

3
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

INSTALACION DE UNA RED SISMOTELEMETRICA EN
LOS ALREDEDORES DEL P. H. ZIMAPAN, HIDALGO:
ANALISIS GEOLOGICO DEL AREA.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOLOGO
P R E S E N T A :
MANUEL CRUZ CASTILLO



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

AGOSTO DE 1994



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-042

SR. MANUEL CRUZ CASTILLO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora Ing. Clara Javier Castro, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero geólogo:

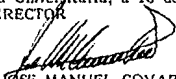
INSTALACION DE UNA RED SISMOTELEMETRICA EN LOS
ALREDEDORES DEL P.H. ZIMAPAN HIDALGO: ANALISIS
GEOLOGICO DEL AREA

- RESUMEN
I INTRODUCCION
II REVISION BIBLIOGRAFICA
III ANALISIS
IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 10 de junio de 1992
EL DIRECTOR



ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS'EGLM'tg

200 AÑOS DE ENSEÑANZA DE LA INGENIERIA EN MEXICO

CONTENIDO

RESUMEN

I. INTRODUCCION

- 1.1. Objetivos
- 1.2. Justificación
- 1.3. Localización del área
- 1.4. Acceso
- 1.5. Población y Cultura
- 1.6. Fisiografía
- 1.7. La Obra Zimapán

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- 2.1. Marco Geológico
- 2.2. Presas Afectadas por Actividad Sísmica
- 2.3. Presas en México

III. ANALISIS

- 3.1. Sismología
- 3.2. Red Zimapán
- 3.3. Distribución de las Estaciones

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

- ANEXO 1
- ANEXO 2
- ANEXO 3

RESUMEN

En el trabajo se reúnen los diferentes puntos de vista en torno a la sismicidad inducida por embalses, se presenta la tectónica del área del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán, y se analiza la sismicidad de la zona; todo esto, para poder proyectar estaciones alrededor del embalse con una adecuada cobertura acimutal, para poder juzgar si presenta o no sismicidad inducida en el tiempo que la presa dure instrumentada.

El Proyecto Hidroeléctrico Zimapán se encuentra en la zona limítrofe de las Provincias Fisiográficas: Sierra Madre Oriental y Faja Volcánica Transmexicana, a 150 km al norte de la Ciudad de México y dentro del sistema hidrológico del río Moctezuma. Se aloja en el Cañón del Infiernillo con una cortina de tipo Arco Bóveda de 203 m de altura.

La geología del sitio está caracterizada: al sur de la cortina, por rocas ígneas extrusivas de composición variada; al norte, por rocas sedimentarias e intrusivas de diferente composición y que dieron origen al metamorfismo de contacto existente en la zona. El área de estudio estuvo sujeta a movimientos tectónicos que causaron plegamiento y fallamiento hasta el Plioceno. La principal orientación de las estructuras es NW-SE (Sinclinal de Maconí y el anticlinal del Piñón al norte) y las fallas regionales son NW-SE, El Doctor, y E-W, falla Tula.

Es común que se altere el régimen sísmico de un lugar con la creación de un embalse; estadísticamente se ha observado que un tirante de agua mayor a los 100 m puede ocasionar sismicidad inducida. Los casos históricos de presas que han presentado sismos con $M_s \geq 6$ a causa del atrapamiento del embalse son cuatro: Cremasta (Grecia), Koyna (India), Kariba (Zambia) y Hsinfenkiang (China); en un período no mayor de 4 años, y donde la geología del lugar se caracteriza por presentar numerosas fallas, a parte de que están en zonas sísmicas. En México se han instrumentado con equipo sismológico tres presas grandes: Chicoasén (Chiapas), Peñitas (Chiapas) y Caracol (Guerrero); de éstas, en la única que se

reportó ocurrencia de sismicidad inducida fue en la de Chicoasén, durante su primer año de llenado.

La región de Zimapán se considera asísmica; con la ayuda de la Red SISMEM, en la zona se han localizado 74 sismos, con un promedio de 3 temblores al año con magnitud (M_s) entre 3 y 4 grados, de los cuales más de la mitad son profundos ($h > 30$ km); el temblor más fuerte que se registró en las cercanías del lugar fue de 4.5 grados, con "ocurrencia superficial". La relocalización de los sismos del área de Zimapán, permiten distinguir dos zonas sismotectónicas, una al SE de la presa que es la zona activa de Actopan, y otra al Norte del proyecto, zona de Landa, que está poco estudiada hasta ahora.

En el P.H. Zimapán se inició la observación sísmica en 1990 con tres estaciones portátiles, y en marzo de 1993 se instalaron 3 estaciones sismotelemétricas. En este trabajo se analiza la distribución inicial de las estaciones, y su relación con la geología del sitio, además de la confiabilidad de los datos obtenidos, para finalmente proponer agrandar la red con dos estaciones más. Para su ubicación se seleccionaron lugares de fácil acceso alrededor del embalse, con línea de vista libre y sobre roca dura.

INTRODUCCION

1.1 OBJETIVO

Proponer sitios alrededor del P.H. Zimapán para la instalación de puestos sismométricos, que tendrán la finalidad de registrar la sismicidad inducida del futuro embalse. Los sitios se seleccionarán en base a la topografía y conforme a las vías de acceso, para obtener líneas de vista en la comunicación por radio y un futuro acceso a las estaciones para su mantenimiento; además de considerar la tectónica del lugar para observar sitios de interés, como son las fallas inversas y normales características del terreno donde se sitúa el P.H. Zimapán.

Se pretende hacer una red donde la distancia máxima entre estaciones sea de 20 km, puesto que para obtener buenas localizaciones las estaciones enlazadas no deben estar a más de 50 km (López, 1972; Lee y Stewart, 1981).

También se evaluará la sismicidad local previa al cierre del túnel de conducción, ya que es importante establecer el comportamiento sísmico natural del sitio y los cambios que éste puede tener con el llenado del embalse.

1.2 JUSTIFICACION

Cualquier presa está sujeta a las siguientes fallas potenciales: incapacidad de la obra de excedencias, filtraciones a través de la cortina, cimentación, fallas de la obra de toma, deslizamiento de laderas del vaso y efectos sísmicos (Vega y Chávez, 1987).

El efecto sísmico, que en ocasiones es muy destructivo, nos obliga a revisar el problema,

ya que es posible que se presente un cambio en el régimen sísmico de una determinada zona por el hecho de construir una presa y crear un embalse con profundidad mayor o igual a 100 m (Vladut, 1993; García, 1973; Alberro, 1990).

La sismotectónica establece que los embalses actúan como un catalizador o liberador de las tensiones internas de la corteza, contribuyendo a que se produzcan terremotos con una frecuencia mucho mayor de la normal durante un tiempo limitado (García, 1973).

En algunas presas y en particular en las de Cremasta (Grecia), Koyna (India), Kariba (Zambia) y Hsinfenkiang (China), se han registrado sismos de magnitud M_s superior a 6, a raíz del primer llenado del embalse. Estos sismos cuyo hipocentros se localizan a profundidades menores de 10 km, ocurrieron en un lapso de 3 a 4 años después del primer llenado (López y Pérez, 1975; Vladut, 1993). Por lo que no es de extrañar que con el atrapamiento de un embalse se originen terremotos en zonas clasificadas como de actividad sísmica nula o muy baja (García, 1973).

Mundialmente, más de 100 presas han presentado el fenómeno conocido como sismicidad inducida; de un total de 36000 presas 293 son grandes y de ellas sólo 124 embalses se han conocidos o estudiados hasta el momento; en pocos casos (5) ha disminuido la sismicidad natural reportada, por lo que un nuevo embalse no implica una reactivación sísmica de la zona, al menos en lo que se refiere a terremotos sensibles por el hombre (intensidad superior a II en la escala Mercalli Modificada), ya que son muchos los embalses donde no se han observado estos terremotos. Sin embargo, no puede asegurarse que no se hayan producido sismos menores a no ser que se hayan instalado observatorios sismológicos. En la actualidad ya es una rutina instrumentar el embalse antes y después del llenado (Lee y Stewart, 1981; García, 1973; Vega y Chávez, 1987; Vladut, 1993).

Tomando en cuenta todas las consideraciones anteriores, surgió la necesidad de instrumentar el P.H. Zimapán, el cual es un proyecto de gran magnitud y que no está exento de presentar el fenómeno de sismicidad inducida; como ha sido el caso de otras grandes estructuras, entre ellas Chicoasén.

1.3 LOCALIZACION

El Proyecto Zimapán se localiza a unos 150 km al Norte de la Ciudad de México, hacia el extremo NW del estado de Hidalgo y E del estado de Querétaro (figura 1). La cortina está desplantada en el Cañón del Infiernillo sobre el río Moctezuma en una boquilla de 203 m de altura, localizada a 464 m aguas abajo de la confluencia de los ríos Tula y San Juan, dentro de la cuenca del río Pánuco. Sus coordenadas geográficas son 20°39'33" de latitud norte y 99°30'06" de longitud oeste. El río Moctezuma funciona como límite natural entre los estados de Querétaro e Hidalgo.

El tanque regulador y la casa de máquinas se localizan a 21 km hacia el NE de la cortina, en la margen derecha del río Moctezuma, en su lado hidalguense. El vaso de almacenamiento inundará parte de los valles de los ríos Tula y San Juan hasta la cota 1563.

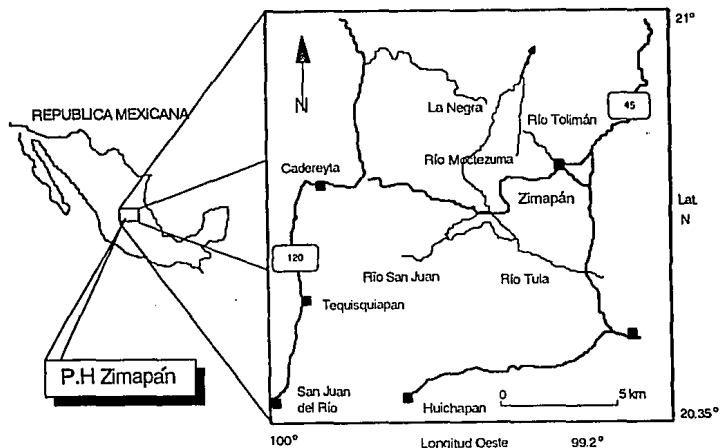


Figura 1. localización y acceso al P.H. Zimapán.

La ubicación del proyecto representa ventajas de interconexión a la red eléctrica, dada su cercanía con las plantas termoeléctricas: Tula, en el estado de Hidalgo y El Sauz, en el estado de Querétaro.

1.4 ACCESO

El acceso al Proyecto Hidroeléctrico es por la carretera 120 que va de San Juan del Río Vizarrón, Querétaro, a Xilitla, San Luis Potosí. Pasando Cadereyta; en el kilómetro 13 se encuentra una desviación hacia el E que conduce a la rancharía de Rancho Nuevo y a la boquilla en el Cañón del Infiernillo (figura 1). De la capital al poblado de Zimapán se llega por la carretera federal 85 (México-Laredo) en aproximadamente cuatro horas.

1.5 Población y cultura

Las poblaciones más importantes cercanas al sitio del proyecto son: Zimapán, Taxquillo y Tecozautla, otros asentamientos humanos de menor importancia, pero más cercanos al sitio del proyecto y que fueron afectados por el embalse de la presa, sobre todo cerca del cauce del río San Juan son: Rancho Nuevo, La Vega, y Vista Hermosa; estos poblados fueron reubicados recientemente en el Nuevo Poblado de Mesa de León. La economía de la región depende en su mayor parte de la minería, agricultura y ganadería (caprina y lanar).

Zimapán es el poblado más grande de esta zona, desde su origen ha sido un distrito minero importante, y cuenta con el mayor número de habitantes en la región, entre 18000 y 20000. Le sigue en importancia la población de Tecozautla cuyo número de habitantes no rebasa los 15000. En los asentamientos humanos de menor importancia (Rancho Nuevo, La Vega y Vista Hermosa), el promedio de población es menor de 2500 habitantes.

El cultivo de frutales es la actividad económica más afectada por la construcción de la presa, con respecto a las otras actividades económicas ésta es la que más sobresalió cuando los pueblos se encontraban en el área del embalse (Proyecto, 1985). Otra actividad es la artesanía manufacturada con la vara de sauce en los poblados de Rancho Nuevo, La Vega y Vista Hermosa, la que se utiliza en la elaboración de cestos y en el acabado de muebles y ciertos accesorios para el hogar.

En el aspecto cultural, solamente en Zimapán, Taxquillo y Tecozautla, existen centros de enseñanza media a media superior y se cuenta con servicios de luz, agua potable, clínicas y hospitales, mientras que en los poblados más pequeños el grado máximo de enseñanza escolar no sobrepasa la educación primaria y solamente Rancho Nuevo cuenta con una clínica de campo.

1.6 FISIOGRAFIA

1.6.1 Provincia Fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de E. Raisz (1964) para las Provincias Fisiográficas Mexicanas (figura 2), el Proyecto Hidroeléctrico Zimapán se encuentra ubicado en los límites de las estribaciones de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental y La Faja Volcánica Transmexicana (FVT), el límite entre ambas se localiza en la confluencia de los ríos Tula y San Juan y al norte del poblado de Zimapán. La Sierra Madre Oriental se caracteriza por cadenas montañosas orientadas NW-SE, cortadas por profundos cañones de paredes abruptas, tanto perpendiculares como subparalelos a ellas y separadas por depresiones topográficas con la misma orientación. En la zona del proyecto, la Faja Volcánica Transmexicana se caracteriza por lomeríos suaves, con extensas mesetas y elementos de forma cónica con diferentes dimensiones. Otros autores la sitúan en el límite entre la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental (Carrillo y Suter, 1982).

1.6.2 Geomorfología

La geomorfología se encuentra gobernada sobre todo por los derrames volcánicos que generalmente forman mesetas de gran extensión de composición básica principalmente,

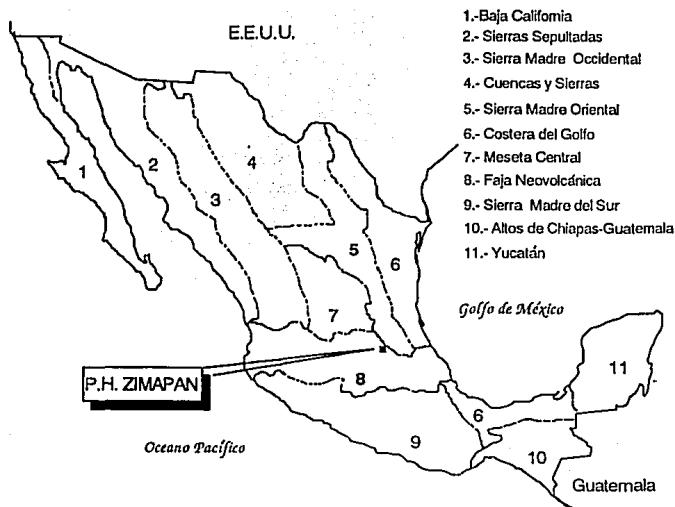


Figura 2. Provincia Fisiográfica.

como es el caso de la Mesa del León (localizada al NW de la zona del embalse) y Saucillo. El plegamiento de las rocas sedimentarias genera un paisaje de anticlinales y sinclinales que se acompañan de fallas normales e inversas, formando lomeríos suaves y bajos así como pequeñas sierras alineadas con su dirección preferencial. En promedio, la altitud es de 1800 m para el área del proyecto, las zonas más prominentes son el Cerro de los Lirios (2300 m) y El Cerro El Espolón (3100 m) en la Sierra El Doctor.

Los agentes erosivos han sido muy importantes en la geomorfología del lugar, ya que han actuado con mayor intensidad en las rocas sedimentarias aplicándoles un estado de erosión maduro, mientras que al actuar con menor fuerza en las rocas volcánicas se observa en éstas un estado de erosión juvenil.

1.6.3 Hidrografía

El área se encuentra drenada por el sistema hidrológico Moctezuma-Pánuco de la Vertiente del Golfo, siendo las principales corrientes permanentes las de los ríos: Tula, San Juan, y Moctezuma (generado por la unión de los dos anteriores), además del Tolimán, Extoraz y Amajac (figura 3).

Esta importante cuenca hidrológica colinda al norte con la cuenca San Fernando Soto La Marina, al noroeste con la cuenca del río Salado, al oeste con la cuenca del río Balsas y al este con la del río Tuxpan-Tecolutla.

Las cuencas del río Tula y San Juan colindan al norte con la cuenca del Bajo Pánuco al sur y oeste con la cuenca del río Lerma en las inmediaciones de Acambay, estado de México, y Guanajuato, al sur y este con la cuenca de México, al este con la de los ríos Tizahuapa y Tulancingo que son afluentes del río Moctezuma, y al norte y este con la cuenca del río Amajac del Alto Pánuco.

El río Tula recibe las excedencias de las aguas negras de la capital de la República, drenando a su paso las regiones de Zumpango en el estado de México, Tezontepec, Mixquiahuala, Progreso e Ixmiquilpan en el estado de Hidalgo; mientras que el río San Juan capta los escurrimientos provenientes del extremo septentrional de la Sierra de Las Cruces, así como la de los alrededores de Palotitlán en el estado de México y San Juan del río y Tequisquiapan en el estado de Querétaro (Palacios, 1982).

El río Tolimán drena parte de la región de Zimapán y confluye con el río Moctezuma a la altura de la rancharía Las Adjuntas, aguas abajo de donde se encuentra la zona minera El Carrizal.

El río Extoraz capta los escurrimientos provenientes del extremo SE del estado de Guanajuato y los de la parte central del estado de Querétaro para confluir en el río Moctezuma aproximadamente a 15 km en línea recta al NW del municipio de Pacula, en el estado de Hidalgo.

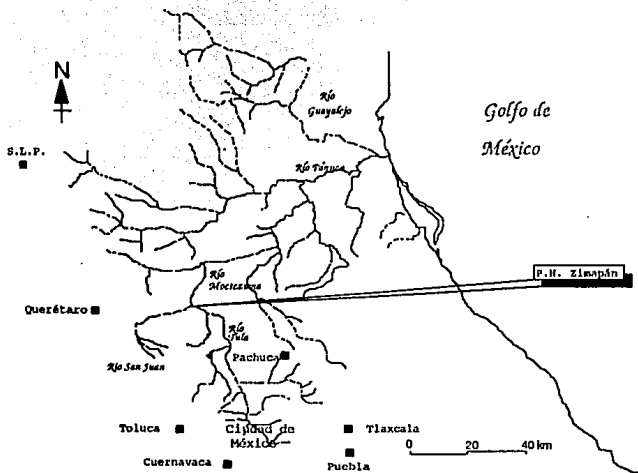


Figura 3. Cuenca Hidrológica Moctezuma-Pánuco.

El río Moctezuma tiene su origen a partir de la unión de los ríos Tula y San Juan a la altura del poblado de Rancho Nuevo, Querétaro, su cuenca abarca una extensión de aproximadamente 9000 km², ocupando hacia el NW la parte central del Valle del Mezquital.

Todos los anteriores ríos se unen para formar el río Pánuco, que desemboca en el Golfo de México a la altura de Tampico, Tamaulipas.

1.7 LA OBRA ZIMAPAN

El P.H. Zimapán es el primero de un sistema de presas situadas a lo largo del río Moctezuma para generar energía eléctrica y el control de avenidas.

Se trata de una cortina de concreto, en una boquilla de 203 m de altura, con separación de 20 m en el cauce del río y 200 m en la parte superior, dentro del sitio conocido como Cañón del Infiernillo. El desvío es a través de un túnel sobre la margen izquierda, donde se ubica también el túnel vertedor.

La planta hidroeléctrica se localiza en la margen derecha con obra de toma en portal y una conducción en túnel de 20.5 km de longitud hasta un tanque de regulación para aprovechar la caída de agua en la casa de máquinas junto al río Moctezuma.

Esta obra contempla la instalación de dos unidades generadoras, constituidas por dos turbinas de tipo Pelton de 140 MW cada una, para producir anualmente un promedio de 1292.4 GWH.

El embalse inundará valles formados por rocas volcánicas y sedimentarias. Las calizas y lutitas están hasta 4 km aguas arriba de la boquilla sobre el río San Juan y sobre el río Tula.

Por la posición horizontal que guardan las tobas y las brechas volcánicas se espera no tener problemas de estabilidad en las laderas, debido a que la mayor parte quedará debajo del Nivel de Aguas Media del Embalse (NAME).

En el anexo 1, se pueden apreciar los datos principales de la obra civil y los hidrométricos, los que nos dan una idea de las dimensiones e importancia del proyecto.

II. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 MARCO GEOLOGICO

2.1.1 Litología

En el lugar afloran rocas sedimentarias y volcánicas, de las cuales, las más antiguas son unas calizas arcillosas alternadas con lutitas calcáreas y algunas areniscas de grano fino de la Formación Trancas del Jurásico Superior-Cretácico Inferior, que subyacen en paraconformidad a las rocas de las Formaciones El Abra - Tamaulipas Superior del Cretácico Medio; les siguen concordantemente las rocas de la Formación Soyatal del Cretácico Superior; sobre estas últimas y en discordancia descansan la rocas de Conglomerado del Morro del Cenozoico, mientras que las más jóvenes son rocas volcánicas del Sistema Terciario, de Edad Plioceno, que descansan en forma discordante sobre todas las rocas.

JURASICO

Las rocas más antiguas en el P.H. Zimapán, afloran en el río Tolimán, albergan a la casa de máquinas y al pozo de oscilación; son unas lutitas calcáreas ligeramente apizarradas y calizas micríticas de estratos delgados intercaladas con capas delgadas de lutitas apizarradas, con un espesor de 400 m, correspondientes a la Formación Las Trancas (Kimeridgiano-Barremiano)(Carrillo y Suter, 1991; Proyecto, 1989-2).

CRETACICO

De la Formación anterior, siguen las calizas del Albiano-Cenomaniano. En el área de la boquilla, el túnel de conducción y la zona del vaso, se observa la Formación El Doctor/Abra que consiste en estratos de 0.2 a 10 m de dolomías, brechas dolomíticas, calizas micríticas fosilíferas y recristalizadas, con conglomerados intraformacionales, de color gris claro a gris oscuro, y con un espesor de 600 a 700 m (Proyecto, 1989-2). Entre la cortina y las oficinas técnicas de Cerro Prieto, en algunos afloramientos del vaso y en el último tramo del túnel de conducción se identifican calizas mudstone-wackstone de capas delgadas-medianas de color crema claro a gris claro y gris oscuro, con

intercalados finos de lutitas y limos no mayores de 20 cm de la Formación Tamaulipas Superior, con un espesor que va de los 300 a los 1200 m.

El Turoniano Tardío-Campaniano está representado por una secuencia tipo flysh de: mudstone color gris oscuro de capas delgado-medianas, lutitas calcáreas amarillas de estratificación delgado-mediana, y margas arcillo-arenosas de color gris verdoso-café; presentan numerosos micropliegues, correspondientes a la Formación Soyatal, y están expuestas ampliamente en la zona donde quedó el túnel de conducción, en pequeñas áreas del vaso en el río San Juan, hacia el W del área, así como en el Cañón del Infiernillo aproximadamente a 250 m aguas arriba del eje de la cortina del proyecto, en donde por cabalgadura se encuentra subyaciendo a la Formación El Abra/Doctor; su espesor es muy variable y en algunos sitios sobrepasa los 300 m.

CENOZOICO

En afloramientos aislados hacia el E de la zona, en los alrededores de la Ranchería el Saucillo, en los alrededores de Zimapán y al NW de la ranchería Mesa de León, se encuentra el Conglomerado El Morro (Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano). Consiste en guijas y cantos de rocas carbonatadas e ígneas cuyo grado de redondez varía de angular a subangular con tamaños entre 10-30 cm; alojan una matriz color roja compuesta por arenas y limos; en ocasiones se le encuentra interdigitando rocas volcánicas ácidas e intermedias, y su espesor es muy variable.

ROCAS IGNEAS

Los cuerpos intrusivos del Paleogeno tienen una composición que varía de granodiorita a diorita y monzonita (Proyecto, 1989-2; Carrillo y Suter, 1991); se encuentran muy dispersos sobre todo hacia la porción N y NE, en casi toda la barranca del río Tolimán, y a lo largo del túnel de conducción (Proyecto, 1989-2). Todo el paquete rocoso de la casa de máquinas (Miembro inferior de la Fm. Trancas) se encuentra afectada por diques ácidos a intermedios, con espesores que varían desde 20 cm hasta casi 3 m (Proyecto, 1989-3), emplazados en las secuencias sedimentarias y que en muchos de los casos están relacionados genéticamente con yacimientos minerales (proyecto, 1989-1); su espesor es muy variable.

Las rocas ígneas extrusivas ácidas representadas por riolitas fluidales (más abundantes),

riolitas esferulíticas, tobas líticas y tobas ácidas, se observan al oriente de la boquilla, sobre el camino que va de Zimapán a la Ranchería del Saucillo y cubren parte del túnel de conducción, tienen espesores de 20-100 m.

Las rocas volcánicas que se encuentran menos expuestas en el área son las intermedias, varían de andesitas piroxénicas a olivínicas, en algunos casos presentan amígdalas que generalmente se encuentran rellenas por clorita, su espesor es variable y se les observa en el macizo conocido como zona potencialmente inestable, aproximadamente 100 m al sur de la confluencia de los ríos Tula y San Juan (Palacios-Nieto, 1982). Son rocas Cuaternarias consideradas con posibilidades de deslizamiento de talud, y tienen una pseudoestratificación poco favorable para el futuro embalse ya que buzcan en la misma dirección y con mayor ángulo que la pendiente del terreno.

Las extensas mesetas poco erosionadas como la de Mesa de León, al NW de Rancho Nuevo, se componen de rocas extrusivas básicas que varían desde basalto andesítico a basalto olivínico, además de piroclastos, bombas, lapillis, tobas pumíticas y cenizas volcánicas de color rojizo (González, 1984); tienen un espesor bastante variable, de 150 a 200 metros.

ROCAS METAMÓRFICAS

El metamorfismo de la región es del tipo contacto; en la obra de conducción en la parte de la Fm. Soyatal los diques transformaron la roca sedimentaria a pizarras con abundancia de minerales metamórficos de contacto (Proyecto, 1989-3). Donde culmina el túnel de conducción se presenta un metamorfismo de grado bajo a alto (ILF, 1988; Proyecto, 1989-3), caracterizado por la presencia de andalucita, escapolita, tremolita, idocrasa, diópsido, granate y wollastonita, asociados en ocasiones a minerales metálicos, además de hidrotermalismo (oxidación) y recristalización; la casa de máquinas se encuentra en la zona de alto grado de metamorfismo, skarn, de granate-wollastonita (Chávez et al, 1991); la aureola de metamorfismo se manifiesta sobre las márgenes del río Moctezuma, desde la Cañada del Espíritu hasta aproximadamente 3 km aguas arriba. Existen milonitas en el contacto de falla de la cabalgadura El Doctor (Proyecto, 1989-2).

RECIENTE

Los abanicos aluviales y depósitos fluviales rellenan los cauces de los ríos y arroyos en

los bajos topográficos y los valles intermontanos, y cubren a las rocas sedimentarias mesozoicas y volcánicas terciarias con un espesor muy variable hasta los 40 m.

2.1.2 Tectónica

La geología estructural del área se puede dividir en 2 secciones: la primera se localiza entre la obra de toma y el poblado de Xajhá y está controlada por la potente secuencia calcárea de la Formación El Abra/Doctor; sus plegamientos son abiertos y amplios con fallas de dimensiones considerables. La segunda se extiende desde el poblado de Xajhá hasta la zona de la casa de máquinas e incluso hasta el poblado de Las Adjuntas, se caracteriza por un plegamiento más intenso constituido por pliegues cerrados, recostados y recumbentes y desarrollo de gran cantidad de fallas de salto pequeño. El límite entre ambas secciones está marcado por la Cabalgadura El Doctor (Proyecto, 1989-4).

Regionalmente en la zona del P.H. Zimapán existen dos sistemas estructurales principales de poca continuidad y espaciamiento de 10-30 m, que son el NW-SE y el E-W. La estratificación tiene rumbo promedio N 10°E e inclinaciones de 7 a 18° al NW. Se han reportado en la literatura tres eventos tectónicos durante el Terciario que son los siguientes:

Paleoceno- Eoceno Temprano

Durante este tiempo tuvo lugar una importante fase de deformación compresiva, la Orogenia Laramide (Carrillo y Suter, 1991), que ocasionó pliegues asimétricos cerrados y cabalgaduras en las rocas calcáreas cretácicas, produciendo plegamientos con orientación preferencial NW-SE así como fallamiento, fracturamiento y cabalgamiento paralelos a la tendencia estructural. Puesto que se presentan tanto pliegues como cabalgaduras (con fallas de deslizamiento asociadas), el comportamiento de las rocas varió de plástico (dúctil o incompetente) a rígido (frágil o competente) (síntesis, 1993).

La competencia estructural de las rocas carbonatadas de la Formación el Doctor/Abra se manifiesta por la presencia de cobijaduras a lo largo del banco calcáreo El Doctor y de ambos bordes de la plataforma de Valles-San Luis Potosí.

El alineamiento del eje de las estructuras y la ubicación de las cabalgaduras que se observan a lo largo de la Sierra Madre Oriental puede ser explicado regionalmente por una concentración de esfuerzos tectónicos causados por la subducción de la paleoplaca Farallón debajo de la Placa Americana, la cual sufre un empuje al NE (Coney, 1978). La Formación Conglomerado El Morro viene a marcar el final de la etapa compresiva de la Orogenia Laramide.

Eoceno -Oligoceno Temprano

En este lapso de tiempo se presentó al menos una fase de deformación distensiva que originó algunas fosas tectónicas y que coadyuvó al emplazamiento de los intrusivos eocénicos (Proyecto, 1989-1; Carrillo y Suter, 1991; síntesis, 1993).

Mioceno Tardío Plioceno

Durante este período ocurren cuatro fases, la primera fue de tipo distensiva que dio lugar a fallas normales de dirección WNW-ESE, y que pone en contacto a las calizas de la Fm. El Doctor/Abra con los productos volcánicos de la base del río San Juan (síntesis, 1993).

La segunda fase empezó siendo compresiva, y combinándose posteriormente con esfuerzos distensivos que generó fallas laterales derechas orientadas N 40°-80° W. Esta fase parece concluir con esfuerzos netamente distensivos que provocaron algunas fallas normales de dirección NE-SW (síntesis, 1993).

La tercera fase de deformación fue también distensiva y dio origen a fallas normales de dirección N-S a NW-SE, de éstas destacan las de Uxdejhé y Las Rosas, que definen el Graben de Pathé y cuya edad debe ser más reciente de 7 millones de años (síntesis, 1993).

La cuarta fase de deformación fue de tipo distensiva, originando fallas con dirección prácticamente E-W; deben haber ocurrido hace menos de 6.2 millones de años. De acuerdo a diversos autores (síntesis, 1993), el área no ha estado sometida a esfuerzos capaces de dar lugar a nuevas fases de deformación reconocible en campo desde hace unos 4 millones de años.

ESTRUCTURAS LARAMIDICAS

Sinclinorio de Maconi.- Esta estructura está constituida por rocas de la Formación Soyatal con una orientación N 40°W. Se delimita al sur por la cobijadura El Doctor, mientras que su flanco norte lo constituye el Anticlinorio El Piñón. Se caracteriza por presentar gran cantidad de plegamientos (recostados, recumbentes, asimétricos, etc.), micropliegues producto de los esfuerzos compresivos a que estuvo sujeto, y por tres sistemas preferenciales al NW, al igual que por los diferentes diques que hay en el área (Proyecto, 1989-2).

Anticlinorio El Piñón o de Bonanza.- El rumbo general de la estructura es N 40°W y se encuentra constituido por rocas de las Formaciones Las Trancas, El Abra-Tamaulipas y Soyatal con un ancho de 11 km; se extiende en el cañón del río Moctezuma sobre el área comprendida entre la mina La Negra y el rancho Las Moras, estando delimitada al sur por el Sinclinorio de Maconi y al norte por el Sinclinorio Aguacate. Entre el inicio del Anticlinorio y su cresta se presentan plegamientos con amplitudes variables de estructuras recumbentes al SW con una morfología bien diferenciada entre sus formaciones. La Formación Tamaulipas constituye las partes altas y está en contacto normal con la Formación Soyatal al inicio del anticlinorio; la Formación Las Trancas integra el núcleo del anticlinorio (Proyecto, 1989-2). El flanco suroccidental está formado por una serie de pliegues de tipo *chevron* con ejes subhorizontales (Carrillo y Suter, 1991).

Sinclinal de El Aguacate.- Se designa con este nombre al sinclinal con núcleo en la Formación Soyatal y flancos en la Formación Tamaulipas, delimitado en el surponiente por el Anticlinorio de El Piñón (flanco ligeramente recostado) y en el nororiente, por el Anticlinal de Bonanza.

Anticlinal de Bonanza.- Esta estructura forma un pliegue-falla recostado al nororiente y cabalga sobre el Sinclinal de El Fraile. El flanco suroccidental del pliegue tiene una inclinación normal de 60-70° en la Formación Tamaulipas mientras que su flanco nororiental tiene en la misma Formación una inclinación invertida de 23°. Este flanco recostado está cortado por una cabalgadura de igual inclinación. El contacto tectónico entre el flanco recostado del anticlinal y el Sinclinal de El Fraile aflora en el Cañón del

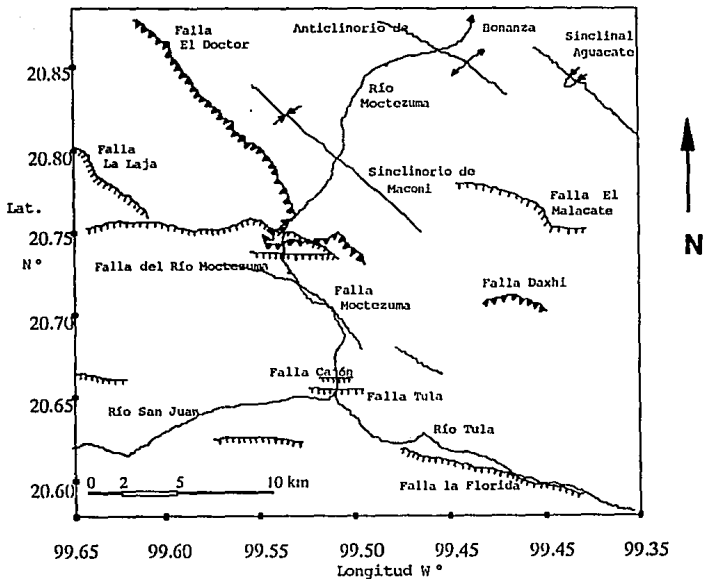


Figura 4. Principales fallas y fracturas en el P.H. Zimapán (Cepeda et al; 1985).

río Moctezuma y más al suroriente sobre el camino rural que liga Milpas Viejas con El Baile.

Anticlinal y Sinclinal La Plomosa

Anticlinal.- Se manifiesta aguas arriba de lo que es el portal de salida del túnel de desfogue, presentándose como un anticlinal asimétrico, con su plano axial inclinado 60-

70° al SW, de tipo marcadamente convergente clasificado como "pliegues de rodilla" y que tiene en su flanco noreste capas verticales y subverticales; el eje del anticlinal tiene un rumbo N 45° W - 70° SW. Como característica de esta estructura se presenta mineralización abundante en su núcleo alojada en la zona de fracturamiento a las que sella (Proyecto, 1989-3).

Sinclinal A.- Se presenta contiguo a la estructura anterior observándose como un pliegue asimétrico con un plano axial inclinado al SW con 70°. En su flanco noreste las capas se observan inclinadas en un rango de 20 a 30°. Las capas del flanco SW llegan a ser verticales.

Paquete estructural de La Mina del Rey.

Estas estructuras se componen de dos anticlinales y un sinclinal. Se localizan desde el N hasta el E de la casa de máquinas, cruzando el río Moctezuma al N de la obra civil.

Anticlinal y Sinclinal B.- Consisten en dos pliegues inclinados al NE. La traza del plano axial en ambas estructuras está bien definida en sus afloramientos, sin embargo, su rumbo puede variar en unos cuantos metros. La dirección general de estas estructuras es N 40° W recostados al NE con 45°.

Anticlinal El Rey.- Se ubica al noreste de las estructuras anteriores, mostrando características similares, con la peculiaridad de presentar concentración metálica en su núcleo (Mina del Rey), su rumbo general es N 42°W - 45° SW, y también es recumbente al NE (Proyecto, 1989-3).

FALLAS Y FRACTURAS

Las principales discontinuidades son: Cabalgadura El Doctor, Falla Tula, Falla Cajón, así como fallas, fracturas y rasgos estructurales de menor importancia, que se observan sobre todo en la zona de la boquilla; en esta área se reportaron cinco familias de fracturas con pequeñas diferencias arriba y abajo del Cañón. Las discontinuidades han sido selladas por calcita que precipitó; por otra parte, persisten hacia abajo muchas juntas, que cortan únicamente al macizo (ILF, 1988).

Cabalgadura El Doctor. Es la estructura de mayor magnitud en la zona, presenta una traza paralela al alineamiento característico de las estructuras de la Sierra Madre Oriental, tiene una dirección NE con respecto al eje de la boquilla; en el área del túnel de conducción tiene un rumbo N 40°W con inclinaciones variables de 15°, 12° y 6° al SW, y una longitud de 20 km sufriendo un cambio de dirección N 30°W al entrar al puerto de Bothiña (Proyecto, 1989-2). Esta estructura se extiende hacia el NW hasta la Cañada del Angel (Carrillo et al, 1982); dentro de la zona del proyecto, es reconocida desde la ranchería de Xajhá hasta aproximadamente a 3 km al SE de la población El Doctor, Qro., donde se encuentra interrumpida por el cañón del río Moctezuma; cruza el eje del túnel de conducción a unos 8.35 km aguas abajo de la toma, mientras que hacia Xajhá parte de ella se encuentra cubierta por rocas volcánicas terciarias; pasa por debajo de la cortina aflorando unos metros aguas arriba donde se encuentra interrumpida por la Falla Cajón que la desvía 40 m hacia abajo. Es un corrimiento de gran magnitud (15 km) (Proyecto, 1989-4). La manifestación superficial de esta cabalgadura consiste en un cantil continuo, que se atenúa en el contacto de las dos formaciones. En el río Moctezuma la cabalgadura se presenta con una inclinación de 24° hacia el SW.

Cabalgadura La Pilas. Tiene un rumbo N 45°W e inclinación de 20°, 30° y 45° al SW; aflora con una longitud de 2 km, y al SE está cubierta por la Formación Las Espinas. En el lugar que aflora (al SW de Xajhá), presenta una brecha cataclástica milonítica de 4-8 m de espesor con clastos y pequeños bloques de las calizas El Abra-Tamaulipas seguidas por estratos de la Formación Soyatal de 15 a 25 m de espesor (Proyecto, 1989-2).

Además de las estructuras laramídicas, existen en la región otras generaciones de deformaciones, que son:

- a) Deformaciones extensionales (fosa tectónica del Cobrecito),
- b) Estructuras compresivas de edad post-formación Las Espinas,
- c) Fallas normales de tipo *Basin and Range*, como las de la presa Zimapán,

ESTRUCTURAS POSTLARAMIDICAS

FALLA TULA

El fallamiento normal dentro de esta zona es poco importante pues la distribución de las fallas es irregular con orientación predominante NW-SE y en menor escala NE-SW, la

estructura más importante es la **Falla Tula**, ésta controla el contacto entre la Formación El Abra y las rocas volcánicas terciarias; pasa cerca de la confluencia de los ríos Tula y San Juan casi a la entrada del Cañón del Infiernillo, y también se observa bajando de Cerro Prieto hacia la cortina aproximadamente a un 1 km de distancia, donde se encuentran en contacto las Formaciones Tamaulipas Superior y Soyatal, con una longitud de 7 kilómetros, un salto elevado de 630 metros e inclinación de 75° hacia el S, extendiéndose paralelamente al cauce de los ríos Tula y San Juan desde aproximadamente 1 km al NE de Rancho Nuevo hasta aproximadamente 4 km al NW de la Ranchería El Saucillo. Esta falla está considerada como inactiva(?) (Sansores y González, 1991). Aunque otros autores encabezados por Suter (1992), consideran a esta falla como el límite norte del que ellos definieran como semigraben de Aljibes, y por su orientación creen que esta falla tiene relación con las zonas activas de Acambay, El Cardonal y el sistema de fallas Venta de Bravo; además estiman que de ocurrir un sismo, sería de 6 y 7 grados de magnitud (M_w) aproximadamente.

Otra falla normal de menor magnitud es la **Falla Cajón** (subsidiaria de la Falla Tula), se localiza a unos 80 metros aguas abajo de la entrada al Cañón del Infiernillo, es paralela a la Falla Tula, y afecta solamente a las rocas de las Formaciones El Abra y Soyatal; desplaza a la Cabalgadura El Doctor 40 m hacia abajo. Esta falla es muy local ya que se pierde al unirse con la Falla Tula, presenta una longitud aproximada de 300 m con un salto aproximado de 40 metros (Palacios, 1982; síntesis, 1989), y tiene un rumbo N 75°E e inclinación de 48° al SE.

Falla del Río Moctezuma.- Falla del tipo normal, con un salto de 300 m y probablemente relacionada con focos sísmicos (Sansores y González, 1991).

Falla La Florida. Es de tipo normal y está asociada a focos sísmicos (op. cit. Sansores y González, 1991).

Falla La Laja. Se sitúa dentro de la Formación El Doctor y se asocia a focos sísmicos (op. cit. Sansores y González, 1991).

Falla Yethay. Está ubicada a 1 km al NE de la boquilla sobre la margen derecha del río Moctezuma, presenta una orientación NW-SE y su longitud es de 5.6 km, en su parte SE

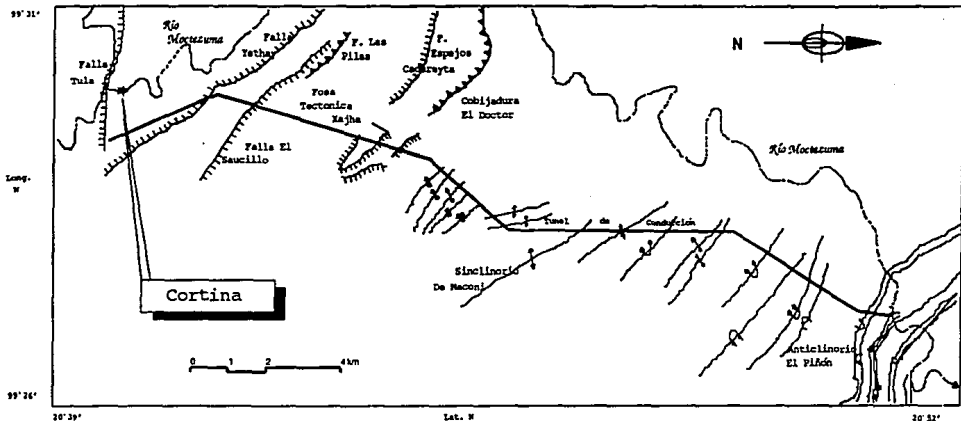


Figura 5. Detalle de las fallas y estructuras que afectan al túnel de conducción (Proyecto, 1989-4).

se encuentra cubierta por rocas volcánicas. Esta falla tiene la peculiaridad de limitar dos bloques cuya estratificación en su parte SW se encuentra buzando al NE, mientras que su porción NW lo hace al SW.

Falla El Saucillo. Esta falla se ubica a 600 m al NE de la Falla Yethay, presenta una orientación NW-SE y su longitud es de 3.8 km; en su parte SE está cubierta por rocas volcánicas, denotándose alineamientos sobre estas rocas de 5 600 m. Entre las dos fallas anteriores (Yethay-Saucillo) se constituye un Horst formado por rocas de la Fm. El Doctor, y se observa gran cantidad de plegamientos (Proyecto, 1989-2).

Falla los Espejos Cadereyta. Falla normal con rumbo N 48°W e inclinación de 80° al SW con afloramientos en una extensión a rumbo de falla de 6.5 km. Al SE se encuentra cubierta por rocas volcánicas.

En la zona del vaso existen también algunas fallas normales que en ocasiones alcanzan varios kilómetros de longitud y afectan tanto a las rocas sedimentarias como a las volcánicas; se considera que el desplazamiento de estas fallas es mínimo y presentan una inclinación hacia el NE, aunque generalmente son verticales; su importancia es mínima y sólo son detectables mediante reconocimientos geológicos a semidetalle (González, 1982).

Es importante señalar que al suroeste del proyecto aproximadamente a unos 130 km, existe una zona de fallas activas con dirección promedio E-W, donde una de las más importantes estructuras es la Falla Venta de Bravo con longitud de 45 km y corrimiento vertical de 2 mm/año (Suter y Quintero, 1992).

2.2 PRESAS AFECTADAS POR ACTIVIDAD SISMICA

Las presas son elementos sujetos a posibles fallas, y hasta el momento no es muy clara la relación entre la carga del embalse y los sismos; a través del análisis del comportamiento de varias presas, se ha discutido la posible modificación del régimen sísmico de una determinada zona por el hecho de construir una presa y crear un embalse.

Dentro de la literatura, se han discutido varios casos de presas afectadas por sismos que se atribuyen al cambio de esfuerzos en la zona del embalse. La tabla 1 del anexo 2 consigna junto con el nombre de la presa y sus características, las del terremoto que la afectó (nombre, fecha, magnitud e intensidad en la escala Rossi-Forel (RF), Mercalli modificada (MM) o japonesa (JMA)) y los daños sufridos en la estructura. En dicha tabla las presas se han ordenado según la fecha del terremoto que las afectó empezando por el de Charleston en 1886 y terminando por el de San Fernando de 1971. En ella se incluyen los terremotos inducidos por los embalses de Hsinfenkiang (China) y Koyna (India) que en mayor o menor grado causaron daños a la estructura.

De acuerdo con López y Pérez (1975) se observa que:

- 1.- El mayor número de presas que han sido afectadas por terremotos, independientemente de las condiciones tectónicas particulares en las cuales están ubicadas, se encuentra en el oeste de los Estados Unidos y Japón (Cinturón Circumpacífico).
- 2.- La mayoría de las presas dañadas son de tierra, construidas entre 1880 y 1958 con métodos antiguos y usando normalmente rellenos hidráulicos, técnica que era usada principalmente en el oeste de los Estados Unidos.
- 3.- Las presas de gravedad de Hsinfenkiang (China) y Koyna (India) fueron dañadas por terremotos que se cree fueron inducidos por el propio embalse. Los daños en las estructuras fueron importantes, pero en ningún caso se llegó a la ruptura.
- 4.- Dentro del grupo de las presas de materiales sueltos la presa más alta (84 m) afectada por terremotos fue la de Cogoti (enrocamiento) en Chile. Esta presa, que sufrió asentamientos de 38 cm, fue la primera de su tipo que se proyectó teniendo en cuenta los efectos sísmicos.
- 5.- Las presas situadas en la falla de San Andrés no fueron destruidas en el terremoto de San Francisco.

La sismicidad que se presenta cerca de las presas no debe asociarse directamente con el embalse ya que existen obras construidas en zonas donde la sismicidad es alta (López y Pérez, 1975). Es por esto que algunas presas que se consideran de clásica sismicidad inducida, hoy en día se han puesto en duda, y se dice que la sismicidad que las afectó pudo haber tenido origen natural (Guzmán, 1993).

La sismicidad inducida por embalses (SIE) afecta en lo particular en áreas de baja sismicidad natural, porque el tamaño de los sismos inducidos tienen un poder potencialmente excesivo con respecto al nivel de la sismicidad natural. En áreas de la más alta incidencia de actividad sísmica natural, la Sismicidad Inducida por Embalses puede favorecer un incremento en la frecuencia de los eventos sísmicos.

En el anexo 2 se muestran las presas que han originado sismicidad inducida, sus características, condiciones geológicas y tectónicas de la zona y la sismicidad antes de la construcción; destacan los siguientes puntos:

- 1.- La energía liberada en terremotos producida por el hecho de crear un embalse, ha sido considerable. Se han alcanzado magnitudes superiores a 6 en cuatro presas (Koyna, Cremasta, Kariba, Hsinfeskiang).
- 2.- La altura de la columna de agua parece jugar un papel muy importante en la activación de sismicidad. Exceptuando un pequeño número de presas (entre ellas, Camarillas, de España, con sólo 36 m de altura), todas aquellas cuyos embalses han inducido terremotos sobrepasan los 100 m.
- 3.- No hay relación entre la geología del vaso y el incremento de la actividad sísmica, ya que se han inducido terremotos en todo tipo de rocas, incluso en suelos débilmente cementados, como en el caso de Mangla (Pakistán). Sin embargo, hay autores que apoyan la idea de que en medios estratificados se favorece este fenómeno (Guzmán, 1993), y que la presencia de fallas normales y transversas junto con la heterogeneidad del subsuelo son los rasgos geológicos más propicios para la generación de sismos (Alberro, 1990; Guzmán, 1993).

2.2.1 Mecanismos propuestos para explicar el fenómeno de sismicidad inducida

Algunos autores han propuesto diferentes mecanismos causantes de los terremotos generados en las presas citadas en el anexo 2 para explicar la liberación brusca de energía, entre los que destacan:

- 1.- Cambios en las propiedades físicas de la roca del vaso.
- 2.- Efecto directo de la carga del embalse que da lugar a reajustes y basculamientos de los bloques que constituyen la base del embalse.
- 3.- El llamado "efecto de gatillo", en el que la sobrecarga actúa en áreas en las cuales el estado previo de tensiones era ya crítico antes del embalse.
- 4.- Efecto combinado de la disminución de tensiones efectivas por aumento de la presión del agua filtrada a través de diaclasas, fallas, etcétera, con la consiguiente disminución de la resistencia al corte a lo largo de planos débiles, dando lugar a condiciones límites en estos planos que, además, están lubricados por el agua.
- 5.- Porque las obras se localizan cerca de zonas con gran actividad sísmica.

El primer caso puede producirse en terrenos especiales, tales como los cársticos, pero no puede explicarse en otras formaciones ni justificar el orden de magnitud de la energía liberada en muchos de los terremotos inducidos.

Los mecanismos citados en el segundo y tercer punto han sido indicados como los apropiados para explicar la sismicidad en torno a presas como Kariba, Koyna, Lago Mead y Cremasta; en Kariba las deformaciones y tensiones de corte fueron motivadas por el embalse, los terremotos se produjeron como consecuencia de la reactivación de fallas preexistentes originada por un efecto de gatillo causado por el peso del agua. Este fenómeno sin embargo no puede generalizarse, ya que en la presa Grand Coulé no se han observado terremotos, a pesar de que el embalse es mayor y la roca del vaso es similar a la de Koyna.

La teoría expuesta en cuarto lugar ha tenido auge en los últimos tiempos, considera la pérdida de la resistencia al esfuerzo cortante por lubricación del material de relleno de diaclasas, fallas y contactos entre formaciones distintas así como la disminución de la presión efectiva por aumento de la presión intersticial.

El quinto caso es una explicación reciente que propone revisar sólo los casos de sismicidad inducida bien documentados para no caer en errores y buscar mecanismos que no pudieran existir, este es el caso de Kurobe, Cremasta y Aswan que están localizados en zonas activas y según Guzmán (1993), basado en los estudios de Meade (1991), su sismicidad es natural; y afirma que las presas: Hsienfenkiang, Kariba y Koyna presentan información insuficiente para soportar una conclusión.

En la actualidad, la altura de la columna de agua parece jugar un papel muy importante que el volumen de agua embalsada, así, a mayor altura del embalse, mayor riesgo de generación de sismos (López, 1975; Vladut, 1993; Alberro, 1990; García, 1973, Guzmán, 1993). Otros autores coinciden con la observación de que cuando el ritmo de

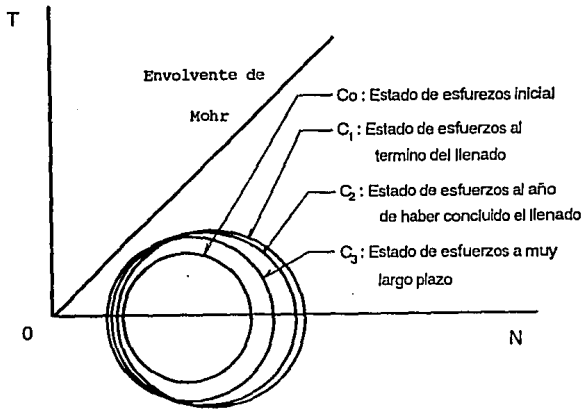


Figura 6. Círculo de Mohr representativo del estado de esfuerzos efectivos en un punto del eje X, al transcurrir tiempo (Alberro, 1990).

llenado cambia con gran rapidez, la relación sismicidad-nivel de embalse se hace muy clara (Javier, 1992).

Aunque existen excepciones, pues un porcentaje significativo de la SIE se asocia a un período lejano al llenado, en algunos casos los eventos han ocurrido mucho tiempo después (por ejemplo: Marathon, 8 años; Clark Hill, 22 años; Cajuru, 18 años; Aswan, 17 años) (Vladut, 1993). Los estudios de Alberro (1990) concluyen que el estado de esfuerzos en los embalses con el tiempo tiende a la estabilidad original pero a muy largo plazo (figura 6).

2.3 PRESAS EN MEXICO

En México, no se han reportado daños ocasionados por sismos en las presas y se puede decir que excepto casos muy aislados, por ninguna otra causa (Vega y Chávez, 1987; Marengo, 1993). No obstante, existe un gran interés por instrumentarlas ya que se trata de obras civiles de gran tamaño y por los efectos que pueda causar el comportamiento tectónico de cada sitio.

Desde 1960, la instrumentación sísmica cobró importancia en nuestro país, a raíz del sismo de 1957. Esta inició con equipo de medición de temblores fuertes (acelerógrafos) y las grandes presas, tales como La Villita, Infiernillo y La Angostura fueron de las primeras estructuras que tuvieron un registro de su comportamiento ante sismos.

Las presas que se han instrumentado con equipo sismológico son: Manuel Moreno Torres (Chicoasén), Peñitas, Carlos Ramírez Ulloa (Caracol), así como proyectos hidroeléctricos tales como Aguamilpa, Tenosique, La Parota, Tecate, Cuenca del río Yaqui, San Juan Tetelcingo, junto con la nucleoelectrica Laguna Verde. Las características más importantes de la obra civil de algunas de estas presas aparecen en la tabla 1.

INSTRUMENTACION

La determinación de las coordenadas focales, magnitud y hora de ocurrencia de

terremotos exige un mínimo de cuatro sismógrafos en torno a la zona del embalse. Es necesario que la zona objeto de estudio quede de preferencia inscrita dentro de la red de sismógrafos y ha de procurarse además que el recubrimiento acimutal sea lo más completo y homogéneo posible (Lee y Stewart, 1981; López y Pérez, 1975).

Se puede decir que la primera presa del país instrumentada con equipo sismológico fue La Angostura, ya que a raíz de la ocurrencia de un enjambre sísmico que destruyó varias construcciones en la población de Chiapa de Corzo, se instaló un sismógrafo de registro en papel ahumado; posteriormente se instalaron otros en las poblaciones de Ocosingo, y Tecpatán, Chis., para registrar la sismicidad próxima a los proyectos hidroeléctricos ubicados sobre el río Grijalva.

Presa	Construcción	Llenado	Tipo de corbata	altura m	Corona m	Volumen Mm ³	Río
Manuel Moreno Torres (Chicoasén)	1977-1980	mayo 80 a jun 80	T y E	281	550 a.	1680	Grijalva
Carlos Ramírez Ulloa (Caracol)	ene 82 a dic 85	jul 86 a principios 87	T y E	128	360 a.	5.9	Balsas
Peñitas	nov 74 a 85?	ago 86 a dic 86	T y E	43	420 ?	1500	Grijalva

Tabla 1. Características Civiles de las presas que han tenido una instrumentación sísmica importante en México.

A continuación se hace una breve descripción de la instrumentación en las presas: Chicoasén, Caracol y Peñitas, resumiendo los resultados obtenidos.

PRESA CHICOASEN

La presa Chicoasén tuvo un registro sísmico previo al llenado con una estación contadora de eventos ubicada en las afueras del poblado del mismo nombre desde 1975; posteriormente se instalaron otras 2 estaciones y en 1980, después de terminado el llenado se instrumentó el embalse con 7 estaciones en un área de 25 X 25 km alrededor

de la cortina. El arreglo de estaciones fue variando y en 1991 se decidió retirar el equipo, pues se consideró que el embalse no tenía peligro de presentar inducción sísmica debida a la carga hidráulica, ya que la actividad observada era la propia del área (Mena, 1992; Javier, 1993), y el registro finalizó en enero de 1992.

Istrumentación

Durante el llenado de la presa (22 abril-9 de sep. de 1980) se presentó sismicidad inducida a una razón de 5 eventos al día (este fue el período de mayor actividad en la presa), cantidad que decreció después de septiembre a un evento por día (Havskov et al, 1981), después de 1981 la sismicidad se conservó, sólo que los sismos se hicieron más profundos, hasta 12 km (Rodríguez et al, 1982). En 1982 los sismos fueron mucho más profundos, 30 km; y el incremento que se observó en la ocurrencia sísmica se asoció al Volcán Chichonal que hizo erupción en abril de 1982. La sismicidad que ocurrió en el área se asoció a las fallas Tecpatán-Bochil y Malpaso-Tuxtla Gutiérrez, y para los años posteriores a 1982 parece que la actividad se estabilizó (Domínguez et al, 1985). En 1989 ocurrieron cuatro eventos de magnitud $M_c \geq 3$ en Chiapa de Corzo donde existe el antecedente de los sismos de 1975, con $M_c = 4.3$ y profundidad focal menor a 5 km (Javier y Lermo, 1990). Durante 1991 la actividad sísmica se caracterizó por la presencia de enjambres sísmicos, que es una característica natural en el comportamiento sísmico del estado de Chiapas (Javier, 1993). La figura 7 muestra los sismos ocurridos en este período, se grafica número de eventos contra tiempo, y se observa que, salvo en 1980 (año del llenado), se registraron un promedio de 200 eventos locales al año.

PRESA PEÑITAS

La presa Peñitas se localiza en el extremo Norte de la serie de centrales hidroeléctricas que se encuentran sobre el río Grijalva, su embalse se llenó de agosto a diciembre de 1985.

Para poder observar el comportamiento sísmico de la presa se instalaron 3 sismógrafos en 1985, poco tiempo después se instaló una cuarta estación. En 1988 se modificó la red con dos estaciones telemétricas, dejando de funcionar dos estaciones autónomas y

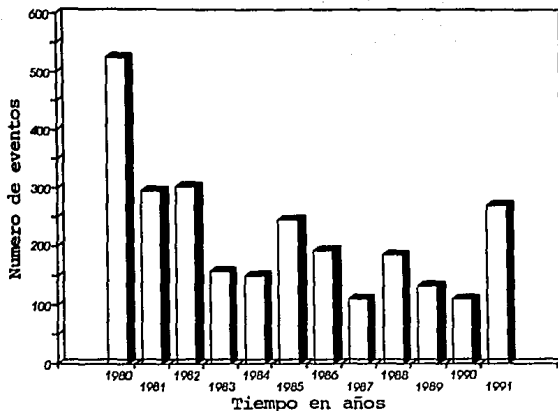


Figura 7. Número de temblores ocurridos en el embalse de la C.H. Chicoasén, en un área no mayor a 30 km alrededor de la cortina.

quedando el área con una cobertura pobre de octubre de 1988 a junio de 1990, año en que los estudios se apoyaron con estaciones de la red de Chicoasén por encontrarse próximos a ésta presa. En 1992 concluyó la instrumentación en Peñitas.

Instrumentación

Durante el llenado de la presa (agosto-diciembre de 1985) se localizaron 8 eventos en la zona del embalse (Lermo et al 1989), considerados como inducidos; para los años posteriores la sismicidad se consideró natural (Nava, 1987; Nava, 1993) donde la mayoría de los simos se situaron al SE de embalse cerca de Tecpatán (Lermo, 1990); la poca actividad de 1988 se relacionó con el Volcán Chichonal. En la figura 8 se muestra el número de sismos próximos a la presa reportados durante la operación de esta red.

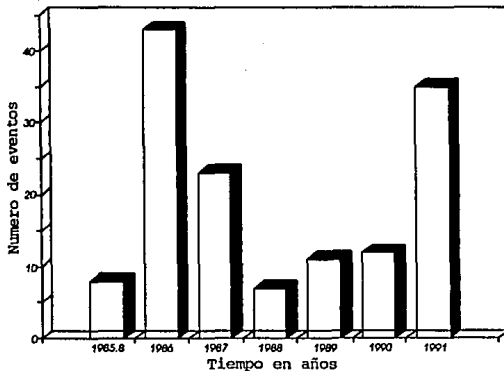


Figura 8. Número de sismos ocurridos en la presa Peñitas en un área no mayor a 30 km alrededor de la cortina.

PRESA EL CARACOL

La Presa El Caracol está localizada en el cauce del río Balsas; se llenó de julio de 1986 a principios de 1987.

En esta presa operó una red local compuesta por tres sismógrafos portátiles de diciembre de 1980 a marzo de 1981. Posteriormente, se mantuvo en operación un sismógrafo localizado aproximadamente a 4 km del sitio de la cortina. La red se mantuvo con apoyo de la estación Iguala (III), que se encuentra a 60 km del proyecto, la cual forma parte de la red SISMEEX (Instituto de Ingeniería, UNAM). El arreglo de la red sismológica de la presa "El Caracol", de cinco estaciones autónomas, se ha conservado desde 1984 hasta nuestros días (Lomas y Santamaría, 1992).

Instrumentación

Se observó que durante el período del llenado del embalse la sismicidad fue escasa. Para

el período posterior al llenado, la sismicidad no tuvo una distribución preferencial en el área, notándose que la mayoría de los temblores ocurrieron aguas abajo de la cortina. Se localizaron 30 sismos bajo el embalse, por lo que se considera que la energía disipada fue mínima dado que los eventos tuvieron magnitudes semejantes a los valores calculados en eventos registrados antes del llenado, no presentaron alguna tendencia y la actividad ocurrió a profundidades mayores de 45 km (Lomas y Santamaría, 1992). Sin embargo, se calcularon catorce sismos con profundidades menores de 30 km. Para los años de 1991 y 1992 se estableció que la sismicidad inducida en El Caracol había desaparecido, manifestándose únicamente la sismicidad propia del área. En la figura 9 se observa que durante los primeros años no se tuvieron muchos eventos y que los años con mayor actividad coinciden con la época del llenado, sin embargo como ya se mencionó, la actividad sísmica fue de carácter profundo ($h > 30$ km) y los estudios consultados la interpretaron como producto del fenómeno de subducción, más que como actividad sísmica inducida.

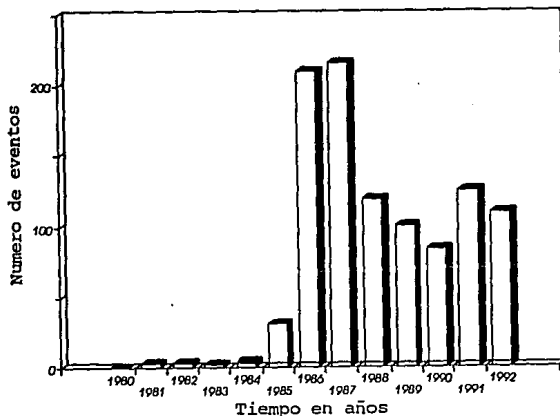


Figura 9. Número de sismos ocurridos en la presa Caracol en un área no mayor a 30 km alrededor de la cortina.

III ANÁLISIS

3.1 SISMOLOGIA

Para evaluar el potencial sísmico de una zona hay que conocer previamente la sismicidad histórica. Los parámetros que se manejan comúnmente en los estudios de riesgo sísmico, son los de localización y tamaño; los primeros son esenciales para definir las fuentes sismogénicas, y los segundos para evaluar la energía liberada en la región (Udías, 1989); además de que los epicentros confirman la existencia de fallas localizadas en los estudios geológicos y la de otras fallas no descubiertas previamente (García, 1973).

Las herramientas más importantes para establecer los límites de las zonas sismogénicas son los mapas de localización de los focos sísmicos, pero hay que ser críticos al utilizarlos, ya que las localizaciones anteriores al año 1970 no son muy confiables, pues fue a partir de esos años cuando se incrementó la instrumentación sismológica en la República Mexicana, y pueden llevar a distribuciones espaciales de los temblores cuya correlación con la tectónica sea difícil. En cuanto a esta correlación, hay que ser prudentes en la interpretación de los datos geológicos, ya que las características tectónicas más evidentes sobre el terreno no tienen que ser, necesariamente, las más activas (Udías 1989). Para la determinación del terremoto mayor posible en una zona es aconsejable tener en cuenta las características tectónicas y elásticas de la misma, así como la liberación de la energía sísmica y tensiones que se han producido en épocas pasadas para establecer la acumulación de tensiones que, liberándose de una vez, darían lugar al terremoto mayor posible. A ello puede contribuir de forma importante la paleosismicidad. Por otro lado, el terremoto mayor que puede producirse en una zona no está determinado por el terremoto máximo registrado en el pasado, sino que se estima a partir de las leyes estadísticas de la sismicidad de cada zona.

3.1.1 Sismicidad Alrededor del P.H. Zimapán

Tradicionalmente la sismicidad de un sitio ha sido considerada como la distribución geográfica de los terremotos y sus efectos destructores. La base para su estudio, es por lo tanto, la recopilación de datos sobre los terremotos tales como su fecha y el momento de ocurrencia, su localización, daños producidos, etc.. Para evaluar la sismicidad regional se deben tomar en cuenta las contribuciones de todas las fuentes sísmicas potenciales que pueden afectar al sitio en cuestión (Esteve y García, 1987).

Una de las herramientas más importantes para estudiar el comportamiento de fallas geológicas capaces de producir temblores, es el estudio de los sismos históricos que se han producido en diversas regiones del planeta. El estudio de sismos ocurridos en el pasado constituye un acervo indispensable para la sismología moderna, que nos permite identificar la existencia de fallas activas con largos períodos de recurrencia, en las cuales no ha ocurrido un evento de magnitud importante en fechas recientes.

En el centro del país ocurren sismos de gran magnitud ($M \sim 7.0$) asociados a la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), los cuales generalmente son provocados por sistemas de fallas normales, y someras de 5 a 15 km de profundidad, que son controlados por esfuerzos tensionales de la corteza. Los dos temblores más notables de este tipo que han ocurrido durante el siglo son: el de Tixmadeje-Acambay, Edo. de México, el 19 de noviembre de 1912 cerca de la región de estudio, con una magnitud de 7.0; el otro ocurrió el 3 de enero de 1920, a 30 km de la Ciudad de Jalapa, Veracruz, con magnitud de 6.5. Estos terremotos son peligrosos por su poca profundidad y proximidad a zonas altamente pobladas.

En función de las características geotécnicas de la República Mexicana, las zonas continentales y marítimas se dividieron en provincias sísmicas (proyecto 1989; Esteve, 1963). La región de estudio se encuentra ubicada en la frontera de las provincias peninsular y asísmica (figura 10). La primera se caracteriza por sismos ocasionales, no mayores a 6 grados en la escala de Richter, en donde los epicentros más cercanos se localizan a 200 km, al W, en el Océano Pacífico.



Figura 10. Regionalización sísmicas de la República Mexicana (Esteva, 1963).

El proyecto hidroeléctrico Zimapán se encuentra próximo a la zona sismogénica de Acambay-Tixmadejé, en donde ocurrió un sismo el 19 de noviembre de 1912 de magnitud $M_s = 7.0$. Además de la región de los sismos de Cardonal, la historia sísmica regional indica que durante los meses de marzo y abril de 1976 ocurrieron varios temblores superficiales en Hidalgo, se iniciaron con un evento el 25 de marzo con $M_s = 4.9$ a unos 50 km del sitio del proyecto; otro sismo superficial ocurrió el 22 de febrero de 1979 con $M_s = 4.9$ en la misma zona sismogénica de Acambay-Tixmadejé. La región activa de Actopan se encuentra también en un radio próximo al proyecto.

3.1.2 Algunos Estudios

La actividad sísmica registrada en el período de 1950 a 1984 en un radio de 100 km donde el centro es la cortina del P.H. Zimapán, es de 277 focos de magnitud de coda menor a 5 grados, cantidad que equivaldría a ± 9 sismos por año. Del análisis de la distribución epicentral y la profundidad de los focos se ha determinado que esta actividad se encuentra asociada al vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana (Proyecto, 1983).

CFE evaluó el potencial sísmico de las principales discontinuidades, concluyendo que el rasgo potencial más peligroso corresponde a la Cabalgadura El Doctor, de mecánica compresional, que en caso de reactivarse produciría aceleraciones máximas hasta de 0.21 g. En segundo lugar se encuentra la Falla La Florida, que produciría aceleración del orden de 0.15 g en caso también de reactivarse y de existir continuidad en sus segmentos oriental y occidental.

Suter y otros (1992) consideran que el semigraben de Aljibes, que se encuentra debajo del embalse de la presa, podría tener relación con las zonas activas de Acambay, El Cardonal y el sistema de fallas Venta de Bravo, ya que tienen la misma orientación y estima que de ocurrir un sismo, su magnitud estaría entre $6 < M_w < 7$ grados.

3.1.3 Sismicidad Local

ANTECEDENTES

En el siglo pasado ocurrieron dos movimientos sísmicos fuertes: el 13 de enero de 1854 a las 14:30 hora local, y el 26 de febrero de 1854 a las 07:00 hora local. Ellos no sólo son descritos en Maravatio y Tlalpujahua sino también en San Juan del río, 60 km al Suroeste del P.H. Zimapán (Suter y Quintero, 1992).

A partir de la instalación que hizo CFE, de las tres estaciones portátiles alrededor del proyecto (ver punto 3.2 de éste trabajo), se han realizado informes que consignan la actividad sísmica local registrada, misma que se resume en los siguientes párrafos.

Durante el primer semestre de 1991, operaron 2 estaciones autónomas en las cercanías del proyecto que registraron 17 eventos en un área no mayor a 20 km alrededor de la cortina, de los cuales la gran mayoría se consideraron explosiones provocadas por la construcción de las obras (Sansores, 1991). Para el segundo semestre de 1991 se observó que la ocurrencia de los temblores se presentó a más de 20 km de la estación más cercana (Noxtey o Banzhá), a excepción de algunos que ocurrieron a una distancia mayor y donde la magnitud de la sismicidad predominante fue de entre 2.0 y 3.0; la mayoría de los temblores ocurrieron entre 20 y 50 km de distancia (Sansores, 1992). Durante el primer semestre de 1992 ocurrieron un total de 105 temblores de baja magnitud ($M_c < 3.6$) cuya región generadora se ubica de 20 a 50 kilómetros de la red; ésta sismicidad, aunque no se determinaron buenos valores epicentrales por falta de registros (dos estaciones), puede asociarse a la región de Actopan, al sur del proyecto (Sansores, 1992-2). Para el segundo semestre de 1992 se reportaron solamente 18 eventos con las mismas características de los sismos anteriores.

RELOCALIZACIÓN

Por otra parte se ubicaron dos ventanas sísmicas en el lugar. La Ventana Uno tiene límites: al sur 20.21° , al norte 21.10° , al este 99.02° , y al oeste 99.98° ; que define un área cuadrada de apotema de 50 km y con centro en la cortina (figura 11). Y la Ventana Dos, con límites: al sur 20° , al norte 21.6° , al este 98.8° , y al oeste 100.8° ; y que define un área mayor que la primera (figura 12 y 13). La Ventana Uno tuvo la finalidad de coleccionar los sismos cercanos a la presa, que han sido reportados hasta junio de 1993 (anexo 3), para obtener dichos datos se consultaron los catálogos de Figueroa (1970 y 1984); que registran los sismos más importantes que han ocurrido en el presente siglo en la República Mexicana, gran parte de ellos, fueron obtenidos con la ayuda de la red sísmica de SISMEEX, que existe desde 1973 y hace un registro local para la Cuenca de México; durante su existencia se ha incrementado el número de sus estaciones, contando en la actualidad con 10 puestos sismotelemétricos. La localización de los sismos de ésta ventana tienen una calidad promedio regular (C), y abarca 74 temblores, de los cuales la mitad (29) son profundos ($h > 30$ km), y 25 son someros ($h \leq 10$ km). El sismo de mayor magnitud fue el que ocurrió el 10 de septiembre de 1989 con $M_c = 4.5$ y tuvo un carácter superficial. El puesto sismométrico más cercano a ellos es la estación Coyotepec de la red SISMEEX, ubicada a 100 km al sur de la presa.

La Ventana Dos confirma la determinación epicentral de los sismos que aparecen

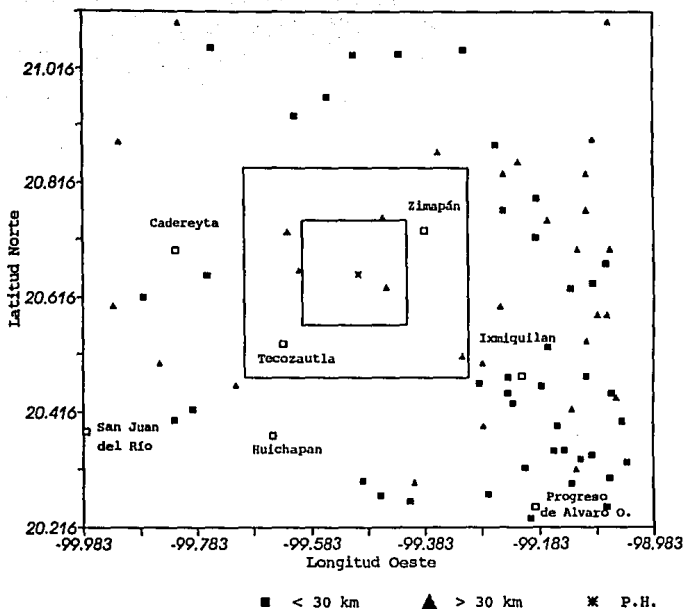


Figura 11. Sismicidad registrada en la red SISMEM de 1973 a junio de 1993, cuadros con 10, 20 y 50 km de apotema.

en la Ventana Uno.

En la figura 11 no existe una coherencia para poder definir zonas sismotectónicas por lo que se procedió a relocalizar los sismos, usando para ello los siguientes criterios:

- 1.- Localización de datos (sismogramas).
- 2.- Selección de sismos que aparecen en más de tres estaciones.
- 3.- Selección de sismos con duración mayor o igual a 100 segundos.
- 4.- Integración de sismos principales, para discriminar las réplicas; ya que muchos

temblores son subsidiarios de sismos que no aparecen en la Ventana Uno, por lo que se consideró necesario incluirlos (sismos 2, 16, y 19 de la tabla 2).

5.- Utilización de un modelo de velocidades que genera bajos errores epicentrales.

La relocalización se hizo por medio del programa HYPO71PC, se probaron 5 modelos diferentes para la Cuenca de México, y resultaron con menor error los de SISMEEX y el propuesto por Havskov (1982). El segundo modelo se caracteriza y diferencia del primero por tener en la primera capa una velocidad de onda P muy baja (2.9 km/s), que corresponde a la velocidad de propagación de las ondas en las arcillas de la Cuenca de México; la distribución espacial de los epicentros se observa en la figura 12, para el modelo de SISMEEX, y en la figura 13 los correspondientes al modelo de Havskov.

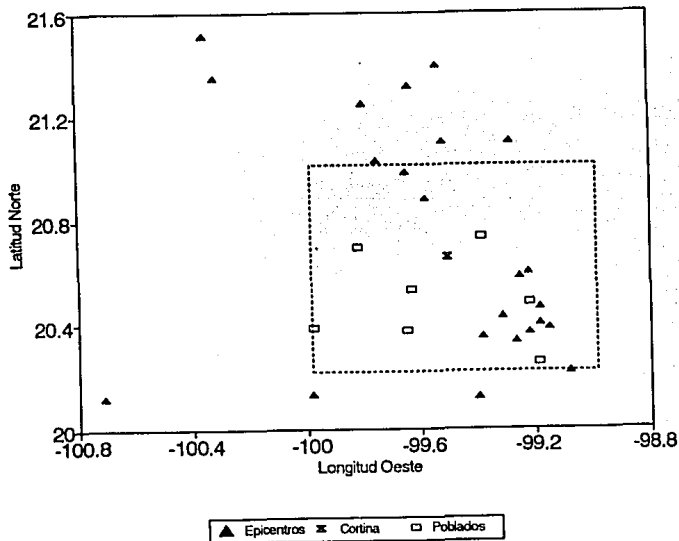


Figura 12. Epicentros relocalizados con el modelo de SISMEEX.

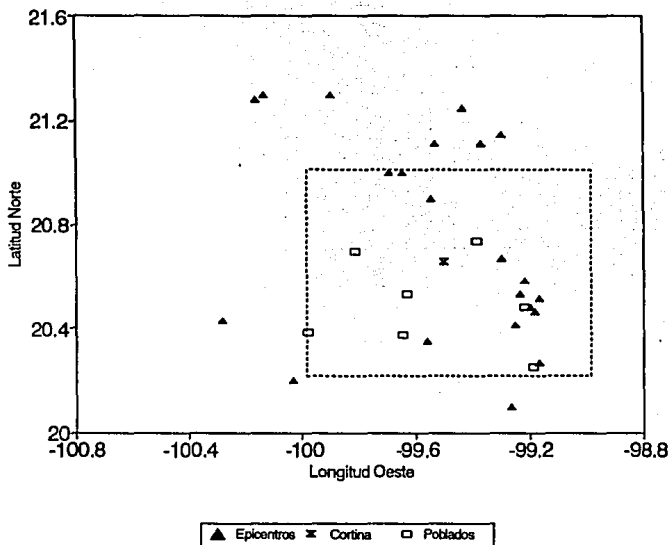


Figura 13. Epicentros relocalizados con el modelo de velocidades propuesto por Havskov (1982).

En total se relocalizaron 23 sismos (tabla 2), que definen tres zonas sísmicas cercanas a la presa, ya conocidas: una de ellas es la zona activa de Actopan, estudiada actualmente por Miguel Rodríguez (1994); otra es la zona del temblor de Landa, del 10 de septiembre de 1989, y la última se define hacia Querétaro-Guanajuato. Las determinaciones no fueron muy buenas, ya que los errores persistieron y se minimizaron poco, además el error epicentral se incrementa con la distancia, resultando de mala calidad (D). Lo que sí se puede afirmar es que en las proximidades del proyecto, unos 20 km aproximadamente, no existen registros de magnitud $M_c > 3$. Por lo que la zona se sigue considerando de baja sismicidad.

En la zona de Actopan, la actividad se evidencia por termalismo y sismicidad reciente. Los temblores de 1950 y de 1976 afectaron diversas poblaciones del Valle de Mezquital, y en ambos, los daños fueron cuantiosos en la Ciudad de Ixmiquilpan (Rodríguez y Milán, 1994).

EPICENTROS RELOCALIZADOS CON SISMEX

	Fecha aamddd	HORA hhmmss	Lat. N (°)	Lon. W (°)	Prof. (km)	Mag. M_c
1	760322	182037.24	20.35000	99.38333	10.13	3.57
2	760325	230501.05	20.46667	99.18333	1.22	4.91
3	760326	123702.16	20.36667	99.21667	3.36	3.70
4	760326	202445.37	20.43333	99.31667	6.31	3.58
5	760505	041131.82	20.33333	99.26667	4.43	3.22
6	761007	092928.28	20.38333	99.15000	0.66	3.58
7	761212	174654.97	20.11667	100.7166	15.0	3.57
8	780808	173742.59	20.13333	99.98333	0.94	3.53
9	780813	050326.56	20.40000	99.18333	4.07	3.44
10	811008	181820.72	20.88333	99.58333	28.97	3.60
11	841221	072749.63	20.60000	99.21667	25.57	3.81
12	860405	050314.50	21.25000	99.80000	7.50	4.16
13	860520	185757.92	21.51667	100.3500	72.52	4.24
14	860525	194541.15	21.35000	100.3166	27.58	4.11
15	860611	101742.65	20.21667	99.08333	7.55	3.36
16	870127	163329.28	20.11667	99.40000	99.43	4.36
17	870923	214351.18	21.40000	99.53333	16.69	3.91
18	890910	110759.16	21.03333	99.75000	10.62	4.45
19	890910	132843.18	20.98333	99.65000	1.07	4.71
20	890910	133255.59	21.10000	99.51667	15.00	3.88
21	890910	142206.48	21.10000	99.28333	15.00	3.90
22	890910	164310.24	21.31667	99.63333	60.42	4.04
23	891026	110835.74	20.58333	99.25000	35.41	3.58

Tabla 2-A. Epicentros localizados con el modelo de velocidades correspondiente a SISMEX.

EPICENTROS RELOCALIZADOS CON EL MODELO DE HAVSKOV (1982)

	Fecha aammdd	Hora hhmmss	Lat. N (°)	Lon. W (°)	Prof. km	Mag. M _o
1	760322	182037.03	20.35000	99.56667	35.15	3.60
2	760325	230459.92	20.66667	99.30000	35.15	4.99
3	760326	123701.46	20.46667	99.18333	7.75	3.73
4	760326	202444.58	20.51667	99.16667	4.39	3.60
5	760505	041131.56	20.41667	99.25000	15.02	3.24
6	761007	092928.23	20.48333	99.20000	4.18	3.61
7	761212	174658.69	20.43333	100.2833	37.99	3.51
8	780808	173742.67	20.20000	100.0333	14.88	3.55
9	780813	050325.47	20.48333	99.20000	15.00	3.48
10	811008	181820.40	20.90000	99.55000	34.77	3.60
11	841221	072749.70	20.58333	99.21667	32.27	3.80
12	860405	050314.20	21.30000	99.90000	23.41	4.19
13	860520	185759.60	21.28333	100.1666	7.50	4.07
14	860525	194540.10	21.30000	100.1333	7.50	4.16
15	860611	101742.10	20.26667	99.16667	23.07	3.38
16	870127	163330.47	20.10000	99.26667	91.30	4.35
17	870923	214351.44	21.25000	99.43333	1.99	3.85
18	890910	110759.39	21.00000	99.70000	10.69	4.43
19	890910	132843.74	21.00000	99.65000	9.53	4.72
20	890910	133255.47	21.11667	99.53333	24.27	3.88
21	890910	142206.66	21.15000	99.30000	34.38	3.92
22	890910	164311.69	21.11667	99.36667	12.65	3.94
23	891026	110835.49	20.53333	99.23333	27.27	3.56

Tabla 2-B. Epicentros relocalizados con el modelo de velocidades propuesto por Havskov (1982).

En ésta zona las fallas tienen una orientación E-W, son de tipo normal y corresponden a una tectónica extensional y no de subducción como se ha creído (Campos et al, 1994).

De las otras dos zonas, se puede decir que son activas a pesar de que han sido poco estudiadas, pues así lo evidencian eventos recientes (sismo de 1989).

La sismicidad histórica coincide con la que ha sido reportada por CFE, se confirma que las dos zonas identificadas: una a 50 km al norte de la presa y otra 20 km al SE, son realmente las áreas que presentan generación de sismicidad natural.

3.2 RED ZIMAPAN

Esta red observará el comportamiento sísmico local, antes, durante y después del llenado del embalse. En todos los casos se asume que la primera función de una red es localizar los temblores que ocurren dentro de ella y calcular su magnitud.

Algunos estudios (e.g. Bolt, 1960; Lee y otros, 1971) sugieren que si la estructura de la corteza es homogénea, las estaciones en las redes sísmicas deberían de estar distribuidas en acimut y distancias iguales. En particular para obtener epicentros seguros, la máxima abertura entre estaciones deberá ser menor a 180° , y para obtener una profundidad focal segura, la distancia del epicentro a la estación más cercana deberá ser menor que la profundidad del foco (Lee y Stewart, 1981).

HISTORIA DE LA RED

Antes del inicio del llenado del embalse se consideró necesario instalar equipo sismológico para observar la sismicidad propia del sitio y determinar así los posibles cambios en el comportamiento sísmico durante el embalsado, y así establecer la presencia de sismicidad inducida por la carga hidráulica. El 17 de octubre de 1990 se instaló una red sísmica compuesta por tres estaciones situadas en el área; se colocaron sismómetros analógicos portátiles de registro en papel ahumado, marca Sprengnether modelo MEQ-800 y sismómetros de componente vertical, modelo L-4C-V con período natural de un segundo. Las estaciones se instalaron en los poblados de: Xajhá, Noxtey y Banzhá y

operaron hasta 1993. Durante este período, no fue posible determinar parámetros hipocentrales confiables, debido a que la estación Xajhá se encontraba en un sitio con mucho ruido, de tal manera que hacía difícil la interpretación del registro, contando solamente con los datos de las otras dos estaciones.

En marzo de 1993 se reinstaló la estación Xajhá, con carácter de telemétrica; poco tiempo después las dos restantes fueron también substituidas por estaciones telemétricas. Se espera que su configuración final sea de cinco estaciones. La ubicación de las estaciones se presenta en la figura 14, y sus coordenadas son las que aparecen a continuación:

Nombre	Siglas	Latitud N	Longitud W	Altitud (msnm)
XAJHA	XAJ	20°43.02'	99°28.8'	2030
BANZHA	BAN	20°35.28'	99°34.98'	1645
NOXTEY	NOX	20°35.52'	99°25.62'	1760

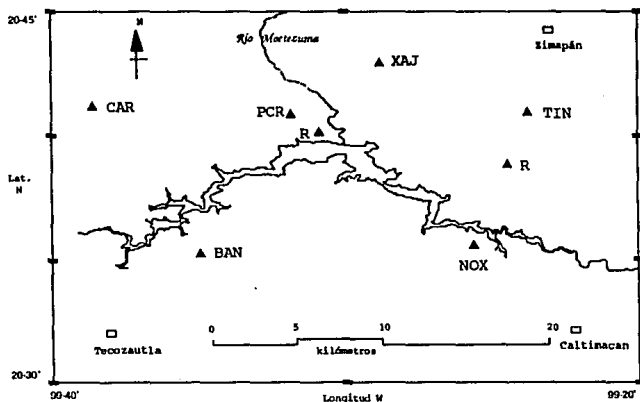


Figura 14. Ubicación de las estaciones y el PCR en el P.H. Zimapán.

Los sitios seleccionados para la instalación de las estaciones se eligieron considerando los siguientes criterios:

- a) Cobertura acimutal, para cubrir bien el área de estudio.
- b) Características del terreno, donde se tomó en cuenta la existencia de afloramientos rocosos, que la roca no estuviera intemperizada o fracturada, y que se encontrara lo más distante posible de la actividad humana.
- c) Línea de vista al PCR. Las estaciones Xajhá y Banzhá envían directamente su señal al PCR, mientras que la estación Noxtey utiliza una repetidora para transmitirla.

3.2.1. ESTACIONES

El equipo instalado en las estaciones de campo tiene por objeto detectar, acondicionar y transmitir por radio las señales sísmicas del lugar, las cuales se reciben en un Puesto Central de Registro (PCR) que se localiza en el campamento de Mesa de León, en las oficinas de instrumentación.

La red está diseñada con las siguientes características:

- a. Operación durante las 24 horas del día en forma ininterrumpida.
- b. Bajo consumo de energía en: los equipos de captación, manejo de señales y radiotransmisión.
- c. Todas las instalaciones cuentan con un sistema de alimentación autónomo y confiable.

Restricciones técnicas:

- a) La transmisión por VHF requiere de la línea de vista entre las estaciones que se enlazan, debido a que las ondas que se emiten mediante este sistema, se propagan en un solo plano y para el rango de frecuencia en el que se trabaja la transmisión (150 - 175

MHz) es prácticamente en línea recta.

b) La distancia entre dos estaciones enlazadas por radio, no debe ser mayor a 50 km.

c) Sólo es aceptable una retransmisión de la señal de los aparatos detectores.

La razón de estas dos últimas limitaciones obedece a la necesidad de poder registrar la señal con el mínimo de distorsión (López, 1972).

La instalación consiste fundamentalmente en una caseta para protección del equipo, anclada en un buen afloramiento rocoso, y en sincronizar el reloj interno del sismógrafo.

Características de las Estaciones.

Es muy difícil tener en una región agreste (como es el caso de las zonas aledañas al P.H. Zimapán) una red sísmica que reúna todas las cualidades para un excelente registro; el proyecto Zimapán se encuentra en una zona limítrofe, fisiográficamente, y de geomorfología diversa, que dificulta el acceso a muchos sitios, lo que ha limitado la decisión de la ubicación de las estaciones.

XAJHA (XAJ).

Ventajas: La estación Xajhá se localiza a un costado del poblado del mismo nombre y en la cima del cerro Cuesta Blanca; se encuentra cerca del túnel de conducción, lo que permitirá observar el comportamiento de esa importante obra civil. Se encuentra muy cerca de la traza de la Cabalgadura El Doctor. La estación se colocó sobre una roca muy sólida, consistente en derrames andesíticos, de una extensión considerable.

Desventajas: es una estación que se encuentra próxima a un camino de terracería que en un futuro cercano será una carretera importante que unirá al poblado de Zimapán con el de Cadereyta, lo que ocasionará que el registro sea muy ruidoso y probablemente la ganancia del equipo tenga que cambiarse o reubicarse el sismómetro.

Línea de vista. No presenta interferencia en la señal lo que la hace más precisa y legible; en la figura 15 se aprecia la línea de vista de esta estación con el PCR.

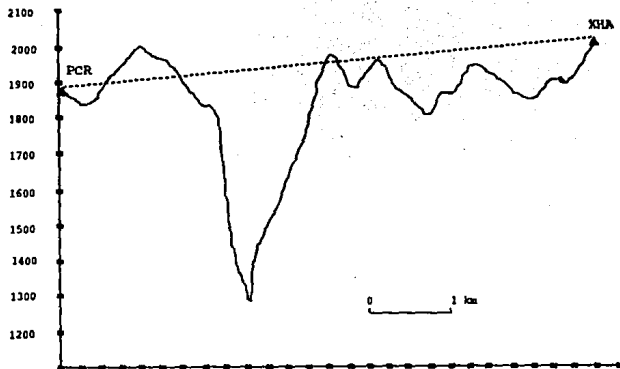


Figura 15. Línea de vista PCR-XHA.

NOXTEY (NOX).

Ventajas: Se localiza 13 km al SE de la cortina en el área del embalse; esta estación permitirá la localización de los sismos que aparezcan en la parte central del embalse y en sus alrededores, y controlará la determinación hipocentral de los sismos que ocurren del lado E del embalse. La estación se encuentra cerca de un poblado y es de fácil acceso, lejos de cualquier carretera importante o de carga pesada. Se encuentra próxima a la Falla La Florida que buza al sur y que pone en contacto rocas del Cretácico con rocas del Terciario, la traza de esta falla es el mismo río Tula, y está considerada como una estructura con riesgo de reactivación (Sansores y González, 1991); las fallas cercanas a esta estación son: Tula, Daxhí, y La Florida, además de encontrarse sobre lo que Suter y otros autores (1992-B) definieron como el Semigraben de Aljibes.

Desventajas. Esta estación está muy próxima a un poblado y a terrenos de siembra, lo que provoca ruido en el registro. La roca donde se encuentra es una toba poco consolidada.

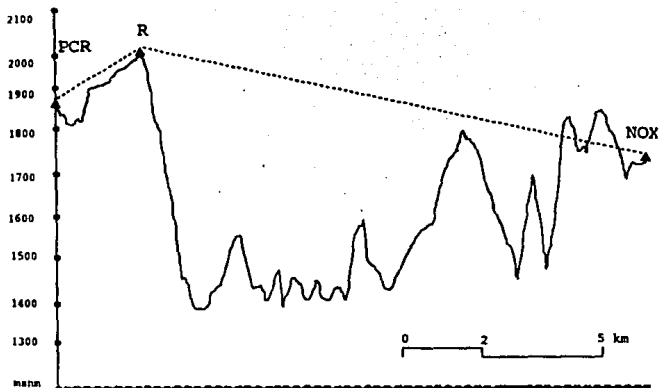


Figura 16. Línea de vista PCR-NOX.

Línea de vista. La señal llega al PCR a través de una antena repetidora, provocando en ocasiones interferencia en la señal (figura 16).

BANZHA (BAN).

Ventajas: Estación al SW de la boquilla donde el terreno no es muy accidentado; se encuentra próxima al PCR, 11.5 km, permitiendo tener una señal muy limpia y clara. Se encuentra cerca del embalse, en un poblado donde el tráfico es muy escaso y no existen grandes carreteras alrededor, siendo además de fácil acceso. Se encuentra sobre el semigraben de Aljibes y la rodean fallas de hasta 10 km de longitud (sin nombre) que afectan tanto a rocas vecinas como a la roca que sustenta a la estación, estas rocas son de origen volcánico extrusivo de tipo andesítico, con gran extensión sobre el proyecto.

Desventajas. Se ubica cerca de terrenos de cultivo, y la roca donde se instaló el sismómetro es una toba poco consolidada.

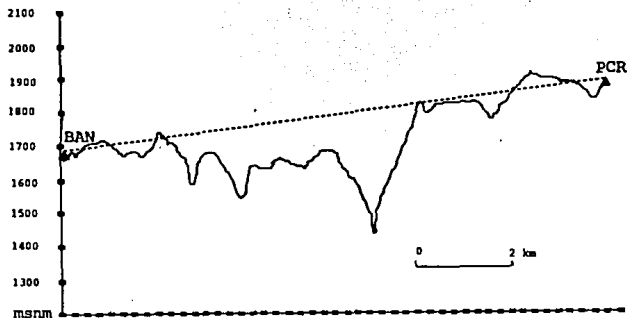


Figura 17. Línea de vista BAN-PCR.

Línea de vista. No presenta problemas en la transmisión de la señal (figura 17).

Desarrollo de futuras estaciones

Una red de tres estaciones es insuficiente, como lo demuestra el análisis de la sismicidad durante el período de octubre de 1990 a los primeros meses de 1993, ya que si falla una de ellas en su operación, se dificulta la localización de los hipocentros con los datos de las restantes. Para prevenir tal situación, la red se ampliará con dos estaciones adicionales (figura 14), también de carácter telemétrico. Los sitios propuestos son:

Nombre	Siglas	Latitud N	Longitud W	Elevación msnm
Carricillo	CAR	20°41.216'	99°38.6'	2100
La Tinaja	TIN	20°40.919'	99°23.737'	1900
Repetidora	R	20°39.094'	99°24.171	2150

3.2.2. Características de Las Estaciones

CARRICILLO (CAR)

Ventajas. La línea de vista de esta estación es buena por no tener obstáculos para la futura transmisión; este sitio es de fácil acceso por la carretera que une a Cuatrecyta con Zimapán, y se encuentra en un terreno poco escabroso para la zona en donde está el proyecto; además de que el sitio se encuentra lejos de terrenos de cultivo.

Desventajas. Al parecer no tiene desventajas, pero su ubicación sería mejor al norte para poder mejorar la cobertura acimutal.

Línea de vista. Sin problemas de transmisión Figura 18.

LA TINAJA (TIN)

Ventajas. Tiene programado un buen sitio para una cobertura acimutal que permita una determinación con pequeños errores de localización. Está bien comunicada, se encuentra próxima a un poblado pequeño y cerca de una terracería, lejos de sembradíos, y sobre terreno duro. Se ubicaría sobre las rocas calizas de la Formación El Abra, roca que es competente.

Desventajas. Por lo accidentado del terreno en esta parte NW del embalse se tuvo que recurrir al uso de la repetidora.

Línea de Vista. Usará una repetidora. Figura 19.

La instalación a corto plazo de las nuevas estaciones es muy importante, ya que el llenado del embalse se está llevando a cabo, y la red en su estado actual es insuficiente, ya que la falla de una estación hará imposible la ubicación epicentral de los eventos. Además sería bueno contar con una estación al norte de la cortina, ya que la casa de máquinas se encuentra a 21 km aguas abajo de la obra de toma y los futuros proyectos sobre el río Moctezuma se ubican en esa dirección; además aportarían conocimientos acerca de la

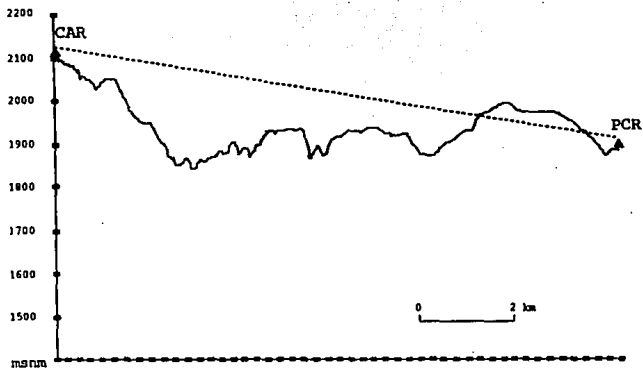


Figura 18. Línea de vista CAR-PCR.

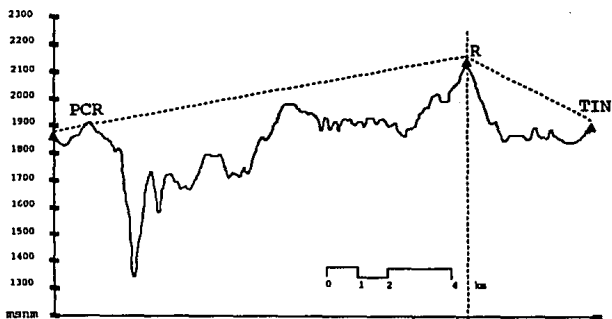


Figura 19. Línea de vista PCR-TIN.

sismicidad local de los sitios donde se planean nuevos proyectos.

3.3 Distribución de las Estaciones

Como ya se mencionó la cobertura de la red es insuficiente con tres estaciones (XHA, NOX y BAN), ya que se tienen problemas de localización que se manifiestan cuando alguna estación falla, aunque esta situación se ha minimizado con la instalación de equipo telemétrico. La distribución actual proporciona una buena determinación de los epicentros que ocurren sólo en el área del embalse, unos 40 km a la redonda, pero a distancias mayores, la red deja de funcionar como un arreglo para empezar a comportarse como un punto. Así, las zonas activas de Actopan, Acambay y el Cardonal, quedan fuera de su alcance. Al respecto, será necesario apoyarse en la información generada por otras redes (SISMEX y SSN, por ejemplo) para tener suficientes datos de los movimientos en el sitio y así mejorar la confiabilidad en las localizaciones sobre dichas zonas, pues como se ha observado, es en estas regiones donde ocurre la principal actividad sísmica regional registrada.

Sin embargo las localizaciones de los temblores naturales de la región indican que la principal actividad sísmica local se genera al SE de la presa.

Los movimientos que ocurren fuera del proyecto quedan fuera del control de la red debido su distribución actual; será entonces necesario, instalar una estación más al sur, hacia Ixmiquilpan, por ejemplo, con el fin de determinar confiablemente los epicentros de esta zona.

La topografía abrupta de la región, con lomeríos pronunciados y cañadas profundas que han sido labradas por el agua que escurre por las numerosas fallas del lugar y por elementos resistentes como diques y diferentes tipos de litología (volcánicas al sur de la cortina, y sedimentarias al norte), no representan en mucho un obstáculo para grandes modificaciones en las propiedades de las señales sísmicas, pues en todas direcciones se encuentran fallas y cañadas, rocas ígneas intrusivas, extrusivas y sedimentarias, además de que el efecto por topografía disminuye debido al arreglo de las estaciones, ya que están muy próximas unas con otras; así, los sismos que ocurran bajo el área del embalse

transmitirán su señal con un ángulo pronunciado hacia las estaciones, lo que permitirá que la trayectoria de la señal sísmica encuentre menos obstáculos topográficos. Las grandes sierras del lugar quedan fuera del alcance de la red, exceptuando el Cerro de Los Lirios y la sierra donde está el Cerro El Espolón (3100 msnm). Debajo de ellas existen fallas inversas que descartan la posibilidad de que tengan raíz, lo que podría modificar la trayectoria de las ondas. Los numerosos diques que cortan las rocas, son discontinuidades iguales a las fallas que ocasionan algún trastorno en el viaje de las ondas. Las vetas de sulfuros al norte de la cortina tienen un peso específico alto y una naturaleza mineral diferente a la roca encajonante por lo que deben ser consideradas ya que pueden llegar a afectar la velocidad de las ondas sísmicas. Todos los obstáculos deberán tomarse en cuenta en el diseño del modelo de velocidades para el área.

Las estaciones hacen una buena cobertura acimutal, y quedan comprendidas y separadas casi por igual ángulo en un área circular con centro en el embalse (figura 20).

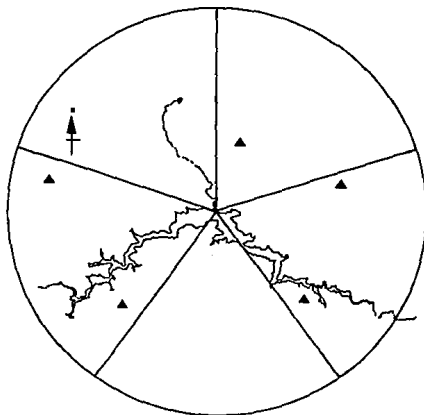


Figura 20. Cobertura de la Red.

Conclusiones y recomendaciones

La construcción de una presa con las dimensiones del P.H. Zimapán es un paso contra el déficit de energía eléctrica que sufre el país; se trata de una construcción de gran magnitud sobre el río Moctezuma, donde se tienen programadas otras presas que como Zimapán necesitan de un estudio de riesgo sísmico.

La fisiografía de la región favoreció la construcción de la cortina de Zimapán; el Cañón del Infiernillo, labrado por el paso del río Moctezuma, permite el atrapamiento de un tirante de agua superior a los 100 metros, por lo que su cortina será de arco bóveda y de las más altas en su tipo. Por ello, es importante una instrumentación sísmica seria e ininterrumpida en el sitio durante los primeros años de su funcionamiento.

El estudio del comportamiento sísmico natural de la región ante el llenado del vaso es importante para determinar si se presenta el fenómeno de sismicidad inducida.

Para caracterizar la sismicidad de un sitio es necesario recurrir a la historia sísmica de la región. Este elemento nos permite conocer cómo es la región desde el punto de vista sismotectónico.

La instalación de un red sismotelemétrica para la determinación de epicentros contribuye enormemente en la adquisición de datos de buena calidad, ya que se puede controlar el tiempo de todas las estaciones. La fisiografía fue el principal obstáculo en la selección de sitios, se trata de un terreno lleno de cañadas, cañones, mesas y montes de todas las elevaciones, es un terreno agreste, por lo que las líneas de vista fueron difíciles de obtener de manera directa. En una estación se usa una repetidora y en las programadas también está contemplado utilizar este medio para que llegue la señal al PCR.

Lo que más le afecta a una presa es su velocidad de llenado, lo que puede generar movimientos telúricos. No se puede afirmar si en Zimapán existirá sismicidad inducida, pero la prevención es el mejor camino para conocer más a fondo sobre este fenómeno.

Regionalmente Zimapán se ubica en una zona considerada asísmica, los temblores históricos reportados en los catálogos, son profundos ($h > 30$ km) en un 50%, y someros ($h < 10$ km) en un 40%, siendo su magnitud siempre inferior a los cuatro grados en la escala M_c ; sin embargo existen evidencias de ocurrencia de sismos importantes cerca del área (El Cardonal $M=5.6$, 1976), además del riesgo por la posible ocurrencia de un sismo importante en el semigraben de Aljibes (Suter, 1992-B).

La relocalización de los sismos históricos cercanos a la presa Zimapán nos permite afirmar que la sismicidad local es prácticamente nula, sin embargo, al área la rodean importantes zonas sísmicas tradicionales, que en la actualidad han despertado el interés por ser estudiadas, éstas son:

1. Zona activa de Actopan.
2. Zona activa de Landa.
3. Zona activa de Acambay
4. Zona Querétaro-Guanajuato.

La instrumentación previa al llenado que hizo CFE, registró actividad generada en las zonas ya mencionadas.

El lugar cuenta con fallas normales de gran interés, consideradas inactivas, principalmente en el área de la boquilla (Falla Tula y Cajón), pero el agua como lubricante y las presiones generadas por el embalse, hacen de estas discontinuidades planos potenciales para la generación de sismos.

Del arreglo actual de la red se recomienda reubicar las estaciones situadas al sur de la cortina, a una distancia mayor, ya que en su estado actual, no se pueden calcular de manera confiable los valores epicentrales de los temblores que ocurren fuera del área y aguas arriba del embalse; además se controlarían mejor las siguientes zonas:

a). Zona geotérmica de Pathé. Donde la actividad no amenaza la estabilidad de la presa, pero sería importante caracterizar sísmicamente esta zona.

b). El sistema de fallas Venta de Bravo. Estas fallas aunque lejos del área, son un sistema activo que genera movimientos y que podrían ser atrapados por la red; no hay gran diferencia en el cambio de la estación, pero su aproximación a la región contribuiría al

estudio de estas fallas.

c). Zona activa del Cardonal. Donde la sismicidad se había considerado sin importancia pero que en la actualidad empieza a llamar la atención.

Para completar la cobertura acimutal es importante la instalación de las otras dos estaciones, que estarían situadas en las siguientes coordenadas:

Nombre	Siglas	Lat.N .	Long.W
Carricillo	CAR	20°41.216'	99°38.6'
La Tinaja	TIN	20°40.919'	99°23.737'
Repetidora	R	20°39.094'	99°24.171'

Las condiciones que reúnen estas estaciones para su instalación son las necesarias para una buena transmisión: línea de vista, sobre roca dura, y de fácil acceso.

Con esta nueva red se abre otra etapa más en los estudios y futuros proyectos de sismicidad inducida, disciplina poco estudiada en nuestro país, y en el término mundial, todavía carente de reglas y de conclusiones acerca del origen del fenómeno disparador de los sismos. Lo que actualmente se considera como una de las principales causas del desequilibrio dinámico de un lugar que alberga un embalse, es la altura del tirante de agua y la velocidad en los cambios del NAME, pues entre más rápido sea este cambio, existen más posibilidades de que se disparen sismos.

La seguridad social no tiene precio, y este tipo de estudios deben ser impulsados en esta y otras grandes obras civiles del país, para el bienestar de la población, además de que favorecen el avance hacia la comprensión de la respuesta del subsuelo ante proyectos de tal magnitud.

REFERENCIAS

- ALBERRO A, JESUS Y HERNANDEZ HDEZ., ROGELIO R. (1990). *"Temblores Inducidos por Fuerzas de Filtración"*. Instituto de Ingeniería UNAM, septiembre de 1990. pp 6-8.
- ATLAS NACIONAL DE MEXICO [MAPAS] (1990). Escala varía, UNAM, Instituto de Geografía, Volumen I y VII.
- BEDOYA PRADA, LUIS. (1992). *"Diseño Básico de la Red Sismotelemétrica que será Instalada en el Proyecto Hidroeléctrico Zimapán"*. CFE. Oficina de Electrónica. s/n de pag.
- BRAVO CHAVEZ, H; PONCE MORI, LAUTERO; SUAREZ REYNOSO, GERARDO; ZUÑIGA DAVILA-MADRID, RAMON. (1988). *"Potencial Sísmico de México"*, Capítulo 1, primera parte. *Estudios Sobre Sismicidad en el Valle de México*, primera edición 1988, pp 1-24.
- BRIONES GALVEZ, JUAN JOSE Y PARRA B., ANGEL. (1984). *"Segundo Estudio Geofísico de Factibilidad en el Area de Oscilación, Tubería a Presión y Casa de Máquinas"*. P.H. Zimapán, Hgo.. CFE.
- CAMPOS, J.; RODRIGUEZ, M.; DELGADO, O.; y MILAN, M. (1994). *"A Contribution to the Tectonics of the Northern Portion of the Central Sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt (Between the Queretaro Fracture Zone and the Mezquital Valley)"*. México D.F. Inédito. 22 pag.
- CARRILLO, MIGUEL Y SUTER, MAX. (1982). *"Tectónica de los Alrededores de Zimapán y Querétaro"*. VI Convención Geológica Nacional, Libro-Guía de la Excursión Geológica a la Región de Zimapán y áreas Circundantes, Estados de Hidalgo y Querétaro. México D.F. pp 1-20.
- CARRILLO MARTINEZ, MIGUEL. (1991). *"Geología Regional del Area límite de los Estados de Querétaro e Hidalgo, en la Región de Zimapán"*. Memorias de la Convención de la Evolución Geológica de México y Primer Congreso Mexicano de Mineralogía. pp. 27-29.
- CASTRO, R. y RODRIGUEZ, M. (1983). *"Sismos Locales y Regionales en la Zona de la Presa Caracol 1981-82"* Instituto de Ingeniería, UNAM. Elaborado para CFE, mayo de 1983, s/n de pag..
- CASTRO, R. y DOMINGUEZ, T. (1984). *"Estudio de la Sismicidad Local en la Zona del Proyecto Hidrológico de El Caracol, Gro., 1983"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Elaborado para CFE, marzo de 1984, México D.F., s/n de pag..

- CASTRO, R. y DOMINGUEZ, T. (1985). *"Red Sísmica Complementaria para el Proyecto Hidrológico de el Caracol, Instalación y Operación Conjunta del Sistema, Análisis de Sismos Locales y Regionales Durante 1984"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe elaborado para CFE, marzo de 1985, México D.F., 57 pag..
- CASTRO, R. y DOMINGUEZ, T. (1986). *"Análisis de Sismos Cercanos al Proyecto Hidroeléctrico de el Caracol, Gro. Durante 1985"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe elaborado para CFE, agosto de 1986, México D.F., 57 pag..
- CFE (1993). *"Manual de Diseño de Obras Civiles"*. Diseño por Sismo. Elaboración Javier Avilés L. y otros. IIE, I de I UNAM, FI UNAM, CFE.
- CHAVEZ AGUIRRE, J. M., GONZÁLEZ FLORES, M.R. Y RUVALCABA SEPÚLVEDA, M.A.. (1991). *"Metamorfismo de Contacto en el Area de la Casa de Máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán, Estado de Hidalgo"*. Momorias del Primer Congreso Mexicano de Mineralogía y Convención de la Evolución Geológica de México. pp 31-31.
- COMPORTAMIENTO DE PRESAS CONSTRUIDAS EN MEXICO, 1974-1984, (1985). Comisión Federal de Electricidad, Vol. II. México D.F., cuatro partes.
- DIAZ DE LEON CH., J. y LEON, J. R. (1991). *"Análisis de la Sismicidad Local en la Zona de la C.H. de Peñitas Durante 1990"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, México D.F., agosto de 1991, s/n de pag.
- DOMINGUEZ, T.; NAVA, E. y RODRIGUEZ, M. (1985). *"Determinación de los Sismos Locales en la Zona del Embalse de la Presa de Chicoasén Durante 1984"*. Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe para CFE, marzo de 1985, s/n pag.
- DOMINGUEZ, TONATIUH y GUTIERREZ, CARLOS (1987). *"Análisis de los Sismos Cercanos al P. H. Caracol, Gro. Durante 1986"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe elaborado para CFE, México D.F., septiembre de 1987, s/n de pag..
- ESTEVA MARABOTO. (1963). *"Regionalización Sísmica de la República Mexicana"*. Revista de la Sociedad Mexicana de Ing. Sísmica, Vol. 1, junio de 1963. México. pp 31-35.
- FIGUEROA, JESUS. (1970). *"Catálogo de Sismos Ocurridos en la República Mexicana"*. Series del Instituto de Ingeniería N° 272, UNAM. México, 88 pag.
- FIGUEROA, JESUS y MARTINEZ ALICIA (1984). *"Catálogo de Sismos Ocurridos en la República Mexicana de 1970 a 1982"*. Series del Instituto de Ingeniería N° 478, UNAM. México, 290 pag.
- GARCIA, JOEL Y ESTEVA, LUIS. (1987). *"Estudio de Sismicidad para Zimapán, Hidalgo"*. Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería, UNAM. 17 pag.
- GARCIA YAGÜE, ANGEL. (1973). "Terremotos y Embalses". Revista de Obras Públicas. Año CXX, agosto de 1973, num. 3100, Madrid España. pp. 734-760.
- GUZMAN, R. (1993). *"Estado del Conocimiento Sobre Sismicidad Inducida Por Embalses"*. Memoria del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de

- Ingeniería Sísmica, A.C. México. pp 116-118.
- HAVSKOV, J.; CASTRO, R.; GUZMAN, M.; VALDES, C.; ZUÑIGA, R. y MAYA, R. (1981). "Determinación de los Sismos Locales en la Zona del Embalse Durante los Primeros Mese de Llenado de la Presa Chicoasén". Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe para CFE, marzo de 1991, 101 pag.
- HAVSKOV, J.; CASTRO, R.; GUZMAN, M.; VALDES, C.; ZUÑIGA, R. y MAYA, R. (1981). "Determinación de los Sismos Locales en la Zona del Embalse Durante los Primeros Mese de Llenado de la Presa Chicoasén", segunda parte, Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe para CFE, mayo de 1981, 13 pag.
- HAVSKOV, J. (1982). "The Earthquake Swarm of February 1981 in Mexico City". Geof. Int. Vol. 21-2, México, pp 157-175.
- ILF CONSULTING ENGINEERS. (1988). "Review of Design 1988". Zimapan Hydroelectric Project Mexico. Final Mission Report. Comisión Federal de Electricidad, World Bank. 83 pag.
- JAVIER C., C. y RODRIGUEZ, M. (1989) "Análisis de la Sismicidad Local en la Zona del Embalse de la Presa de Chicoasén Durante 1988". Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, junio de 1989, México D.F., s/n de pag.
- JAVIER CASTRO, C.; LEON VIDAL, J.R. y GARCIA ZUÑIGA, V. (1991). "Estudio de la Actividad Sísmica en la C. H. Manuel Moreno Torres, Chicoasén, Durante 1990". Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, junio de 1991, México D. F., 7 pag..
- JAVIER CASTRO, C. (1992). "Análisis de la Sismicidad Local en los Alrededores de la C. H. Manuel Moreno Torres, Chicoasén, Durante el Primer Semestre de 1991". Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, septiembre de 1992, México D. F., 8 pag..
- JAVIER CASTRO, C. (1993). "Estudio de la Sismicidad Local en los Alrededores de la C. H. Manuel Moreno Torres, Chicoasén, Durante el Segundo Semestre de 1991". Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, febrero de 1993, México D.F., 9 pag..
- LEE, W. H. K. AND STEWART S. W. (1981). "Principles and Applications of Microearthquake Networks". Academic Press. USA. pp. 15-18.
- LERMO, J.; CESATTI, G.; COYOLI, R. y AGUIRRE, J. (1989). "Análisis de la Sismicidad Local en la Zona de la C.H. de Peñitas Durante 1987 y 1988". Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, México D.F., agosto de 1989, 11 pag.
- LERMO, J.; DIAZ DE LEON, J. y JAVIER, C. (1990). "Análisis de la Sismicidad Local en la Zona de la C.H. de Peñitas Durante 1989". Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, México D.F., diciembre de 1990, 13 pag.
- LOPEZ ARROYO, ALFONSO Y PEREZ SAIZ, ANGEL. (1975). "Sismicidad Inducida por Embalses, Método de Estudio, Observación y Sistemas de Vigilancia". Revista de Obras Públicas Num. 3125, Año CXXII, primera parte pp 619-627 y segunda parte pp 717-734.

España.

- LOPEZ VALADEZ, GERARDO. (1972). *"Red de Telemetría Para Detección de Sismos"*. Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- MARENGO MAGALLON, HUMBERTO, 1993. Conferencia "Proyecto Hidroeléctrico Zimapán". 21 de Abril de 1993, Colegio de Ingenieros Civiles.
- MOTA PALOMINO, R., ANDRIEUX, J. Y BONNIN, J.. (1986). *"Bosquejo Sismotectónico del Sur de México"*. Geof. Internacional, Vol. 25-2, México, pp. 207-231.
- NAVA, EMILIO; DOMINGUEZ, TONATIUH y RODRIGUEZ MIGUEL (1985). *"Registro y Análisis de la Sismicidad Local en la Zona del P. H. Peñitas, 1ª Etapa Selección de Sitios e Instalación"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, México D. F., s/n de pag.
- NAVA, EMILIO; DOMINGUEZ, TONATIUH y GUTIERREZ, CARLOS (1986). *"Determinación de los Sismos Locales en la Zona del Embalse de la Presa de Chicoasén Durante 1985"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, agosto de 1986, s/n de pag.
- NAVA, EMILIO; DOMINGUEZ, TONATIUH y COYOLI RAFAEL (1987). *"Registro y Análisis de la Sismicidad Local en la Zona del P. H. Peñitas, 2ª Etapa Periodo Agosto 1985-Diciembre 1986"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, México D.F., s/n de pag.
- NAVA, EMILIO; DOMINGUEZ, TONATIUH; GUTIERREZ, CARLOS y MUJARES, HORACIO (1987). *"Análisis de la Sismicidad Local en la Zona del Embalse de la Presa de Chicoasén Durante 1986"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, septiembre de 1987, México D.F., 35 pag.
- NAVA, EMILIO; DOMINGUEZ, TONATIUH (1988). *"Análisis de la Sismicidad Local en la Zona del Embalse de la Presa de Chicoasén Durante 1987"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, octubre de 1988, México D.F., 31 pag.
- NAVA A., EMILIO (1993). *"Registro y Análisis de la sismicidad Local en las Inmediaciones de la C. H. Peñitas y del Volcán Chichonal, Chiapas Durante 1991"*. Instituto de Ingeniería, UNAM. Informe para CFE, México D.F., Abril de 1993, s/n de pag..
- PALACIOS NIETO, MIGUEL. (1982). *"Geología y Geotécnica del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán, Estados de Hidalgo y Querétaro"*. VI Convención Geológica Nacional, Libro-Guía de la Escursión Geológica a la Región de Zimapán y areas Circundantes, Estados de Hidalgo y Querétaro. México D.F. pp 33-42.
- PROYECTO (1984). *"Estudios Geofísicos en el Area de la Casa de Máquinas"*. P. H. Zimapán, Hgo., Residencia de Geofísica Para proyectos Hidroeléctricos. CFE, 7 pag.
- PROYECTO (1985). *"Informe Preliminar del Estudio de Factibilidad"*. P.H. Zimapán, Hgo.. CFE, Subgerencia de Ingeniería Preliminar Civil y Geotecnia, agosto de 1985, s/n de

pag.

- PROYECTO HIDROELECTRICO ZIMAPAN, HIDALGO. (1989-I). Comisión Federal de Electricidad, México.
- PROYECTO (1989-II). "*Zona de la Boquilla*", *Geología del Proyecto*. Residencia del P. H. Zimapan, Hidalgo. México, D.F.. Septiembre de 1989. Informe Interno de CFE. pag. 23.
- PROYECTO (1989-III). "*Casa de Máquinas*", *Geología del Proyecto*. Residencia del P. H. Zimapan, Hidalgo. México D.F..septiembre de 1989. Informe Interno de CFE. 29 pag.
- PROYECTO (1989-IV). "*Túnel de Conducción*", *Geología del Proyecto*. Residencia del P.H. Zimapan, Hidalgo. México D.F..septiembre de 1989. Informe Interno de CFE. 23 pag.
- RAMIREZ RUBIO, CARLOS (1980). "*XI Excursión Geológica, Etapa No. 3. Alamitos-Río Verde-Cd. Valles, S.L.P.*" Petroleos Mexicanos, suplicia, gral. de distritos de exploración, Z.N. México. pp 84-123, p 90.
- RODRIGUEZ, M.; HAVSKOV, J.; y LEON VIDAL, J.R. (1982). "Determinación de los Sismos Locales en la Zona del Embalse de la Presa de Chicoasén Durante 1981". Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe para CFE, julio de 1982, 56 pag.
- RODRIGUEZ, M.; y LEON VIDAL, J.R. (1983). "Determinación de los Sismos Locales en la Zona del Embalse de la Presa de Chicoasén Durante 1982". Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe para CFE, marzo de 1983, 11 pag.
- RODRIGUEZ, M.; NAVA, E.; y LEON VIDAL, J.R. (1984). "Determinación de los Sismos Locales en la Zona del Embalse de la Presa de Chicoasén Durante 1983". Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe para CFE, mayo de 1984, 11 pag.
- RODRIGUEZ, M.; NAVA A., E.; DOMINGUEZ R., T. y HAVSKOV, J. (1985). "*Manuel Moreno Torres (Chicoasén) Chiapas*". Comportamiento de Presas Construidas en México (1974-1984). Vol. II, cap. II. Comision Federal de Electricidad, pp 11.1-11.11, México D.F.
- RODRIGUEZ, M.; y MILAN, M. (1994). "*Actividad Sísmica Reciente en la Sierra de San Miguel de la Cal, Hidalgo, México*". Inst. de Ing., y ESIA. México, D.F., Inédito. 8 pag.
- SANSORES LOPEZ, A. Y GONZALEZ ESCOBAR, MARIO. (1991). "*Selección de Sitios, Instalación de Equipos y Actividad Sísmica en el P.H. Zimapan*". Oficina de Ingeniería Sísmica, Informe Técnico de CFE (octubre, nov. y dic. de 1990). México D.F.. 13 pag..
- SANSORES LOPEZ, A. (1991). "*Operatividad y Sísmicidad Registrada por la Red Sísmica de Zimapan, Durante el Primer Semestre de 1991*". Comisión Federal de Electricidad, México D.F. Informe Interno, octubre de 1991, 19 pag..
- SANSORES LOPEZ, LUIS A.. (1992). "*Operatividad y Sísmicidad Registrada por la Red Sísmica de Zimapan, Durante el Segundo Semestre de 1991*". Comisión Federal de

- Electricidad, Abril de 1992. México D.F. Informe Interno. 17 pag..
- SANSORES LOPEZ, LUIS A.. (1992-II). *"Operatividad y Sismicidad Registrada en la Red Sísmica de Zimapan Durante el Primer Semestre de 1992"*. CFE, Informe Interno. 16 pag..
- SANTAMARIA SALDAÑA, DORA E. y LOMAS DELGADO, ELIAS (1992). *"Análisis de la Sismicidad Cercana a la Presa Carlos Ramírez Ulloa "Caracol" de 1984 a 1990"*. Comisión Federal de Electricidad, Ingeniería Experimental y Control, Oficina de Ingeniería Sísmica, abril de 1992. México D.F. Informe Interno. 16 pag..
- SANTAMARIA SALDAÑA, DORA E. Y GONZALEZ ESCOBAR, MARIO. (1993). *"Red Sísmica de Zimapan, Sismicidad Durante el Segundo Semestre de 1992"*. Comisión Federal de Electricidad, Ingeniería Experimental y Control, abril de 1993. México D.F. Informe Interno. 29 pag..
- SANTAMARIA SALDAÑA, DORA E. y LOMAS DELGADO, ELIAS (1993). *"El Caracol, Guerrero Actividad sísmica del Segundo Semestre de 1992"*. Comisión Federal de Electricidad, Ingeniería Experimental y Control, Oficina de Ingeniería Sísmica, México D.F. Informe Interno. 25 pag..
- SUTER, M., QUINTERO, O. AND JOHNSON, C. A. (1992). *"Active Faults and State of stress in the Central Part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico 1. The Venta of Bravo Fault"*. Journal of Geophysical Research. Vol. 97. No. 88. pp 11,983-11,993.
- SUTER, M; CARRILLO M., M.; y LOPEZ M., M. (1992-B). *"Active Faults in the Trans-Mexican Volcanic Belt-the Aljibes Half-Graben; Structure, Kinematics and Seismic Hazard Estimate"*. GEOS Bol. Unión Geofis. Mex. vol. 12, no. 5. México. pag. 12.
- UDIAS, A. Y MUÑOZ, D..(1989). *"Movimientos Fuertes del Suelo y Riesgo de Terremotos", Física de la Tierra*. Universidad Computense de Madrid, España.
- VEGA PEREZ, MACARIO Y CHAVEZ RAZO, HECTOR. (1987). *"Los Sismos y la Seguridad de las Presas"*. Memorias del VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Noviembre de 1987. México. pp A76-A89.

ANEXO 1

DATOS PRINCIPALES

Hidrología

a) Area de la cuenca del Río Pánuco	84,956 km ²
b) Area de la cuenca hasta Zimapán	11,869 km ²
c) Número de años de registro (deducidos)	43
d) Escurrimiento medio anual	982 Mm ³
e) Volumen medio mensual escurrido	81.8 Mm ³
f) Gasto medio	31.1 m ³ /s
g) Volumen medio anual aprovechado	868 Mm ³
h) Gasto medio aprovechado	27.4 m ³ /s
i) Porcentaje de aprovechamiento	88.1 %

Vaso de Almacenamiento

a) Elevaciones		Capacidad
NAMINO	1520 msnm	680 Mm ³
NAMO	1560 msnm	1,360 Mm ³
NAME	1563 msnm	1,426 Mm ³
b) Capacidad para azolves		250 Mm ³
c) Capacidad útil NAMINO-NAMO		680 Mm ³
d) Capacidad para control de avenidas NAMO-NAME		66 Mm ³
e) Area ocupada por el embalse al NAME		22.9 km ²
f) Area ocupada por el embalse al NAMO		21.8 km ²
g) Area ocupada por el embalse al NAMINO		13 km ²

Obra de Desvío, con TR = 10 años

a) Gasto máximo avenida	632 m ³ /s
b) Gasto de diseño, máximo	609 m ³ /s
c) Elevación atagüfa aguas arriba	1,405 msnm
d) Elevación atagüfa aguas abajo	1,385 msnm

e) Túnel sección portal	9.4 x 9.4 m
f) Elevación de entrada	1,383 msnm
g) Longitud total	522 m
h) Volumen de la excavación en túnel	46,020 m ³
i) Velocidad máxima	8 m/s
j) Cierre provisional	Obturadores metálicos
k) Volumen de la avenida	298 Mm ³

Cortina

a) Tipo	Arco bóveda en concreto
b) Elevación de la corona	1565 msnm
c) Longitud de la corona	80 m
d) Altura total del desplante	200 m
e) Volumen	293,000 m ³
f) Desplante	1,365 msnm
g) Bordo libre	2 m

Obra de Excedencias, con "Avenida Máxima Probable"

Tiempo de Recurrencia (TR) = 10,000 años.

a) Gasto máximo avenida	2 960 m ³ /s
b) Volumen de la avenida	1 209 Mm ³
c) Gasto de diseño descarga	2 314 m ³ /s
d) Elevación de la cresta	1 547 msnm
e) Longitud efectiva del cimacio	21.0 m
f) Compuertas	Radiales
	3 de 7 m x 15 m
g) Diámetro del túnel	10.7 m
h) Velocidad máxima en el túnel	30 m/s
i) Longitud del túnel	422 m
j) Relación de llenado	0.8

Obras de Generación de Energía

a) Tipo de toma	Rampa
b) Elevación de la obra de toma	1 500 msnm
c) Elevación de la plantilla en el	

canal de llamada	1 496.5 msnm
d) Dimensiones de compuertas rejillas	3.9 x 4.5 m 6 tableros de 3 x 12 m (ancho x altura)
e) Diámetro del túnel de conducción	5.0 m
f) Longitud del túnel de conducción	20 237 m
g) Diámetro del a conducción a presión	3.5 m
h) Longitud de la conducción a presión	896.5 m
i) Gasto de diseño por unidad	29.5 m
j) Nivel medio de desfogue	950 msnm
k) Velocidad de rotación en las turbinas	360 rpm
l) Carga bruta máxima	606 m
m) Carga bruta mínima	563 msnm
n) Carga bruta de diseño	589.8 m
ñ) Carga neta de diseño	534.8 m
o) Generador	147.4 MVA
p) Potencia de cada unidad	140 MW
q) Capacidad instalada, 2 pelton	280 MW
r) Factor de planta medio anual	0.53
s) Generación media anual firme	1 139.6 GWh/año
t) Generación media anual secundaria	152.8 GWh/año
u) Generación media anual	1 292.4 GWh/año
v) Nivel de la subestación	968.15 msnm
w) Dos líneas de salida de	230 kV c/u
x) Longitud hacia la red Daño por Huichapan	

ANEXO 2

PRESAS DAÑADAS O DESTRUIDAS POR TERREMOTOS Tabla 1.

CARACTERISTICAS DE LA PRESA						CARACTERISTICAS DE TERREMOTO				DIST. DE LA PRESA AL EPIC.	DAÑOS SUFRIDOS
NOMBRE	PAIS	TIPO	AÑO DE CONSTRUCCION	ALT.	LONG. DE LA CORONA	NOMBRE	FECHA	MAG.	INTENSIDAD		
				m	m					Km	
LANGLEY	E.U.	T	1880	-	-	CHARLESTON	31-VIII-1895	7	VII.RF	160	GRIETAS IMPORTANTES Y VIAS DE AGUA CONSIDERABLES.
GREGGS	E.U.	T	1876	-	46	"	"	7	IX	16	GRIETAS LONGITUDINALES Y DEZLIZAMIENTO EN AMBOS PARAMENTOS.
SAN ANDREAS	E.U.	T	1870	29	271	S. FRANCISCO	10-IV-1906	8.3	X.RF	0	GRIETAS DIVERSAS.
UPPER CRISTAL SPRINGS	E.U.	T	1878	23	213	"	"	"	"	0	GRIETAS DIVERSAS.
ANTIGUA SAN ANDREA	E.U.	T	-	8.5	55	"	"	"	"	0	DESLIZAMIENTO SEGUN LA DIRECCION DE LA FALLA DE SAN ANDES.
UPPER HOWELL	E.U.	T	1878	11	192	"	"	"	IX.RF	0	GRIETAS EN EL PARAMENTO DE AGUAS ARRIBA Y ASENTAMIENTO.
LOWER HOWELL	E.U.	T	1877	11.5	146	"	"	"	"	0	FRACTURA DE 1.5 m DE ANCHO.
DESCONOCIDO	E.U.	T+H	-	-	-	"	"	"	VIII.RF	3	ROTURA TOTAL.
PIEDMONT	E.U.	T	1905	15.5	76	"	"	"	VII.RF	30	FRACTURAS DIVERSAS Y ASENTAMIENTO DE LA CORONACION.
VOLCANO	MEX.	T	-	3.5	-	IMPERIAL VALLEY	22-VI-1975	7	VI.FR	37	ROTURA TOTAL.
ONO	JAP.	T	1912	38	329	KWANTO	1-IX-1923	8.3	IX.RF	96	FRACTURAS DIVERSAS Y ASENTAMIENTO DE LA CORONACION.

UPPER MURAYANA	JAP.	T	1923	24	323	"	"	8.3	VIII.RF	138	GRIETAS DE GRAN LONGITUD Y PROFUNDIDAD.
LOWER MURAYANA	JAP.	T	1927	31	589	"	1-IX-1923	8.3	VIII.RF	139	GRIETAS LONGITUDINALES EN CORONACION Y ASENTAMIENTO.
SHEFFIELD	E.U.	T	1919	9	244	STA. BARBARA	29-VI-1925	6.3	VII.RF	18	ROTURA TOTAL.
MINE-YANA	JAP.	T	1920	9	91	TANGO	7-III-1927	7.9	X.RF	-	ASENTAMIENTOS, ROTURA DEL ESTRIBO IZQUIERDO.
CHATSWOTTH	E.U.	T	1918	13	823	SAT. MONICA BAY	30-VIII-1930	7	VI.MM	19	GRIETAS EN TODA LA CORONACION Y GRIETAS PEQUEÑAS EN AMBOS PARAMENTOS, GRANDES FILTRACIONES.
IDU	JAP.	T	-	7.5	-	IDU	26-IX-1950	7	V.JMA	-	ROTURA TOTAL.
USANTO	FOR	SH	1927	56	1281	KAGI	9-XII-1950	-	-	-	DESIZAMIENTO EN AMBOS PARAMENTOS.
MALPASSO	PERU	E	1936	78	152	PERU	10-X-1936	7	VI.MM	7	LA CORONACION SE DESPLAZO 5 cm AGUAS ABAJO, ASIENOS DE 7.5 cm.
HUNAKAWA	JAP.	T	-	7.5	-	OGA	1-V-1939	7	V.JMA	-	DESTRUIDA POR COMPLETO.
LAGUNA	E.U.	T	1938	15	177	IMPERIAL VALLEY	18-V-1940	7.1	VI.MM	67	DAÑOS EN OBRAS DE FERROCARRIL Y CANALIZACIONES PROXIMAS.
COGOTI	CHIL	E	1938	84	159	CHILE CENTRAL	6-IV-1943	8.3	IX	-	ASIENOS DE 39 cm, DESLIZARON TALUDES ROCOSOS PROXIMOS.
BOZ SUISKAYA	CEI	T	1943	27	281	UZBEKISTAN	1944	-	VII.MM	-	ASIENOS DE LA ESTRUCTURA DE 28 cm.
OY	JAP.	T	1935	24	156	MIKAWA	13-I-1945	7.1	III.JMA	-	DESTUIDA POR COMPLETO.
DY	JAP.	T	1946	24	15	NANKAI	21-III-1946	8.1	III.IV	272	MUY POCOS DAÑOS.

OTANI	JAP.	T	1920	27.5	275	*	21-III-1946	8.1	V.JMA	256	GRIETA LONGITUDINAL EN CORONACION Y VARIAS MAS PEQUEÑAS EN PARAMETROS AGUAS ARRIBA. CUERPO CENTRAL DAÑADO.
OGAWA-SHISTA	JAP.	T	1944	23	128	*	-	8.1	*	208	DAÑOS EN EL RELLENO DE UN ESTRIBO. GRANDES FILTRACIONES.
NAGI	JAP.	T	1942	25	287	*	-	8.1	IV.JMA	288	FISURA EN CIMENTOS Y GRANDES FUGAS DE AGUA EN EL ESTRIBO DERECHO.
SHIOTE	JAP.	T	1928	21	188	NANKAI	*	8.1	*	272	GRIETAS EN PARAMENTOS AGUAS ABAJO A 2/3 DE ALTURA.
NICHINAN	JAP.	T	1760	20	61	*	-	8.1	-	336	GRIETAS Y GRANDES FUGAS DE AGUA.
MIZUSAKO	JAP.	T	1940	20	61	*	-	8.1	IV.JMA	320	FUGAS DE AGUA EN CONDUCCION SUBTERRANEA.
SAKURA	JAP.	T	1360	35	281	*	-	8.1	V.JMA	128	LIGEROS DAÑOS.
SUMMIT	E.U.	T	-	-	-	MANIX	10-IV-1947	0.4	VII.MM	13	LA ESTRUCTURA SUFRIO GRANDES DAÑOS.
RUBY	E.U.	-	-	-	-	MONTANA	23-XI-1947	-	VIII.MM	-	CAYERON ROCAS DE GRAN ALTURA SOBRE EL EMBALSE, SIN AFECTAR LA PRESA.
HOSOROGI	JAP.	T	-	8.5	509	FUKUI	27-VI-1948	7.3	XI.MM	5	ROTURA TOTAL.
NORTH END	E.U.	T	-	-	-	CALIPATRIA	29-VII-1950	5.5	VII.MM	-	GRIETAS, ROTURA DEL TERRENO AGUAS ABAJO.
YUBA	E.U.	T	1910	8.5	268	CALIFORNIA-NEVADA	1951	-	VI.MM	-	DESPLIZAMIENTO DEL TALUD DE AGUAS ABAJO.

T = tierra; E = escollera; H = hormigón; SH = semihidráulico.

* = terremoto inducido.

o = intensidad referida al sitio de la presa.

PRESAS DAÑADAS O DESTRUIDAS POR TERREMOTOS Table 1. continuación.

CARACTERISTICAS DE LA PRESA						CARACTERISTICAS DE TERREMOTO				DIO. DE LA PRESA AL ETC.	DAÑOS SUFRIDOS
NOMBRE	PAIS	TIPO	AÑO DE CONSTRUCCION	ALTURA	LONGITUD DE LA CORONA	NOMBRE	FECHA	MAG.	INTENSIDAD		
				m	m					Km	
BUENA VISTA	E.U.	T	1890	5	10 ²	ARVIN-TEHACHAPI	21-VII-1977	7.7	IX.MM	27	ASIENTOS DE 1.20 m, COMIENZO DE DESLIZAMIENTO.
DRY CANYON	E.U.	SH	1912	20	188	"	"	"	VI.MM	74	GRIETAS PARALELAS AL EJE DE LA PRESA EN TODA LA CORONACION. ASIENTOS DE 8 cm Y DESLIZAMIENTO HACIA AGUAS ARRIBA.
SOUTH HAIWEE	E.U.	SH	1913	28	473	"	"	"	"	157	NUMEROSAS GRIETAS EN EL PUNTO DE MAYOR ALTURA DE LA PRESA. DESLIZAMIENTO A PUNTO DE INICIARSE. FISURAS.
DESCONOCIDO	E.U.	T	-	-	-	"	"	"	IX.MM	16	COMPLETAMENTE DESFRUIDA.
DEER CREEK	E.U.	T	-	-	-	"	"	"	VII.MM	-	GRIETAS Y ASIENTOS.
SAKURA	JAP.	T	1360	35	281	JOSHINO	18-VII-1952	7	IV.JMA	40	ROTURA SIN LLEGAR A COLAPSO.
COLEMAN	E.U.	T+H	-	-	-	FALLON	6-VII-1954 23-VIII-1954	6.6 6.8	IX.MM	26	DESTRUIDA LA ZONA DE TIERRA. FILTRACIONES QUE EROSIONARON EL HORMIGON.
SAGUSPE	E.U.	T	-	-	-	"	23-VIII-1954	6.8	"	21	GRAN GRIETA QUE LUEGO SE DESTRUYO.
ROGERS	E.U.	T+H	-	-	-	"	"	6.8	"	56	DESTRUIDA POR LA PARTE DE TIERRA Y EROSION FUERTE DEL HORMIGON.

SAINT MARY	E.U.	T	1928	17	87	SAN FRANCISCO BAY EAST.	1955	5.4	VII,MM	-	GRIETA DE 8 cm EN PARAMENTO DE AGUAS ARRIBA. DESLIZAMIENTO DEL NUCLEO. LA RIGIDEZ DEL MISMO QUE ERA DE HORMIGON CAUSO LA GRIETA.
HEBGEN	E.U.	T	1913	20.5	220	HEBGEN LAKE	1959	7.1	VII,MM	0	GRIETAS EN NUCLEO DE HORMIGON. ASIEN-TOS DE 1.5 m EN AMBOS PARAMENTOS.
HSINFENKIANG	CHI-NA	H	1958	105	440	HSINFENKIA NG*	1962	6.1	?	-	GRIETAS DIVERSAS EN LA PARTE ALTA DE LA PRESA.
KOYNA	IN-DIA	H	1954 1963	102	450	KOYNA*	1967	6.5	?	-	GRIETAS EN AMBOS PARAMENTOS DE ALGUNOS BLOQUES A LOS DOS LADOS DEL ALIVIADERO.
UPPER SAN FERNANDO	E.U.	SH	1921 1922	18.3	-	SAN FERNANDO	9-II-1971	6.6	VII-XI,MM	8	DESLIZAMIENTO GENERAL EN DIRECCION AGUAS ABAJO (1.5 m) Y ASIEN TO (0.8 m).
LOWER SAN FERNANDO	E.U.	H	1912 -15 1930	43	665	"	"	"	VIII-XI,MM	15	DESLIZAMIENTO Y ASIEN TOS MUY FUERTES DEL PARAMENTO DE AGUAS ARRIBA.
PACOIMA	E.U.	A-G ARCO	1938	113	-	"	"	"	VIII-XI,MM	87	FUE DAÑADO UNO DE LOS ESTIBOS Y CAUSO GRANDES DESLIZAMIENTOS EN TALUDES PROXIMOS.

NOTA.- En la presa de pacoima existía un acelerógrafo que detectó una aceleración máxima horizontal de 1.25" y vertical de 0.72".

**DATOS PRINCIPALES DE LAS PRESAS EN LAS CUALES SE HA ESTUDIADO
LA SISMICIDAD INDUCIDA POR EL LLENADO DEL EMBALSE**

TABLA 2.

NOMBRE	PAIS	ALT.	CAPACIDAD DEL EMBALSE EN M de m ³	SISMICIDAD ANTES DEL LLENADO	PERIODO DE LLENADO		FECHA DE COMIENZO DE TORNILLOS PREMONITORES	TERREMOTO PRINCIPAL		GEOLOGIA	TECTONICA
					PRINCIPIO	FIN		FECHA	MAGNITUD O INT.		
KOYNIA	Ind.	103	2780	Muy baja	1962	1964	1963	10-XII 1967	6.5	Altenancia de basalitos compactos y tobas con intercalaciones arcillosas.	No se acusan fallas aunque pudieran existir superficies de deslizamiento en los contactos
CREMASTA	E.U.	160	4750	Media	1965	FEB. 1966	XII-1965	5-II 1966	6.2	Flish oceano-oligoceno.	A 11 km de la presa, dentro del embalse, existen grandes fallas en los contactos del flysh con las calizas jurásicas. Es Donde se produjeron los premonitores y réplicas más fuertes.
KARIBA	Rode Zamb	125	160,368	Muy baja	XII 1958	1963	VII-1961	3-IX 1963	6.1	Cuarcitas, calizas y areniscas.	Numerosas fallas en el área del embalse.
HSINFENGIANG	Chi.	105	11,000	Baja	1959	1961	1959	19-III 1962	6.1	Rocas graníticas del Mesozoico superior.	Fallas complejas.
BOULDER (Lago Mead)	E.U.	142	36,800	Baja	1935	1938	IX-1936	4-V 1939	5.0	Granitos y esquistos precámbricos, terrenos paleozoicos y rocas volcánicas terciarias.	Fallas localizadas previamente y otras confirmadas después.

MONTEYNARD	Fr.	155	240	Baja a media	1962	1963	25-IV-1963	25-IV-1963	4,9	Calizas duras apoyadas en esquistos blandos y calizas margosas.	Las calizas duras están muy diaclasadas. Fallas en el área del embalse y en la cerrada
KUROBE	Jap.	186	148.8	Media a fuerte	1960	1969	-	-	4,9	Biotita y granito.	Fallas en el área del embalse.
CRANGAREVO	Yug.	123	1277	Media	1967	1970	-	-	4,0	Calizas jurásicas con zonas carsticas.	Falla próxima a la presa.
MANGLA	Pak.	235	7200	Media a alta	II-1967	-	-	-	3,6	Areniscas débilmente cementadas, arcillas y aluviones terciarios.	Falla próxima al área del embalse.
OUED-FODDA	Arg.	89	225	Media	1932	1933	I-1933	V-1933	VI-VIII	Bancos calcáreos jurásicos.	Gran cantidad de diaclasas.
GRANDVAL	Fran.	88	292	Baja	1959	1960	31-XII-1962	5-VIII-1963	V	Esquistos y gneiss.	Probables fallas en el área del embalse.
VAJONT	Ital.	261	150	Media	1960	-	V-1960	IX-X-1963	V-VI	Calizas y margas jurásicas y cretácicas.	
CANELLES	Esp.	133	716	Baja a media	Hasta la mitad en 1961	-	-	9-VI-1962	V	Margas y calizas jurásicas y cretácicas. Afloramiento diapírico del Keuper.	Fallas de diferentes alineaciones y fracturas. Fallas transversales que favorecen la extrusión del diapíro.

CAMARILLAS	Espa.	36	39.9	-	XII 1960	II-1963 En el 81 = 24 m.	18-III-1961	8-XII 1961	VI	Domo de calizas cretácicas y eocénicas.	Diapiros en formación.
EL GRADO	Espa.	88	400	-	1966	-	14-XII 1966	14-XII 1966	III-IV	Conglomerados oligocenos que recubren calizas luteciensis y del cretácico superior.	Posibles zonas carsticas.
CONTRA	Suiza	230	86	Media	VIII 1964	1965	V-1965	10-XI 1965	Baja	Gneis en filones y gneis-silico-calcareos pasando a mármoles.	Estratificación vertical. Fallas en el eje del valle. Otras fallas cortan el lecho rocoso del embalse dividiendolo en bloques más o menos independientes.
TALBINGO	Austria	162	925	Baja	V-1971	XII 1971	VII-1971	XII 1971	2.4		

(López y Pérez, 1975)

NOTA.- Se han realizado también estudios de sismicidad inducida en los siguientes embalses: Gran Dixence (285 m), Mica (243 m), Oroville (236 m), Glenn Canyon (214 m), Daniel Johnson (214 m), Almendra (200 m), San Luis (116 m), Piove di Cadore (112 m), Orlic (85 m), Hendrik Verwoerd (66 m), Marathon Piastra, Begina Basta, Kastroki, Vouglans, La Pradera, Tous, La Baells, y en México: Peñitas, Chicoasén, y Caracol.

Embalses Afectados por Eventos Sísmicos de Magnitud M > 4 (Escala Richter)

	Presa (País)	h (m)	V (Mm ³)	S (km ²)	Mag. M	Tardanza (años)
1	Koyna (India)	103*	2780	62.7	6.5	3
2	Kremasta (Grecia)	165	4750	89	6.3	3
3	Kariba (Zambia)	128	180600	6572*	6.25	4
4	Hsinfengkiang (China)	105	10500	295	6.1	3
5	Marathon (Grecia)	63	41	1.6	5.75	8
6	Oroville (USA)	230	4400	62.72*	5.7	8
7	Bajina-Basta (Yugoslavia)	89	340	9.5	5.6/5	1
8	Aswan (Egipto)	111	168900	4000*	5.5	17
9	Mondocino (USA)				5.2	
10	Volta Grande (Brasil)	33*	2300	175.2	5.2	1
11	Porto Columbia (Brasil)	53	1460	68.9	5.1	2
12	Hoover (USA)	221	34852	472.4	5	3
13	Benmore (New Zealand)	118	2040	53.4	5	1
14	Ecumbene (Australia)	116	4761	101	5	2
15	Kerr (USA)	57*	1505	66.4	4.9	13
16	Kurobe (Japón)	186	149	1.86	4.9	1
17	Monteynard (Francia)	155	275	4.9	4.8*	1
18	Grandval (Francia)	88	292	8.3	4.7*	4
19	Canales (España)	150	678	12.2	4.7*	2
20	Akosombo (Ghana)	120.6*	148000	8502*	4.7*	1
21	Kastraki (Grecia)	96*	1	2.6	4.6	1
22	Nurek (Tadjikistan)	317	11000	86.7	4.5	3
23	Vouglans (Francia)	130	605	14.6	4.4	3
24	Piastra (Italia)	93	13	0.35	4.4	1
25	Clark Hill (USA)	67	3517	168.4	4.3	22
26	Manicouagan 3 (Canada)	108	10423	239.3	4.1	imp
27	Camarillas (España)	44	40	2.8	4.1/3.5	1
28	Cajuru (Brasil)	23*	193	21.7	4	18
29	Itezhtezhi	65	5000	192.3	4	2
30	Warragamba (Australia)	137	-	-	4	-

h* = nivel de altura sobre el terreno. S* dato disponible; los otros fueron aproximados conforme la S(Km²). D = tiempo de tardanza (en años); imp = evento sísmico durante el llenado.

M = Magnitud (en escala Richter); M* = original en otra escala para eventos sísmicos. (Vladut, 1993)

ANEXO 3

EPICENTROS LOCALIZADOS DENTRO DEL AREA DEFINIDA
POR LOS SIGUIENTES PARALELOS Y MERIDIANOS.

LIMITE S = 20.216670
 LIMITE N = 21.100000
 LIMITE E = 99.025000
 LIMITE W = 99.983330

SIGLO XIX

130154 2030 EN SAN JUAN DEL RIO
 260254 1300 EN SAN JUAN DEL RIO

SIGLO XX

Fecha	Hora	Lat.	Long.	Prof.	Mag.
ddmmaa	hhmmss	(°)	(°)		M _c
230870	1008102	20.750 N	99.170 W	33 KM	
230870	2122290	20.830 N	99.100 W	33 KM	3.70
300870	0831125	20.540 N	99.100 W	33 KM	
300870	0853056	20.440 N	99.050 W	33 KM	
220376	1820340	20.500 N	99.283 W	33 KM	4.00
260376	1237005	20.460 N	99.180 W	15 KM	
270376	0836030	20.320 N	99.210 W	15 KM	
270376	0929455	20.480 N	99.100 W	15 KM	
290376	0147200	20.260 N	99.410 W	15 KM	
020476	1645170	20.350 N	99.160 W	08 KM	
070476	0037571	20.530 N	99.170 W	08 KM	
090476	2054510	20.350 N	99.140 W	09 KM	
110476	0924392	20.640 N	99.090 W	04 KM	
110476	2147231	20.270 N	99.460 W	04 KM	

180476	0940520	20.584 N	99.067 W	33 KM	4.00
030576	1046250	20.700 N	99.116 W	33 KM	3.00
030576	1054360	20.700 N	99.116 W	33 KM	3.00
050576	0411275	20.584 N	99.083 W	33 KM	3.00
300776	2217000	20.632 N	99.450 W	33 KM	3.00
040976	0513205	20.600 N	99.250 W	33 KM	3.00
041076	1055450	20.230 N	99.200 W	05 KM	
071076	0026570	20.340 N	99.090 W	05 KM	
071076	0929245	20.630 N	99.130 W	05 KM	
101076	0632300	20.665 N	99.604 W	33 KM	3.00
101076	2312000	20.730 N	99.622 W	33 KM	3.00
111076	0753020	20.830 N	99.245 W	33 KM	3.00
131076	1523415	20.768 N	99.100 W	33 KM	3.00
031176	0836530	20.851 N	99.220 W	33 KM	3.00
031276	1026085	20.700 N	99.060 W	33 KM	3.00
121276	1747030	20.464 N	99.717 W	33 KM	3.00
150977	1213470	20.390 N	99.280 W	33 KM	3.00
060778	2136290	20.600 N	99.930 W	33 KM	
070778	0811110	20.500 N	99.850 W	33 KM	
250778	0421190	20.300 N	99.060 W	SUP	
300778	0828190	20.420 N	99.790 W	SUP	
080878	1736350	20.890 N	99.090 W	33 KM	3.00
130878	0503180	20.870 N	99.360 W	33 KM	3.00
231078	2111520	20.430 N	99.230 W	SUP	
170981	0643053	20.448 N	99.058 W	23 KM	3.10
081081	1818217	20.754 N	99.456 W	33 KM	3.70
210782	2252058	20.317 N	99.120 W	33 KM	3.20
290483	0444442	20.653 N	99.767 W	04 KM	3.00
270783	0033010	20.334 N	99.112 W	03 KM	2.50
220884	2348054	21.096 N	99.063 W	30 KM	3.10
211284	0727485	20.674 N	99.068 W	13 KM	3.40
240785	0713039	20.512 N	99.318 W	19 KM	2.90
120885	2049261	20.886 N	99.922 W	39 KM	3.20
101185	0315185	20.402 N	99.821 W	15 KM	3.00
050486	0503248	20.616 N	99.878 W	00 KM	3.30
200586	1858050	21.095 N	99.814 W	33 KM	3.20

250586	1945477	21.050 N	99.759 W	21 KM	3.30
110686	1017415	20.292 N	99.402 W	45 KM	3.10
091186	0807597	20.931 N	99.614 W	25 KM	3.00
181186	2041030	20.419 N	99.127 W	38 KM	2.70
100287	0029444	20.273 N	99.274 W	20 KM	2.70
230987	2143580	20.788 N	99.187 W	07 KM	3.30
260388	0008469	20.329 N	99.032 W	15 KM	2.40
100989	1041477	21.049 N	99.315 W	03 KM	3.60
100989	1108011	21.042 N	99.429 W	03 KM	4.50
100989	1332575	21.038 N	99.508 W	05 KM	3.80
100989	1422096	20.967 N	99.558 W	01 KM	3.90
100989	1643150	20.768 N	99.245 W	06 KM	3.00
261089	1053141	20.250 N	99.066 W	10 KM	3.50
261089	1054300	20.466 N	99.290 W	19 KM	3.00
261089	1108384	20.390 N	99.152 W	15 KM	3.80
261089	1316524	20.290 N	99.128 W	10 KM	3.50
111189	1734525	20.296 N	99.494 W	22 KM	3.30
281189	1325004	20.882 N	99.260 W	05 KM	3.60
120391	1320456	20.036 N	99.007 W	01 KM	3.28
211191	1918362	20.399 N	99.040 W	04 KM	3.63
030192	2218207	20.720 N	99.189 W	23 KM	2.3
170692	1323012	20.447 N	99.238 W	17 KM	2.78
170692	0641400	20.474 N	99.238 W	24 KM	2.52
160493	0955542	20.143 N	99.102 W	17 KM	2.26

Tabla 2. Epicentros en el P.H. Zimapán en un área no mayor de 50 Km de apotema de la cortina. Información obtenida en el SSN y SISMEM, UNAM.