mientras los medios mantengan como temas los asuntos ambientales, habrá una mejor cobertura y la competencia informativa ayudará a la sociedad a no olvidar y crear conciencia sobre problemas o fenómenos como el cambio climático.

## Notas

---

\* Periódico *Reforma*. México, D.F.