

LA IMPORTANCIA DE LA EXPLORACIÓN GEOLÓGICA Y GEOFÍSICA EN LOS COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE PRESAS HIDROELÉCTRICAS. EJEMPLOS COMPARATIVOS EN MÉXICO

Adolfo Vázquez Contreras¹, Moisés Dávila Serrano², Rafael Acosta Quevedo², Juan Sánchez Pérez²

Abstract

Hydropower dams' geological and geophysical exploration activities are analyzed in a qualitative and semi-quantitative basis. Information about an under-construction hydro dam is included as well. Considered activities are those from feasibility and design support stages. Mexico biggest dams geological exploration works and their associated costs are reviewed and their impact on their construction and safety. Big dams finance underpinning depends on good hydroenergetic assessment besides an accurate geological model obtained before construction activities begin.

Resumen

Se analizan y comparan de modo cualitativo y semi-cuantitativo las principales actividades de exploración geológica y geofísica en cinco de las presas hidroeléctricas más importantes y una próxima a operar en México, las que se llevaron a cabo durante los estudio de los sitios, en las etapas de factibilidad y apoyo a diseño. Se revisan trabajos sobre el tema de las grandes presas y sus costos para obtener algunas conclusiones sobre el impacto de la exploración básica del terreno en el costo de las obras y su seguridad. La sustentabilidad financiera de las grandes presas depende de una adecuada exploración geológica del macizo rocoso, sin considerar las predicciones de demanda de agua y electricidad.

1.- Hidroelectricidad en México

La hidroelectricidad constituye una parte muy importante en el volumen total de la energía generada mundialmente y la porción mayor de la energía renovable. A nivel mundial representa aproximadamente el 24 % de la producción de energía; en México para el año 2008 la participación de las hidroeléctricas en la capacidad instalada para la generación de energía eléctrica alcanzó un 22.19 % con un total de 11,343 MW (INEGI, 2010). La geotermia es la otra energía renovable más desarrollada en el país. Hasta hoy el aprovechamiento hidroeléctrico ha sido a través de grandes presas como Chicoasén en Chiapas (la de mayor capacidad instalada con 2,400 MW), y más recientemente Aguamilpa y El Cajón, ambas en Nayarit, en el occidente del país. Sin embargo, aún existe un gran potencial a desarrollar, sobre todo a nivel de pequeñas presas, siendo este último estimado en 3,200 MW (CONAE, 2002) a desarrollar en los estados de Chiapas, Veracruz, Puebla y Tabasco. La Secretaría de Energía de México estimaba una inversión de 2,908 millones de dólares en energía hidroeléctrica para el periodo 2006-2015, (SENER, 2006) por lo que su importancia no decaerá en los próximos años. Es en este contexto que la exploración geológica-geofísica para determinar la ubicación de las mejores alternativas a los proyectos adquiere gran relevancia.

En México hay 64 Centrales Hidroeléctricas, de las cuales 20 son consideradas grandes presas por su tamaño y 44 son centrales pequeñas (<http://www.hidroenergia.net/>). De acuerdo a los registros de la Comisión Federal de Electricidad, las plantas hidroeléctricas más antiguas en el país y que siguen generando son dos: Botello en Panindícuaro, Michoacán (13 MW) y Colotlipa en Chultenango, Gro. (8 MW); ambas entraron en operación en 1910. Las grandes obras de generación hidroeléctrica que hasta la fecha generan más electricidad se desarrollaron en los años 80 del siglo pasado en la cuenca del río Grijalva en Chiapas y desde los años 1990 hasta fechas recientes, en el occidente del país, en la cuenca del río Santiago.

En este trabajo se analiza únicamente la información de seis grandes presas, debido a que son éstas las que cuentan con la información más documentada, en cuanto al volumen de la exploración directa e indirecta del sitio, algunas de ellas son las que generan más electricidad en México: Chicoasén,

¹ Oficina de Geofísica GEIC-CFE

² Subgerencia de Estudios Geológicos GEIC-CFE

Aguamilpa y La Yesca. La siguiente tabla resume algunos datos importantes de las presas seleccionadas:

Tabla 1.- Seis grandes presas hidroeléctricas en México

Nombre de la Presa	Número de unidades	Fecha de entrada en operación	Capacidad efectiva instalada (MW)	Ubicación
Chicoasén	8	29-May-1981	2,400	Chicoasén, Chiapas
Zimapán	2	27-Sep-1996	292	Zimapán, Hidalgo
Peñitas	4	15-Sep-1987	420	Ostuacán, Chiapas
Aguamilpa	3	15-Sep-1994	960	Tepic, Nayarit
El Cajón	2	1-Mar-2007	750	Sta. María del Oro, Nayarit
La Yesca	2	2011-2012	750	Hostotipaquillo, Jalisco

2.- Etapas de estudio en proyectos hidroeléctricos

Una vez que se ha llevado a cabo el balance hidroenergético de una cuenca y se han seleccionado los segmentos del río aprovechables para construir presas hidroeléctricas (etapas de gran visión e identificación) tiene lugar una segunda fase de estudios necesarios para construir una planta hidroeléctrica. Estos a su vez se dividen en cuatro etapas: 1) Prefactibilidad, 2) Factibilidad, 3) Preconstrucción o Apoyo a diseño y 4) Construcción. Los trabajos de topografía, exploración geológica y geofísica se llevan a cabo principalmente en las tres primeras, mientras que en la etapa de construcción la geotecnia se encarga de la solución a los problemas geológicos encontrados principalmente a nivel local. El propósito final de las investigaciones de ingeniería básica del proyecto hidroeléctrico propuesto es asegurar que se construya en el tiempo previsto y al menor costo, pero que a la vez reúna una serie de condiciones de seguridad estándar (estabilidad, resistencia ante los sismos esperados, sismicidad inducida mínima, entre otras), así como de rentabilidad (niveles de almacenamiento que aseguren la generación prevista por el diseño) y una vida útil, que para efectos de cálculo económico, debe ser de 30 años cuando menos, aunque se espera que continúe en operación por mucho más tiempo. En la etapa de la construcción como se mencionó la tarea de la geología y geotecnia es el seguimiento y control de la obra para proponer la solución a los problemas encontrados, principalmente durante la excavación de las obras subterráneas y superficiales, a la vez que se va afinando con más detalle el modelo geológico, esto es, el conocimiento de la litología y la estructura geológica, así como las propiedades geomecánicas del macizo.

El menor costo económico debe obtenerse de acuerdo a resultados confiables en los estudios de factibilidad; con base en ellos se hace el presupuesto y la planeación de los trabajos en el tiempo, que servirá para controlar el avance de la obra. Generalmente la etapa de apoyo a diseño dura un año, mientras que la construcción suele durar en promedio cuatro años.

3.- Métodos de exploración

En la selección del sitio de construcción de una presa hidroeléctrica intervienen diversos factores técnicos, sociales y ambientales, algunos de los cuales son motivo de polémica actualmente. En este trabajo nos enfocaremos exclusivamente en los aspectos técnicos que competen a las etapas previas a la construcción de los proyectos y en el volumen de la exploración directa e indirecta del terreno en los mismos. El objetivo de la exploración es obtener un modelo geológico lo más claro posible que sirva para caracterizar el sitio geotécnicamente y planificar, presupuestar y realizar el diseño estructural de las obras, así como obtener suficiente información para establecer un proyecto seguro y económico (Bonilla y Laporte, 2006, Ananda *et al.*, 2010). La administración del riesgo geológico y sus consecuencias económicas, las que pueden dar lugar a grandes pérdidas, más allá de la reparación física de la obra, depende totalmente de una buena investigación del sitio (Head, 2001). Al hablar del monitoreo instrumental geotécnico de obras, Allen (2001) menciona como condiciones difíciles de detectar (con los métodos de exploración) la presencia de lentes de material blando, zonas de alta compresibilidad y

bolsones de alta presión de poro, las que pueden ocasionar alguna falla en las obras. De lo anterior puede observarse la necesidad e importancia de la exploración ya que inclusive para la ubicación de las zonas de monitoreo deben seguirse criterios que están basados en la exploración directa, indirecta o ambas.

En este trabajo se considerará la exploración directa del sitio por medio de trabajos de barrenación (sondeos exploratorios), pruebas geotécnicas de permeabilidad en pozos y la excavación de galerías o socavones. La barrenación es un gran soporte para definir el modelo estratigráfico y estructural del sitio de la obra, y para conocer algunos parámetros geotécnicos básicos para el diseño de la obra y debe llevarse a cabo en ambas márgenes y en el cauce del río en los sitios de mayor interés, de acuerdo a la localización de las obras. Los objetivos del muestreo del sitio con barrenos exploratorios con recuperación de núcleos por lo general incluyen el conocimiento de varios de los siguientes aspectos: estratificación bajo el sitio, variaciones verticales o laterales de las condiciones del subsuelo, obtención de muestras para ensayos de laboratorio, verificación de la interpretación de mediciones geofísicas, y colocación de instrumentos *in situ* para la realización de pruebas geotécnicas, geofísicas y geohidrológicas. La interpretación de las pruebas permite anticipar zonas donde se presentarán condiciones de inestabilidad. Las pruebas geotécnicas de permeabilidad en los pozos mediante la inyección de agua a presión constituyen una parte importante del volumen de la exploración directa y van enfocadas a conocer la competencia del macizo y su capacidad para facilitar o impedir las fugas de agua de la presa.

Las galerías o socavones se realizarán fundamentalmente en las etapas de preconstrucción para definir con mayor precisión el marco geológico local en factibilidad y algunas zonas, en ambas márgenes del río donde es necesario investigar cuestiones de importancia fundamental para la obra como la posible continuidad de zonas de fractura, mapeo de los principales sistemas de falla en el sitio, investigación de propiedades geomecánicas de las rocas *in situ*, etc. Por sus dimensiones y costo, la localización de estas obras se decide con base en la información obtenida previamente con barrenos, rasgos topográficos, trincheras y levantamientos geofísicos.

En cuanto a los estudios geohidrológicos, las pruebas de permeabilidad e infiltración a nivel semirregional constituyen un aspecto fundamental en la factibilidad del proyecto dado que las pérdidas de agua por infiltración deben ser mínimas. El cierre hidráulico del vaso de la presa requiere la certeza de que las permeabilidades de las rocas involucradas y de la cortina sean bajas. Otro aspecto importante es la determinación de los niveles de agua subterránea, las fluctuaciones y las superficies de flujo o drenaje. La instalación de piezómetros en los barrenos exploratorios permite el estudio de las variables mencionadas.

La principal tarea de la investigación geofísica en el sitio para una presa es definir los contactos entre las unidades geológicas, la localización de zonas de falla cubiertas por sedimentos y suelo en las laderas, las velocidades sísmicas y los parámetros elásticos dinámicos de las rocas en ambas márgenes del río donde se construirá la obra. En esta tarea el método sísmico de refracción es la principal herramienta para el estudio y en segundo lugar el método geoelectrico, el que ayuda a complementar el modelo geológico al indicar condiciones como la presencia de zonas de falla, cuerpos de agua, mineralización, zonas arcillosas y carsticidad; asimismo este método ayuda a la mejor caracterización de las posibles litologías y materiales presentes en el sitio. Por lo anterior, para el análisis de los costos por la exploración indirecta a través de la geofísica, se considerarán únicamente la técnica del tendido de refracción sísmica (TRS) y la del sondeo eléctrico vertical (SEV) como los métodos indispensables en la exploración del subsuelo en sitios de presas. Entre las técnicas geofísicas que eventualmente se llegan a utilizar para la exploración indirecta y semi-indirecta (en pozo) se pueden mencionar además las siguientes: tomografía eléctrica, *cross-hole*, tomografía sísmica entre pozos, gravimetría, magnetometría y registros geofísicos de pozo. El método de tomografía eléctrica es una de las técnicas secundarias cada vez más en uso en estudios para presas así como la tomografía sísmica entre pozos (Ananda *et al.*, 2010, Serre *et al.*, 2002). La importancia de los métodos geofísicos en la exploración indirecta es tal que puede significar ahorros considerables al detectar zonas de debilidad con riesgos de posible derrumbe en el trazo de túneles los que pueden interferir con el trazo inicial de las obras y ocasionar modificaciones sustanciales a los diseños y, por lo tanto, la elevación de los costos. Asimismo, la determinación de la calidad de la roca por métodos geofísicos permite la elección de la maquinaria más

adecuada para la excavación y orienta a la localización de los puntos en donde conviene realizar la barrenación.

Aunque en la exploración directa e indirecta de un sitio intervienen otros factores, éstos no se consideran en la información comparativa documentada para este artículo, entre ellos cabe mencionar los siguientes estudios y técnicas de apoyo: topografía, fotogrametría, imágenes satelitales, análisis petrográfico, mineralógico y químico. Además, para el diseño sísmico de la presa, es necesario la observación de la sismicidad local por lo menos un par de años previos a la construcción para proponer un sismo de diseño que asegure la competencia de las estructuras. El monitoreo sísmico regional ayuda a la detección de fallas activas que, aunque estén fuera del área del proyecto, pudieran afectarlo. Este método tampoco se aborda en este trabajo.

4.- Errores en los estudios, problemas y daños en las presas hidroeléctricas.

El desplome o fisuras considerables en una presa hidroeléctrica es un aspecto técnico muy importante por su costo humano y económico que debería evitarse a toda costa. En la etapa operativa es cuando estas fallas pueden ser potencialmente catastróficas por una resistencia insuficiente ante sismos, huracanes, lluvias extraordinarias y deslizamientos. Estrictamente, los problemas en las presas hidroeléctricas se deben a errores en el diseño o a modificaciones sustanciales del diseño por el constructor. Sin embargo, estas causas de falla se pueden remitir a errores cometidos desde las etapas de la planeación y construcción que no permitieron una visión suficientemente completa y detallada del marco geológico y geohidrológico en el sitio de la obra y sus interacciones con la obra misma.

Los errores en las etapas previas a la construcción se pueden resumir principalmente en un muestreo inadecuado, irregular y/o insuficiente de las condiciones geológicas del sitio (litología, presencia de fallas y zonas de debilidad, resistencia mecánica, carsticidad, variables geohidrológicas, etc.), así como de sus parámetros geofísicos asociados (velocidad sísmica, módulos elásticos y resistividad eléctrica principalmente) en el área regional y local considerada para el proyecto. Durante la etapa constructiva del proyecto pueden presentarse problemas imprevistos por las deficiencias mencionadas durante la exploración en las etapas previas y que, si no se corrigen, pueden contribuir en menor o mayor proporción a problemas durante la etapa operativa que en casos extremos pudieran conducir a la falla.

Para prevenir problemas que pudieran presentarse en la etapa operativa deben considerarse también los fenómenos naturales ajenos a las estructuras y que las pueden afectar. La mayoría de las veces se supone la ocurrencia temporal y espacial de fenómenos naturales potencialmente destructivos, pero la estimación de su frecuencia es precisa pocas veces, por lo que se considera un cierto factor de riesgo y se diseña con criterios basados en la rentabilidad económica.

Desde los primeros estudios que se hacen para conocer la gama de agentes a los que estará expuesta una presa hidroeléctrica se incluyen aspectos que se denominan de Ingeniería Básica y se refieren al marco regional en el que se desarrollará la obra, los que incluyen la sismicidad, geología, régimen pluvial y análisis de cuencas hidrológicas. Estos permiten conocer la información fundamental para definir la viabilidad económica, social y ambiental de una obra. No obstante, es tan importante conocer detalladamente la interacción de la obra con la corteza terrestre y sus procesos modeladores que, a medida que el estudio va avanzando hacia estadios más cercanos a su construcción (prefactibilidad, factibilidad y apoyo al diseño), los estudios relativos al ambiente geológico e hidrológico principalmente deben irse refinando en aras de dejar lo menos posible al azar, de forma tal que las sorpresas durante la construcción se minimicen y se garantice que la obra dure como mínimo el tiempo planeado para su operación y el costo de mantenimiento por eventos externos sea el menor posible durante su vida útil.

La calidad y cantidad de los estudios son fundamentales para que se cumpla en tiempo y forma con los programas de obra y con los presupuestos de la misma, lo que permite afianzar la seguridad de la misma durante su operación. A continuación se transcriben tres fragmentos al respecto tomados de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 1989).

- Las investigaciones geológicas deben ser tan completas como sea posible para obtener el conocimiento completo del sitio con la mayor precisión.

- En estructuras geológicas complicadas, en forma previa a la contratación de la construcción y con el fin de obtener un diseño apropiado, es recomendable realizar excavaciones de las partes alteradas con la finalidad de clarificar las dudas posibles sobre los tipos de cimentaciones más adecuadas.
- Los diseños se deben basar en información real y no en datos teóricos o en aquellos tomados de investigaciones limitadas.

La Tabla 2 muestra un resumen de los datos estadísticos de fallas en presas en el mundo conocidas hasta 1995 (ICOLD, 1995) y se puede observar que el mayor número de fallas se deben a desbordamientos, tubificaciones y filtraciones, lo que muestra la insuficiencia de la información con la que se llevaron a cabo los análisis de diseño y la construcción de la obra. Otros factores mencionados en la Tabla 2 tienen que ver más directamente con lo inadecuado de la investigación del sitio, lo que conduce a asentamientos e inestabilidades. Lo anterior demuestra la importancia de la exploración de los sitios de desplante de las obras, sobre todo en aquellas zonas de gran complejidad geológica, así como en la selección de los mejores sitios o alternativas.

Tabla 2.- Ocurrencia de fallas en presas por tipo en los siglos XIX y XX (ICOLD, 1995)

Causa de falla	No. de casos
Flujo excesivo/drenaje insuficiente	5
Deslizamiento laderas	4
Mal comportamiento estructuras vertedor	6
Colocación/compactación materiales cortina	11
Levantamiento	4
Retraso construcción	4
Falla cimentación/deformación y subsidencia	11
Licuefacción	2
Precipitación no prevista/mal diseño o investigación inadecuada	8
Ruptura de la presa	8
Sismo	3
Filtraciones	14
Tubificación	36
Insuficiencia vertedor	7
Desbordamiento	45
Erosión interna	9
Total	177

En el caso de México en lo que respecta a las grandes presas hidroeléctricas no ha habido accidentes por la falla de las estructuras que lamentar, sino únicamente problemas en la etapas de apoyo a diseño, durante la construcción y posteriores a la construcción. Entre los casos más importantes cabe señalar los siguientes, referidos a las seis presas incluidas en la Tabla 1, clasificadas de acuerdo a la complejidad de las condiciones geológicas que intervinieron en su construcción y donde se consideran también la topografía y accesibilidad al sitio.

Tabla 3.- Principales problemas de cinco grandes presas hidroeléctricas en México y problemas en la etapa de construcción de la presa La Yesca.

Nombre	Años Construcción	Altura (m)	Tipo	Años oper	Problemas principales
(1) Peñitas, Chiapas	1982-1986	53	Cortina flotada con corazón flexible de arcilla y materiales graduados	24	Cimentación en acarreo. Deslizamiento de 55 Mm ³ en su vaso durante su operación (2007).
(2) Zimapán, Hidalgo	1993-1996	203	Concreto gravedad	14	Grietas en la cortina. Desprendimiento de bloques en la ladera. Caverna en la conducción.
(3) Aguamilpa, Nayarit	1991-1994	187	Presas enrocamiento con cara de concreto	16	Sismicidad inducida (magnitud 5). Asentamientos menores en el concreto de la cortina.

(4) Chicoasén, Chiapas	1978-1981	261	Materiales graduados con corazón impermeable de arcilla	29	Sólo filtraciones de 10 l/s o menores. Profundización de la cimentación más allá de lo planeado por bloques en el cauce.
(5) El Cajón, Nayarit	2000-2004	181	Presa enrocamiento con cara de concreto	6	Asentamientos menores en el concreto de la cortina. Filtraciones al pie de la cortina de hasta 162 l/s
(6) La Yesca, Nayarit	2008-2011	210	Presa enrocamiento con cara de concreto	-	Deslizamiento de una gran masa de MI. Mala calidad del macizo sobre todo en CM, subestación y obra de toma

	Complejidad baja		Complejidad Media		Complejidad alta
--	------------------	--	-------------------	--	------------------

A continuación se comentan algunas de los problemas más importantes encontrados en las presas analizadas y otras consideraciones sobre los sitios.

(1) La presa Peñitas se encuentra en una zona de lomeríos y cerca del Golfo de México, caracterizado por lutitas, areniscas y conglomerado; son notables las fallas importantes en la región y la presencia del volcán activo El Chichonal a sólo 25 km al sureste (González, 1989). La boquilla donde se construyó la presa se eleva hasta 120 m sobre el nivel del río y las obras se construyeron dentro de un macizo rocoso de areniscas interestratificadas con capas delgadas de lutita. Es la primera de un sistema de presas sobre el río Grijalva, localizada antes de su desembocadura en el mar. En el embalse de esta presa se verificó el deslizamiento de ladera más grande del que el hombre tenga registro en México. Éste tuvo en noviembre del 2007 y se debió a la falla de un estrato arcilloso detonado por una tormenta que precipitó 1000 mm de lluvia en tan sólo 3 días en la zona.

(2) La presa de Zimapán se construyó en un cañón calcáreo en una zona montañosa abrupta en el centro del país, caracterizada por calizas masivas de origen marino depositadas en ambiente de plataforma y arrecifal (Arvízu y Alcántara, 1987). En este proyecto, durante la etapa constructiva se produjo un caído en la margen derecha, aguas abajo del empotramiento por lo que se coló y colocó como soporte un gran bloque de concreto de dimensiones 15x4x60 m. Otro problema muy importante que se tuvo, aunque no en la zona de la boquilla, sino en el largo trazo del túnel de conducción (20 km), fue la presencia de una caverna de disolución de grandes dimensiones de aproximadamente 60 m de largo por 30 m de altura y de 10 a 15 m de ancho; en este caso la solución fue el diseño y construcción de un puente subterráneo. En este último problema la utilización de la tomografía sísmica fue fundamental en el ahorro de los costos de excavación.

(3) La presa de Aguamilpa, una de las más altas de su tipo a nivel mundial, se construyó sobre rocas ígneas extrusivas de composición riódacítica-dacítica y que en parte presentan pseudoestratificación, así como intrusiones en forma de diques y troncos (Moreno Garnica y Soto Gutiérrez, 1994). La obra se localiza en terreno montañoso dentro del denominado *graben* de Colima, en el occidente del país. Durante el llenado del embalse se generó sismicidad inducida, por reactivación de una falla ubicada a unos 5 km del eje de la cortina (Delgado *et al.* 1999) que alcanzó a generar sismos de hasta 5 grados de magnitud en la escala de Richter; la actividad dejó de sentirse unos cuatro años después del llenado, cuando se alcanzó un equilibrio en el medio geológico. En este sitio también hubo un deslizamiento de un depósito de talud, el cual se delimitó y estudió desde las etapas de estudio de factibilidad y preconstrucción, para cuya solución se colocaron drenes, cunetas, mallas y concreto lanzado, en todo el depósito. En el año de 2002 la fuerza del agua del vertedor de demasías erosionó las rocas ubicadas después del salto de esquí, las cuales cayeron al cauce del río y provocaron que el desfogue de la casa de máquinas se obstruyera parcialmente, lo cual fue solucionado retirando el material del cauce. Otro problema fue que la brisa del vertedor también provocó el reblandecimiento de la ladera de margen derecha y hubo caídos en el camino, el cual fue obstruido parcialmente.

(4) La presa de Chicoasén, es la segunda presa construida aguas arriba de la desembocadura del río Grijalva, sobre un impresionante cañón estrecho y profundo en calizas marinas de plataforma. El fondo del cañón y los lados consisten de calizas que debajo del nivel del agua son muy fuertes. La mayor porción de los lados del cañón consiste de calizas arenosas blancas en la forma de estratos compactos con espesores de hasta 3 m (CFE, 1976). Es la presa más importante por su capacidad de generación del país y su cortina se encuentra entre las más altas del mundo. Sus turbinas y generadores se alojan dentro de una caverna excavada a 200 m de profundidad. La construcción la cimentación de la cortina debió profundizarse 30 m más de lo planeado debido a que en la parte profunda del cañón había grandes bloques sueltos que falsearon la información obtenida durante la exploración en el cauce.

(5) El proyecto El Cajón se construyó en río Santiago sobre rocas ígneas ignimbríticas de composición riodacítica que presentan una estructura masiva y pseudo estratificada, así como una compacidad y dureza de un valor alto (Gómez Munguía *et al.*, 1986). Aunque el sitio de la presa se encuentra dentro de una región sísmicamente activa, a nivel local, en el estrechamiento de la boquilla no hay evidencias de desplazamientos por fallas. Sin embargo en el año 2007 hubo un deslizamiento de la ladera en el camino de acceso a la casa de máquinas, en el que las soluciones parciales incluyeron cortes en la ladera, anclajes y muros de gaviones. Otros problemas fueron la dificultad en el labrado de muro albeado en el canal de llamada de la obra de excedencia, esto por la conjunción de fallas y diques que bajaron mucho la calidad del macizo en el lugar. Asimismo, durante la operación se han detectado algunos agrietamientos en los alrededores del vaso por la presencia de rocas pumicíticas de baja compacidad.

(6) El proyecto de La Yesca se encuentra, como El Cajón y Aguamilpa, en el río Santiago. En el sitio de la construcción, el modelo geológico es complejo principalmente debido a la presencia de discontinuidades importantes y la alteración hidrotermal que complicaron las primeras etapas de construcción. El principal problema encontrado fue un macro bloque que se deslizó algunos centímetros al restarle soporte la excavación de los portales de desvíos. De igual manera se encontró un macizo de baja competencia en la zona de obras de generación al que se aplicaron tratamientos más cuantiosos a los planeados originalmente. El sitio de presa que fue seleccionado estuvo restringido a la zona comprendida entre el embalse de la presa el cajón aguas abajo y una secuencia poco compacta de rocas volcanosedimentarias aguas arriba, por lo que se debieron enfrentar los problemas mencionados en el sitio finalmente establecido.



Fig. 1.- Localización y panorámica de las presas Peñitas, Zimapán, Aguamilpa, Chicoasén, El Cajón y La Yesca (en construcción).

5.- Costos

Un proyecto hidroeléctrico debe constituir un éxito desde el punto de vista financiero y económico. Dorsey (1997) menciona como los factores más determinantes para el éxito de proyectos de grandes presas los siguientes: probabilidad de costos en exceso a los presupuestados, probabilidad de retrasos durante la construcción, disponibilidad y valor del agua, fortaleza de la predicción de la demanda de agua y/o electricidad y la probabilidad de dificultades durante el periodo de operación. Todos los factores mencionados, con excepción de las predicciones de demanda de agua y electricidad, tienen que ver de una u otra manera o son consecuencia (en mayor o menor grado) de una deficiencia en la exploración o en la planeación de la misma.

Es de suma importancia una investigación geológica planificada y suficiente de los sitios de presas para cumplir el programa de costos-tiempo en la forma esperada, lo que repercute directamente en los costos totales de la obra, tanto porque se evitan erogaciones adicionales, como debido a que se ahorra en la remediación de situaciones que se salen del programa y que implican el alargamiento de los plazos de construcción por la necesidad de exploración y tratamientos adicionales. Esto puede poner en evidencia también que posiblemente desde la planeación, los periodos de tiempos programados pudieran haber sido demasiado cortos para la complejidad del área o las dimensiones del área de exploración. Esto sin considerar los costos futuros por situaciones de riesgo que pudieran presentarse en zonas de debilidad que pasaron desapercibidas por falta de una investigación más detallada.

Los costos que comprenden el diseño y construcción de grandes presas, incluyen el tipo y calidad de las cimentaciones, materiales de construcción disponibles, costos de mano de obra, el tipo de presa seleccionada, el criterio de diseño adoptado, las regulaciones impuestas y los aspectos medioambientales (ICOLD, 1997). La exploración geológica está implicada de manera más directa en la determinación del tipo de presa y las cimentaciones; además, eventualmente en la calidad de las cimentaciones (cuando se hacen verificaciones por algún método geofísico, sísmico o de otro tipo), pues estos aspectos dependen en buena parte del medio geológico.

De acuerdo con los profesionales expertos en el tema, las investigaciones de un sitio para construcción, que incluyen la geología y las condiciones del suelo, tienen un costo entre 2 y 3% de los costos totales de la construcción, aunque ésta es una aproximación un tanto burda (<http://www.bexley.gov.uk/index.aspx?articleid=5072>). De lo anterior se desprende la importancia de la exploración básica del sitio que incluye la geología, geofísica, geohidrología y pruebas geotécnicas, representan realmente un costo pequeño en el costo total de las obras.

El impacto de los costos en el diseño de una presa se basa en factores de seguridad ante incertidumbres hidrológicas, geológicas y mecánicas (ICOLD, Bull. 83). Aunque en esta publicación se refieren a aspectos durante la construcción y se sugieren una serie de medidas para economizar, referidas todas ellas a procesos de construcción o diseño, se menciona que aparte de las alternativas sugeridas para economizar en costos, es posible ahorrar mucho más en la manera de llevar a cabo las cimentaciones y el control de las inundaciones durante la construcción. Estos dos últimos aspectos tienen que ver directamente con el medio geológico sobre el que se asientan las obras, de ahí la importancia de los estudios geológicos previos.

Como una mejora sustancial en los reportes técnicos de exploración que se llevan a cabo en la etapa de apoyo a diseño siempre es conveniente considerar la elaboración de un informe geológico-geofísico integrado de la exploración del sitio siguiendo la filosofía del denominado Reporte Geotécnico Básico (*Geotechnical Baseline Report* o GBR, Smith, 2001). Dicha filosofía contempla incluir aparte de los datos técnicos, un análisis de sensibilidad derivado de las características geológicas más relevantes del proyecto, estableciendo un modelo base lo más realista posible, el que puede servir de guía a los ingenieros responsables y que además sirva para compartir, en su caso, los riesgos entre los contratistas y el dueño de la obra.

5.1.- Volumen de exploración y sus costos principales

Como se explicó en el apartado 3, los aspectos más significativos de la exploración en el sitio del proyecto a nivel local son, por parte de la geología y la geotecnia, la perforación del subsuelo a través

de barrenos, las pruebas de permeabilidad y la excavación de galerías o socavones, mientras que por parte de la geofísica, los levantamientos de perfiles de refracción sísmica y de resistividad a través de sondeos eléctricos, constituyen el aspecto más importante. Consecuentemente estos estudios son los que demandan el mayor costo económico en las etapas de factibilidad y preconstrucción (apoyo a diseño), que son las que se consideran en este trabajo.

Es importante analizar y comparar en la medida de lo posible los volúmenes de exploración directa e indirecta en varios sitios de presas ya que la calidad y cantidad de estos estudios influye fuertemente en los costos de construcción, así como en la solución de problemas que pudieran presentarse después (agrietas, asentamientos, tubificación y filtraciones entre otros).

Un proyecto, aunque sea similar a otro en cuanto al área explorada, puede presentar complejidades que ameriten el aumento de la densidad de exploración. Así una posible medida de comparación semi-cuantitativa entre diferentes proyectos es la cantidad de barrenos y socavones (evaluados en metros de perforación o de excavación respectivamente) realizados por km^2 , así como la cantidad de pruebas de permeabilidad por km^2 , considerando el área de la boquilla, lo que implica la zona de la cortina, ataguías y vertedores, y en la mayoría de los casos, la casa de máquinas. Algunos proyectos cuentan con túneles de conducción muy largos y no son considerados en el área de la boquilla. Similarmente en el caso de la exploración geofísica el volumen de exploración puede calcularse tomando en cuenta el número de tendidos sísmicos de refracción (TRS) y sondeos eléctricos verticales (SEV) por km^2 , considerando el área semirregional aproximada que cubren los perfiles. Estrictamente para una comparación del volumen de exploración geofísica se deberían considerar que las aberturas máximas de los electrodos de corriente en los SEV y la longitud promedio de los TRS sean similares en todos los casos. Sin embargo en los casos analizados se tuvieron longitudes variables del orden de 100, 200 y 300 m para los TRS y de 100 a 400 m para las aberturas máximas de electrodos AB/2. Como regla general, la profundidad de investigación geofísica para el sitio de una presa debe ser de cuando menos una tercera parte de la altura de la cortina, esta condición se observó en cada uno de los proyectos analizados, cuya altura de cortina predominante está en el rango de 180 a 250 m y por lo tanto la comparación para los diferentes proyectos se considera válida.

Aunque las presas tienen características únicas, algunas poseen cierta similitud por sus condiciones topográficas o de localización y acceso. Por motivos de comparación se consideró adecuado ordenarlas de acuerdo a la siguiente clasificación, con base a la complejidad encontrada para su construcción, siendo las zonas más complejas aquellas donde, además de la topografía abrupta, hay más roca alterada o discontinuidades importantes en la zona de obras:

- Complejidad baja: (1) Peñitas
 Complejidad media: (3) Aguamilpa (5) El Cajón
 Complejidad alta: (2) Zimapán (4) Chicoasén y (6) La Yesca

En la Tabla 4 se hace la comparación del volumen de exploración directa (geológica) por medio de barrenos, socavones y de mediciones de la permeabilidad en el área de la cortina, mientras que en la Tabla 5 se realiza la comparación del volumen de exploración indirecta (geofísica) en el área semirregional de influencia de cada presa.

Nombre	Períodos de Estudios ³	Área km^2	Barrenación (m)	Barrenación (m/km^2)	Socavones (m)	Socavón (m/km^2)	Pruebas Permeab	Pruebas Permeab/ km^2
Peñitas, Chis.	1965-1986	2.62	14010	5347	870	332	570	219
Zimapán, Hgo.	1980-1989	0.5	6242	12484	743	1486	632	1264
Aguamilpa, Nay.	1960-1983	4	14300	3575	2632	658	960	240

^{3, 4}, Los años de estudios aquí considerados no fueron periodos continuos. Se refiere a todas las campañas de exploración en cada caso. Se incluye el tiempo empleado en otras alternativas diferentes al eje finalmente elegido para la construcción.

Chicoasén, Chis.	1963-1975	1	6700	6700	1980	1980	650	650
El Cajón, Nay.	1962-1996	3.6	10352	2875	427	118.8	978	272
La Yesca, Jal.	1963-2006	1.7	2343	1378	905	523.3	127	75

Tabla 4. Exploración geológica mediante barrenación (con recuperación de núcleo) y socavones y pruebas de permeabilidad en 6 grandes presas de México.

Nombre	Períodos de Estudios ⁴	Área km ²	Total TRS	TRS/km ²	Total SEV	SEV/km ²
Peñitas, Chis.	1965-1986	16	147	9.2	328	20.5
Zimapán, Hgo.	1980-1989	60	153	2.6	362	6
Aguamilpa, Nay.	1960-1983	14	260	18.6	325	23.2
Chicoasén, Chis.	1963-1975	5.1	60	11.76	325	63.72
El Cajón, Nay	1962-1996	33	1095	33.2	936	28.4
La Yesca, Jal.	1963-2006	59	366	6.2	450	7.6

Tabla 5. Exploración geofísica en 6 grandes presas de México

Las figuras 2 y 3 muestran de otra forma la comparación del volumen de exploración geológica y geofísica respectivamente. En estas gráficas el volumen de exploración ha sido normalizado respecto al valor máximo de cada aspecto considerado, sea éste longitud total de exploración, número de pruebas o número de tendidos geofísicos. En cuanto a la exploración directa la figura 2 indica que en los proyectos de Chicoasén y Zimapán es donde se realizó más exploración directa.

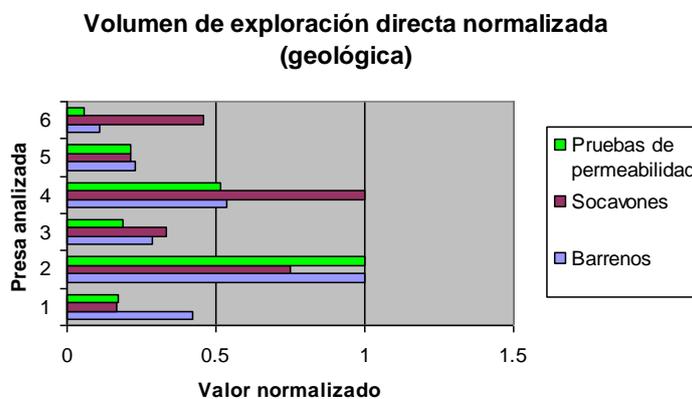


Fig. 2.- Comparación de la exploración geológica relativa a cada método en 6 grandes presas

En cuanto a la exploración indirecta (Fig. 3), los proyectos difieren bastante en el volumen de exploración realizada. En los proyectos sobre el río Santiago (Aguamilpa, El Cajón y La Yesca) el método preferido fue el TRS, mientras que en los demás proyectos se privilegió la utilización del SEV, sobre todo en Chicoasén.

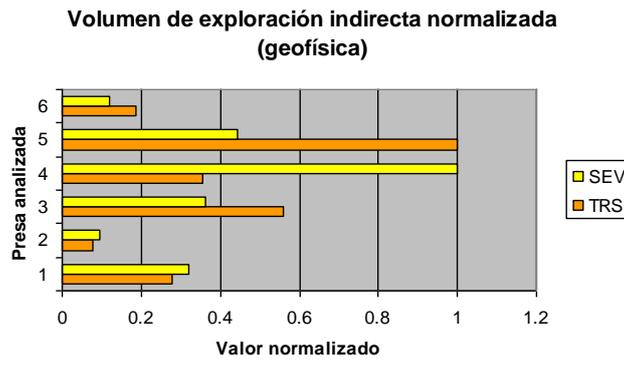


Fig. 3.- Comparación de la exploración geofísica relativa a cada método en 6 grandes presas

Los costos de la perforación con barrenos, excavación con socavones y pruebas de permeabilidad se indican en miles de dólares en la Figura 4 para cada una de las presas analizadas. El costo se estimó utilizando precios actuales de estas actividades en México. En las figuras también se indica el número de años que duró la exploración del sitio.

Costos de exploración directa y años de estudio

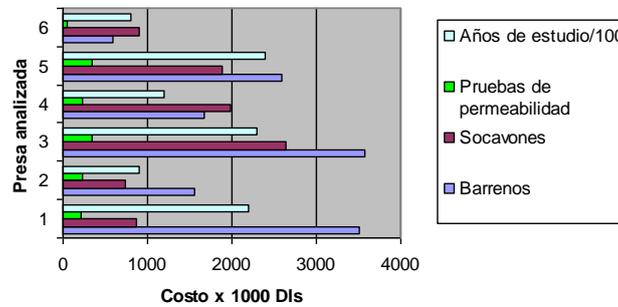


Fig. 4.- Costos de exploración directa y años de estudio en 6 grandes presas

Los mayores costos de la exploración directa con barrenos se dieron en Peñitas (1) y Aguamilpa (3), mientras que los mayores costos por exploración con socavones se dieron en Aguamilpa (3) y Chicoasén (4).

La Figura 5 muestra los costos estimados de la exploración geofísica con los métodos del tendido de refracción sísmica (TRS) y sondeo eléctrico vertical (SEV) en los 6 sitios seleccionados. El cálculo se realizó en base a los precios actuales de SEV y TRS y el número de sondeos o tendidos utilizados en el área semirregional del proyecto.

Costos de exploración indirecta y años de estudio

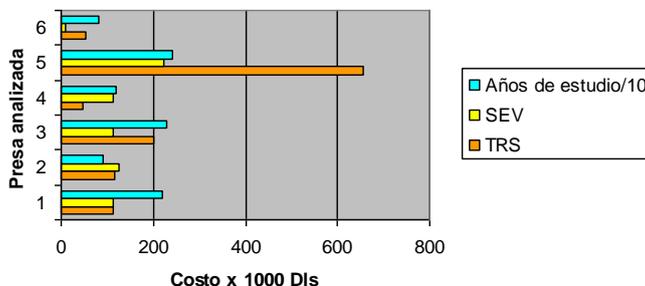


Fig. 5.- Costos de exploración indirecta y años de estudio en 6 grandes presas

En la figura 5 se observa que los mayores costos de exploración indirecta se llevaron a cabo en el proyecto El Cajón (5). Los menores costos en cuanto al método TRS se tuvieron en los proyectos de Chicoasén (4) y La Yesca (6) y los menores gastos totales en exploración en La Yesca. En casi todos los proyectos, excepto para Chicoasén, se observa el mayor peso o casi igualdad en los gastos del método

del TRS en comparación al SEV. Se observa que los gastos para el método de SEV fueron similares para la mayoría de los proyectos, mientras que para el método del TRS hubo fuertes variaciones en los gastos. Las figuras 6 y 7 muestran los costos totales de exploración directa e indirecta respectivamente para las 6 presas.

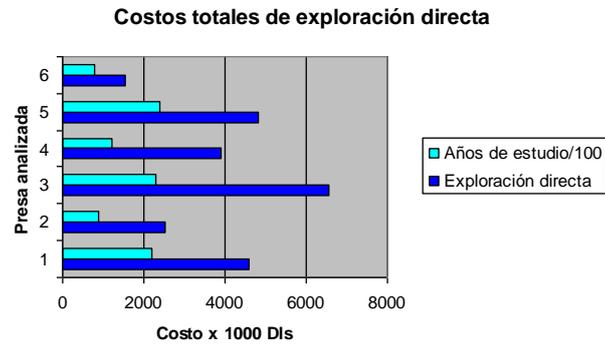


Fig. 6.- Costos totales de exploración directa y años de estudio en 6 grandes presas

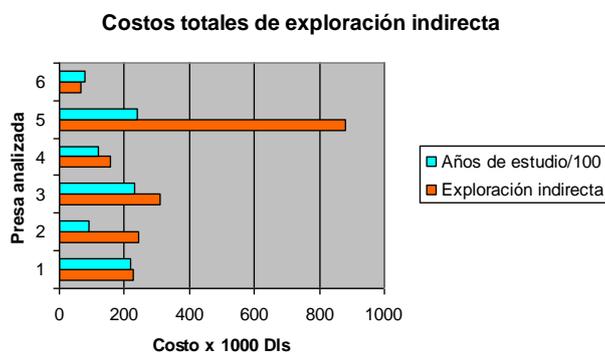


Fig. 7.- Costos totales de exploración indirecta y años de estudio en 6 grandes presas

Se observa que los mayores costos en exploración directa se dieron en Aguamilpa (3) y los mayores en exploración indirecta en El Cajón (5). Por otro lado, los menores gastos en exploración directa e indirecta se dieron en La Yesca (6).

La figura 8 compara los costos de la exploración directa entre la exploración indirecta en las 6 presas analizadas, así como los años de estudio del proyecto y los años en operación hasta el año 2011. Se observa que los gastos de exploración directa/indirecta son por lo general de 20 o más veces en los proyectos analizados, excepto para las presas: (2) Zimapán (10.4) y (5) El Cajón (6.2). El promedio de años de los diferentes periodos de estudio es 16.3, pero predominaron los valores de 20 o más. Por otro lado la presa más joven en operación es El Cajón (4 años), mientras que La Yesca (6) aún no entra en operación.

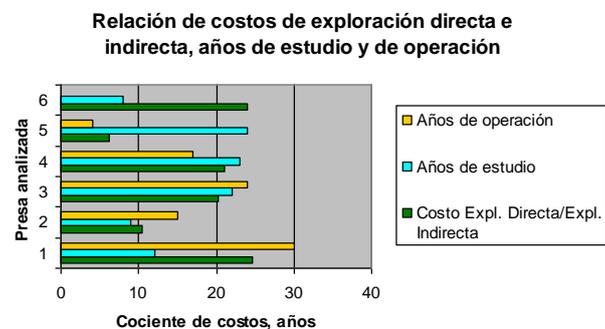
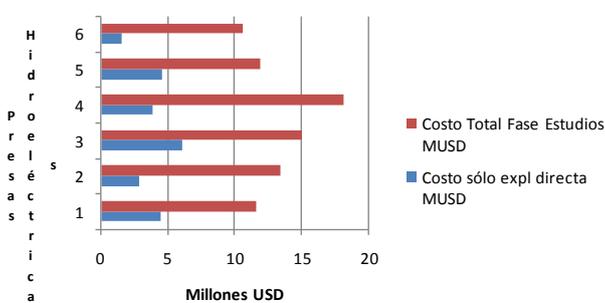


Fig. 8.- Relación de costos de exploración directa e indirecta, años de estudio y años en operación en 6 grandes presas

Finalmente, en la figura 9 se puede apreciar el costo estimado total (actualizando costos al 2011) de lo invertido en la fase de estudios (sólo factibilidad y apoyo a diseño) de las seis presas consideradas en donde resalta que en las presas hidroeléctricas más importantes que se han construido en México, se han requerido entre 10,5 y 18,1 millones de USD durante la fase de estudios. Si bien la información disponible y comparable de todos los proyectos sólo abarcó las fases de factibilidad y apoyo a diseño, estas son las más significativas de los diferentes estudios que se llevan a cabo para conocer el modelo geológico-geotécnico de una futura presa hidroeléctrica. También es de destacar que la que tuvo el mayor costo total asignado a los estudios (incluye la infraestructura para el desarrollo de los mismos, geología, geofísica, sismología, topografía, geotecnia, más la exploración directa, etc.) fue Chicoasén (4) en tanto que La Yesca (6) fue la de menor inversión. Por otro lado, tomando en consideración la proporción del costo de la exploración directa (perforación y socavones) que es la parte más resolutive de un estudio geológico para presa hidroeléctrica con relación al costo total de los estudios, la presa que tuvo la mayor relación en esta fase de estudios fue Aguamilpa (3) con el 40% y la Yesca con la menor con sólo el 14%. Con relación al costo total de los estudios se puede apreciar que existió sí relación entre la cantidad de recursos asignados a algunos proyectos y el grado de complejidad de los mismos, tal es el caso de la Presa Chicoasén, pero no así en algunos otros como en La Yesca. En cuanto a la relación de costo total/exploración directa no se pudo comprobar una relación con la complejidad de cada presa.

Costo Total Estudios vs Expl Directa



6.- Conclusiones

- La certeza financiera del costo constructivo de las grandes presas, además de la eficiencia del diseño en sí, es dependiente de una adecuada etapa de estudios en donde cobran singular importancia los de carácter geológico, fundamentalmente durante las etapas de prefactibilidad y factibilidad ya que constituyen la base para las actividades geotécnicas durante las etapas de factibilidad y apoyo al diseño.
- El análisis de los costos más significativos en la exploración directa e indirecta en las 5 presas más importantes en operación y una en construcción en México indican una variabilidad importante en los volúmenes de exploración y los costos asociados que no guardan una relación directa con la complejidad relativa de las obras, sino más bien, muestra que estas han sido variables ligadas a la disponibilidad de tiempo para realizar estudios.
- Una adecuada planeación de las diferentes etapas de estudios previos a la construcción debería estar bien ligada a la complejidad geológica del sitio. Esto asegurará que el modelo geológico que se tenga al inicio de los trabajos de construcción sea suficientemente bueno como para ser la base del diseño geotécnico de la obra y tener sólo mínimas modificaciones durante el transcurso de la misma. Sin embargo, el proceso de refinamiento de un modelo geológico es una actividad que no tiene fin, pero un número reducido de cambios, siempre será sinónimo de una etapa de estudios suficiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen muy especialmente la valiosa colaboración de los Ing. Gustavo Arvizu y J. Luis Garrido por la revisión del documento y el enriquecimiento que éste tuvo por su amplia experiencia en el campo de la geología aplicada. También agradecen la ayuda de la Comisión Federal de Electricidad por el acceso de la información que se consideró en la elaboración del artículo.

REFERENCIAS

- Allen Marr W, 2001.- Why Monitor Geotechnical Performance?, 49th Geotechnical Conference in Minnesota 10.
- Arvizu L. G., Alcántara D. J., 1987.- Factibilidad Geológica del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán, Hidalgo, CFE, Subdirección de Construcción, Unidad de Estudios de Ingeniería Civil, Superintendencia de Estudios Zona Golfo.
- Bonilla C. & Laporte G., 2006.- La investigación geológica y geotécnica y el diseño estructural de obras hidráulicas en proyectos hidroeléctricos de cogeneración, X Seminario Nacional de Geotecnia – IV Encuentro Centroamericano de Geotecnistas.
- Ananda Sen, M.P.Singh, Vipul Nagar, NHPC Limited, 2010, Application of Geophysical Seismic Refraction Technique for Delineation of Paleochannel in Hydropower Project, ISRM International Symposium - 6th Asian Rock Mechanics Symposium, October 23 - 27, 2010, New Delhi, India. Copyright: 2010, Central Board of Irrigation and Power (CBIP) and International Society for Rock Mechanics (ISRM).
- CFE, 1976.- Proyecto Hidroeléctrico Chicoasén.
- CFE, 1986.- Factibilidad Geológica del P.H. El Cajón, Nayarit, río Santiago, Subdirección de construcción, Unidad de Estudios de Ingeniería Civil, Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Norte.
- CONAE, 2002.- Desarrollo de las energías renovables en México: las perspectivas de la CONAE, presentación en:
<http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/773/1/images/odondebuen.pdf>.
- Delgado V., Vázquez R., Sánchez A., y Malagón M. 1999. Informe del enjambre sísmico del 28 de octubre de 1988, asociado a la C. H. Aguamilpa (Solidaridad). C. F. E. Inédito.
- Dorsey T., editor, 1997.- Large Dams, Learning from the past, looking at the future, Workshops Proceedings, Gland, Switzerland, April 11-12, 1997, The IUCN/Worldbank initiative on Large Dams.
- Gómez Munguía D., Rodríguez Torres R. y Valdéz Guzmán R., 1986.- Factibilidad Geológica del P. H. El Cajón, Río Santiago, Nayarit, Comisión Federal de Electricidad, Unidad de Estudios de Ingeniería Civil, Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Norte.
- González C. Carlos M, 1989.- Ingeniería Geológica del Proyecto Hidroeléctrico Peñitas, Chiapas, Superintendencia de Estudios Zona Sureste, Subdirección de Construcción, Unidad de Estudios de Ingeniería Civil, CFE.
- Head R.C., 2001.- Between a Rock and a Hard Place, At the turn of the runner, HRW, December 2001.
- ICOLD, 1989.- Saving in dam constructions, Bulletin 73: 137.
- ICOLD, 1995.- Dam Failures, Statistical Analysis, Bulletin 99:74.
- ICOLD, 1997, Bulletin 110, Cost Impact of Rules, Criteria and Specifications.
- INEGI, 2009.- Estadísticas históricas de México.
- INEGI, 2010.- Sistema para la consulta de las Estadísticas históricas de México 2009, <http://dgcnesyp.inegi.org.mx/cgi-win/ehm.exe/C1100020010>.
- Moreno Garnica S. y Soto Gutiérrez M. A., 1994.- Monografía Geológica Proyecto Hidroeléctrica Aguamilpa, Nayarit, CFE, Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Subgerencia de Estudios Geológicos, Departamento de Geología.
- Perspectiva del Mercado de la Energía Renovable en México”, datos del sector eléctrico en México, Wikipedia.
- SARH, 1980.- Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Panorama del agua en México. (citado en http://www.eurosur.org/medio_ambiente/bif53.htm).
- SENER, 2006.- Estadísticas.
- Sirri Serren S., Kleberger J., Simsek O., 2002.- Engineering Geological and Geophysical Investigation at the Dam Site Cine/Turkey.
- Smith E. Ronald, 2001.- Geotechnical Baseline Reports: State of the Practice, Proceedings 36 Annual Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering, Luke, Jacobson & Werle (eds) University of Nevada, Las Vegas, March 28-30, 2001.
- <http://www.hidroenergia.net/>.
- <http://hydropowerstation.com/>.- Best Practices on Survey and Investigations of Hydro Electric Projects.
- <http://www.waterencyclopedia.com/Ge-Hy/Hydroelectric-Power.html>.