

SISMOS DE $M > 6$ EN EL VALLE DE MEXICALI-IMPERIAL, GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE ESTRUCTURAS ASOCIADAS A LICUEFACCIÓN

Francisco Suárez Vidal

Depto. de Geología, División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Km 107, Carret. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C., 22860, México
E-mail: fsuarez@cicese.mx

RESUMEN

En un terreno sedimentario no consolidado y sujeto a movimiento generado por temblores de magnitud > 5 , se pueden producir cambios en su estado físico mediante procesos de licuefacción. Los esfuerzos de cizalla asociados al temblor inducen la licuefacción en los sedimentos no consolidados, que pasan de un estado sólido, poroso y saturado con agua a un estado licuado, que resulta del incremento en la presión de poro. Este proceso se manifiesta en la superficie mediante la formación de volcanes de arena, fracturas y grietas.

En los últimos 58 años se han registrado tres sismos de $M > 6$ en el Valle de Mexicali-Imperial, que alcanzaron intensidades de VII a IX en la escala de Mercalli. Estos ocurrieron los días 18 de mayo de 1940, 15 de octubre de 1979 y 8 junio de 1980. Los dos primeros están asociados a la Falla Imperial y el tercero a la de Cerro Prieto y en los tres casos, se observó que los sismos generaron licuefacción. Los temblores de 1940 y 1980 produjeron daños mayores en estructuras civiles en la ciudad y campo, mientras que el evento de 1979, sólo generó rupturas superficiales y daños menores en el trazo de la Falla Imperial. Esta diferencia está relacionada con la distribución y la naturaleza de los sedimentos en la región, especialmente con su grado de saturación y con los valores de aceleración y velocidades de cada sismo.

Como resultado del reconocimiento hecho en el Valle de Mexicali-Imperial después de la ocurrencia de los sismos de Imperial (1979) y de Victoria (1980), se concluye que el proceso de licuefacción en el Valle Mexicali-Imperial se puede generar por sismos de magnitud y aceleraciones por lo menos equivalentes a las registradas durante el temblor de Imperial de $M = 6.6$. Aunque las estructuras asociadas con la licuefacción se presentan en todo el valle, la distribución de volcanes de arena depende del tipo de sedimentos y de su nivel de saturación.

INTRODUCCIÓN

El Valle de Mexicali-Imperial se localiza en la provincia tectónica de Salton, dentro del sistema de fallas San Andrés-Golfo de California, que define la frontera entre las placas Norteamérica y Pacífico (Figura 1). En la región del Valle de Mexicali-Imperial se localizan áreas que por sus alto flujo de calor, su intensa deformación geodésica e intensa actividad sísmica, han sido clasificadas como centros de dispersión (Lomnitz *et al.*, 1970; Elders *et al.*, 1972). Los centros de dispersión de la región del Valle de Mexicali-Imperial son, el de Brawley al Norte de la línea internacional México-Estados Unidos, y el de Cerro Prieto, en la parte sur del Valle de Mexicali. Este último está delimitado al oriente por la Falla Imperial y al occidente por la Falla Cerro Prieto. Ambas son activas con un movimiento relativo lateral derecho (Barnard, 1968; Lomnitz *et al.*, 1970; González-García, 1986) (Figura 2).

Los sismos de mayor magnitud registrados en la región son los de los días 18 de Mayo de 1940 y el 15 de octubre de 1979, con magnitudes de $M = 7.1$ y 6.6 , respectivamente. Los epicentros se localizaron a escasos kilómetros al sur y norte de la línea fronteriza internacional entre Baja California y California, ambos asociados a la Falla Imperial (Chávez *et al.*,

1982; González-García, 1990 a y b). El 8 de Junio de 1980 ocurrió otro temblor de $M = 6.1$ en la región del Valle de Mexicali, cerca del Ejido Victoria, generado por la Falla Cerro Prieto (Frez, 1982; Frez y González, 1989 y 1991; Wong *et al.*, 1997), (Figura 2). Además, se han registrado muchos otros sismos de $M < 5$ que, para los fines del presente trabajo, no son relevantes.

Los tres sismos anteriores tienen una separación epicentral entre 20 y 30 km. Los tres generaron aceleraciones y velocidades del terreno que ocasionaron daños materiales; así mismo, generaron fracturas y "volcanes de arena" inducidos por el fenómeno de licuefacción en los estratos arcillo-arenosos no consolidados y de distribución amplia en el Valle Mexicali-Imperial.

Debido a que los tres sismos ocurrieron en la misma región estructural y sedimentaria podía esperarse que la respuesta del terreno a una perturbación generada por temblores de magnitud similar fuera también parecida. Sin embargo, en los tres casos la respuesta del terreno fue diferente, según se manifestó tanto en la cantidad y distribución de volcanes de arena, fracturas y grietas debidas a licuefacción durante y después de la ocurrencia de los tres sismos, como en los daños en las estructuras civiles.

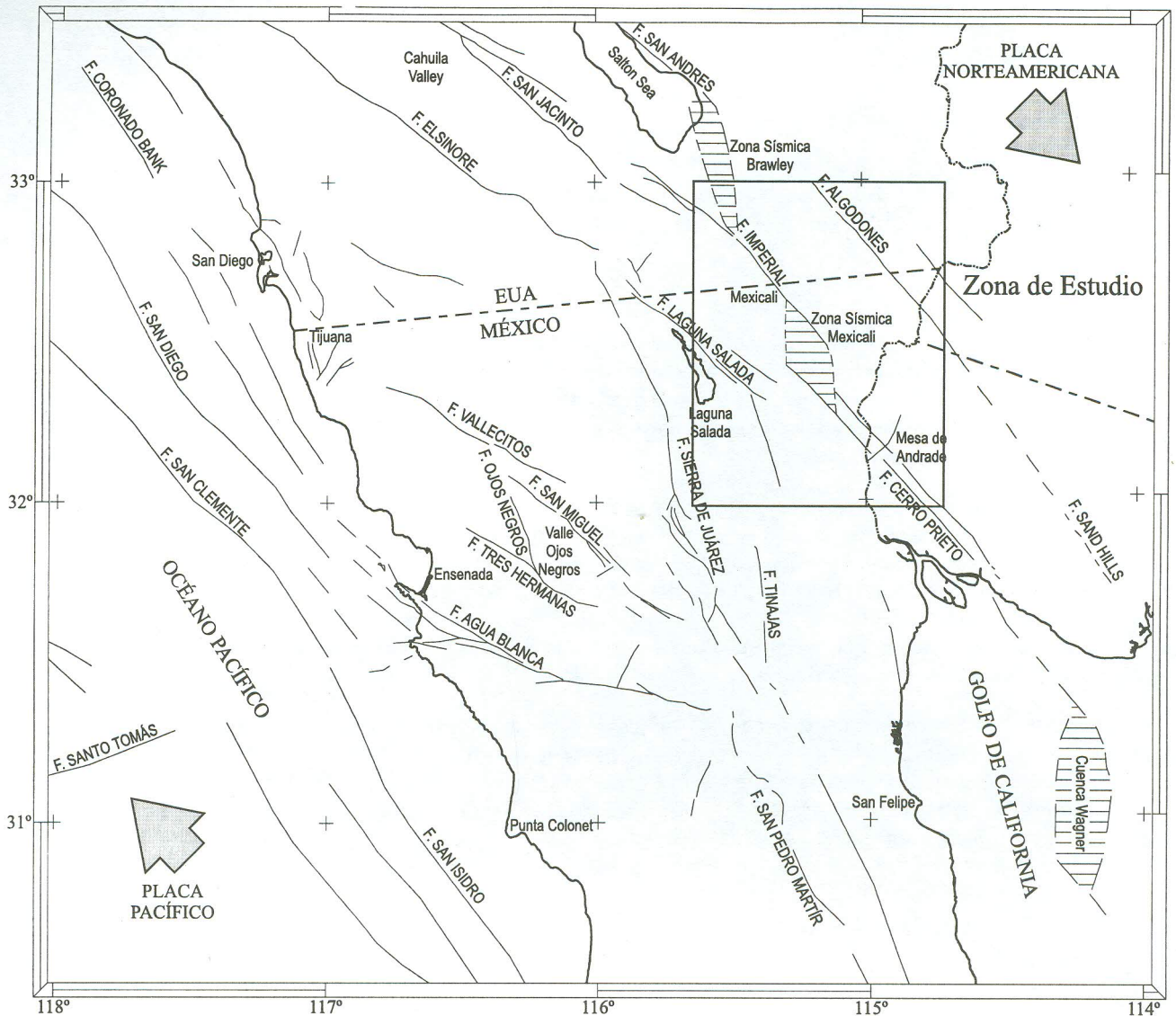


Figura 1. Marco tectónico en la región de la Provincia de Salton, y distribución de las principales fallas activas en Baja California, asociadas al sistema San Andrés-Golfo de California. (tomado de Frez y Frías-Camacho, 1998).

La historia sísmica de la región del Valle de Mexical-Imperial no se conoce con precisión, pues el período documentado es muy corto, con un registro histórico desde 1850 y con datos registrados por sismógrafos desde los años 1930. La posible serie de tiempo que se puede generar para estimar los periodos de recurrencia para temblores de $M > 5$ es muy corta, por lo que es necesario apoyarse en información y evidencias geológicas grabadas en la columna estratigráfica que permitan identificar y determinar eventos sísmicos de magnitud mayor y sus intervalos de recurrencia. Dentro de estas evidencias están las estructuras producidas por licuefacción, que parecen ser inducidas por temblores de $M > 5$, capaces de generar aceleraciones del terreno que provoquen velocidades lo suficientemente altas para modificar la presión de poro en los sedimentos superficiales y saturados. Aunque es posible utilizar estas estructuras como indicadores de actividad sísmica, el proceso que las forma no siempre es claro, porque los parámetros físicos que las producen no siempre se conocen.

PROCESO DE LICUEFACCIÓN

La licuefacción generada por actividad sísmica es el producto del movimiento de los estratos superficiales, conocido como sacudida cíclica. Ésta se relaciona con la amplitud del esfuerzo de cizalla y también con las veces que el movimiento afecta al estrato licuable (Seed, 1979b). Además de la aceleración máxima y de la duración del movimiento del terreno, que generalmente están relacionados con la magnitud del temblor, la relación arena-arcilla, la porosidad, la permeabilidad y el grado de saturación de los sedimentos, juegan un papel importante e influyen en la generación del proceso de licuefacción.

En condiciones normales, al aplicar un esfuerzo sobre una pila de sedimentos, se produce esfuerzo de cizalla que provoca el incremento de la presión de poro en el material no consolidado y saturado. Si el movimiento es continuo, se produce una

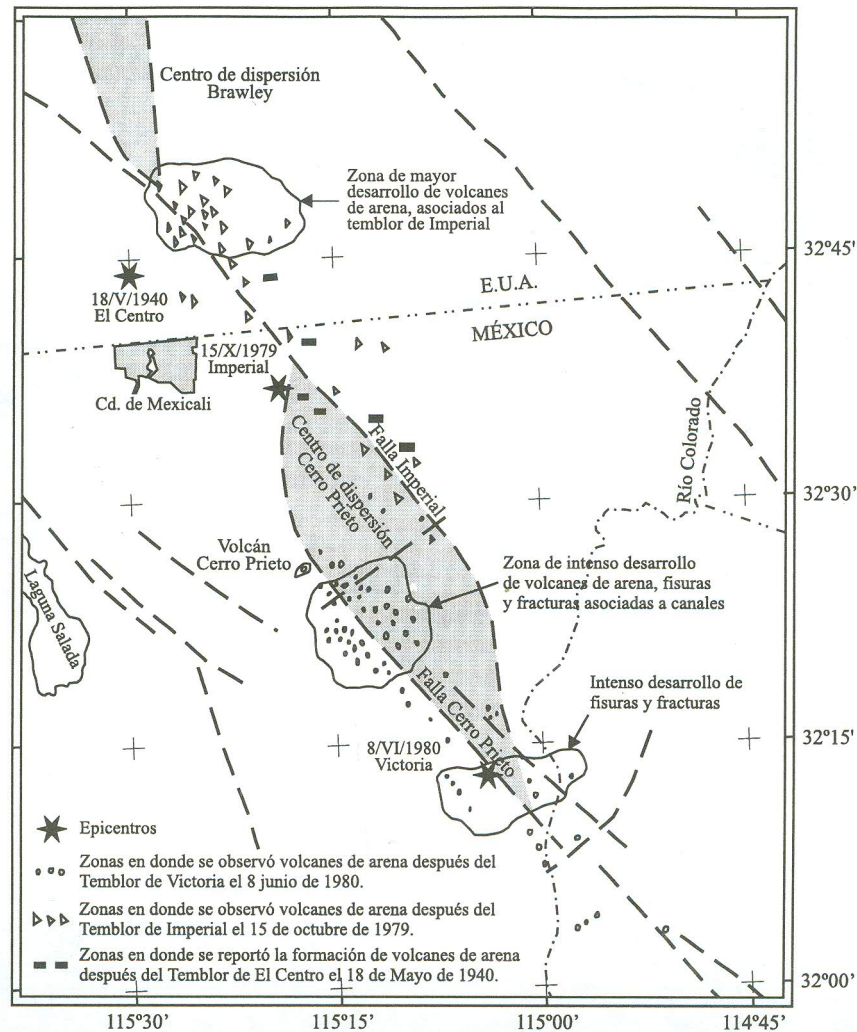


Figura 2. Marco estructural del Valle Mexicali-Imperial con la localización de los temblores con $M > 6$ en el presente siglo y las zonas donde se observó la formación de estructuras por licuefacción.

deformación en la parte más superficial de la columna sedimentaria, (que resulta del flujo de los fluidos contenidos en los poros), al generarse una mezcla fluida que reduce la cohesión de los sedimentos consolidados. Es importante señalar que el proceso no genera cambio en el volumen, sólo en el estado físico.

Durante la ocurrencia de un temblor, la licuefacción del terreno ocurre, generalmente, en los 10 m más superficiales de la columna de sedimentos saturados de agua, debido a que, con la profundidad, la presión litostática aumenta y por lo mismo se incrementa la resistencia del sedimento a ser deformado. La licuefacción se genera al iniciarse el movimiento del terreno inducido por la aceleración y por el efecto del esfuerzo de cizalla sobre el sedimento saturado. Normalmente, cuando el sedimento y el agua forman una mezcla producida por un movimiento sísmico, ésta sale a la superficie en forma violenta a través de conductos pre-existentes o bien, por fracturas generadas por un fenómeno similar al de hidrofracturamiento. Como resultado se forman volcanes de arena de grano medio a fino y arcilla, los cuales pueden mantener un flujo de la mezcla agua-sedimento aún días después de haber ocurrido el temblor. La Figura 3 es

un esquema de una sección vertical, en la que se muestran tres zonas (A, B y C) que corresponden a tres diferentes casos de licuefacción. En A, el material licuable fluye a la superficie a través de un solo conducto alimentador. En B, únicamente se desarrollan intrusiones tabulares que no llegan hasta la superficie. En C, existe una capa superficial intemperizada la cual, al momento del temblor, se fractura provocando que se formen bifurcaciones del dique alimentador. Para que se desarrolle cualquiera de los tres casos, es necesario que el esfuerzo cortante, inducido por el temblor se propague a través de la arena generando una deformación de cizalla, que está en función del ángulo γ (Figura 4).

Para que la mezcla de sedimento-agua fluya hacia la superficie es necesario que se mantenga abierto el conducto alimentador, el cual se encuentra debajo del cono o cráter por donde sale el fluido a la superficie, como se observa en la Figura 5. El primer material sólido que sale es arena de grano fino con una cantidad moderada de limo que, en su movimiento ascendente hacia la superficie, incorpora clastos de forma irregular, de las capas que sobreyacen al estrato licuado (Figura

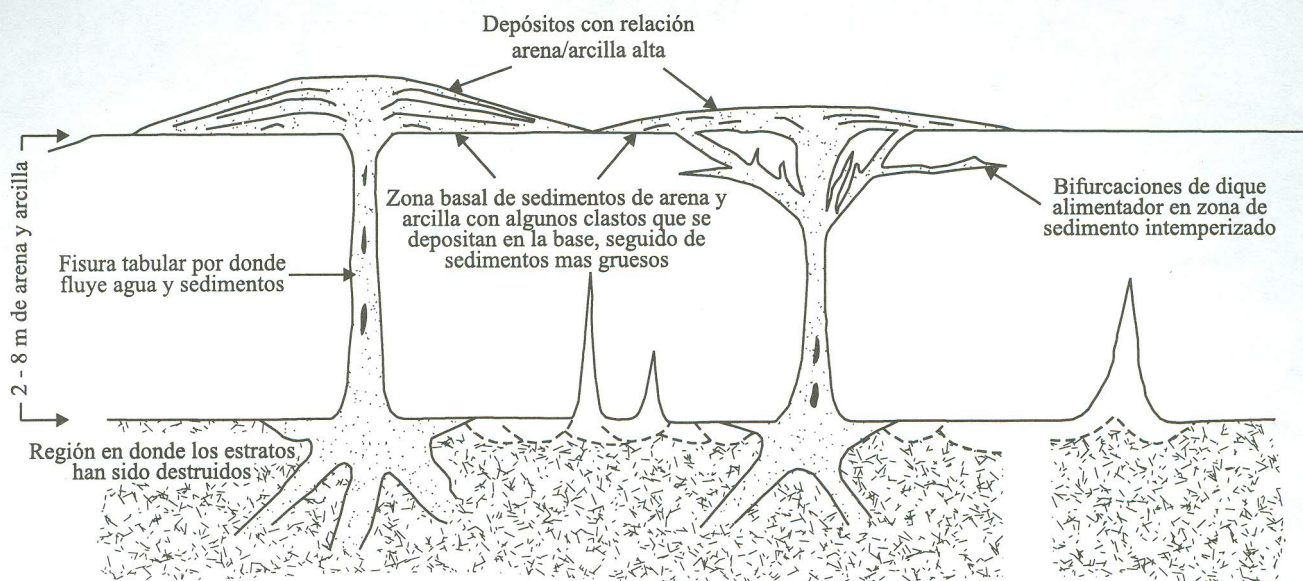


Figura 3. Perfil diagramático que ilustra las diferentes zonas que se desarrollan al formarse un volcán de arena por el proceso de licuefacción. (Obermeier, 1996).

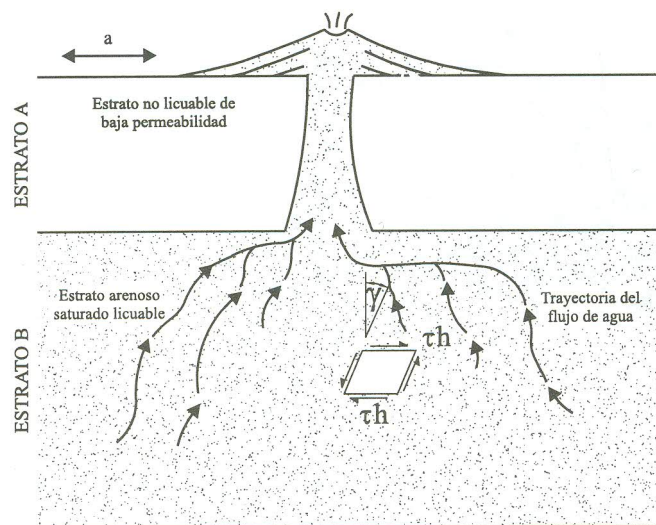


Figura 4. Diagrama que ilustra como se forma un volcán de arena por el proceso de licuefacción, γ es el ángulo de deformación por cizalla, τ_h = esfuerzo de cizalla inducido por la aceleración horizontal, (modificado de obermeier, 1996).

3). La granulometría de los volcanes de arena es similar a la producida por elutriación, aumentando tanto el tamaño del grano como el contenido de clastos en las capas superiores del volcán, y disminuyendo la cantidad de arcilla.

Otras estructuras que se asocian al fenómeno de licuefacción son los diques y sills de arena (Figura 3), que al igual que la formación de grietas y fracturas tienden a desarrollarse en las capas más superficiales. Además de los estratos licuables, la formación de grietas y fracturas requiere que la presión litostática disminuya, lo cual se logra al remover material al hacer excavaciones, como en los canales de irrigación. Al combinarse el movimiento del terreno por un temblor, con la

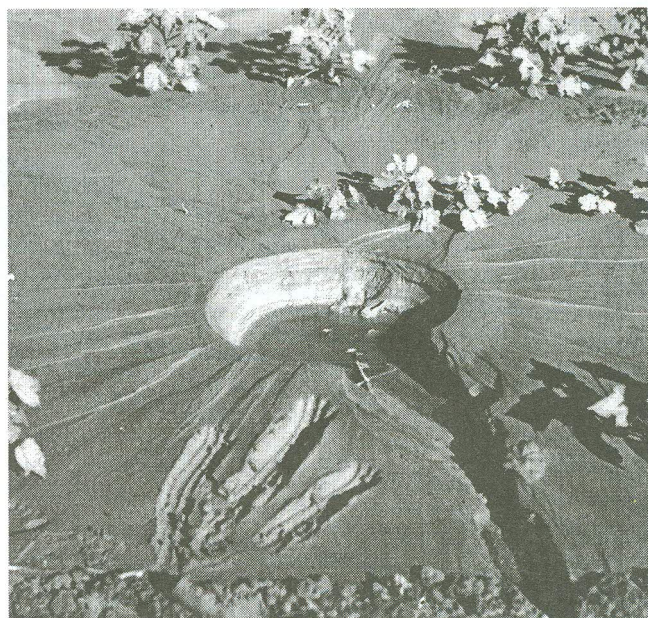


Figura 5. Volcán de arena formado durante el temblor de Victoria 8 de junio de 1980 en el Valle de Mexicali. Obsérvese la estratificación en el crater y el agua saliendo a través del conducto alimentador.

disminución de la presión y la presencia estratos licuables, se generan fracturas que generalmente se distribuyen paralelamente a la excavación (Figura 6).

MARCO ESTRUCTURAL DEL VALLE DE MEXICALI-IMPERIAL

El marco estructural del Valle de Mexicali-Imperial lo conforman un grupo de fallas activas asociadas al sistema transforme San Andrés-Golfo de California, de las cuales tres

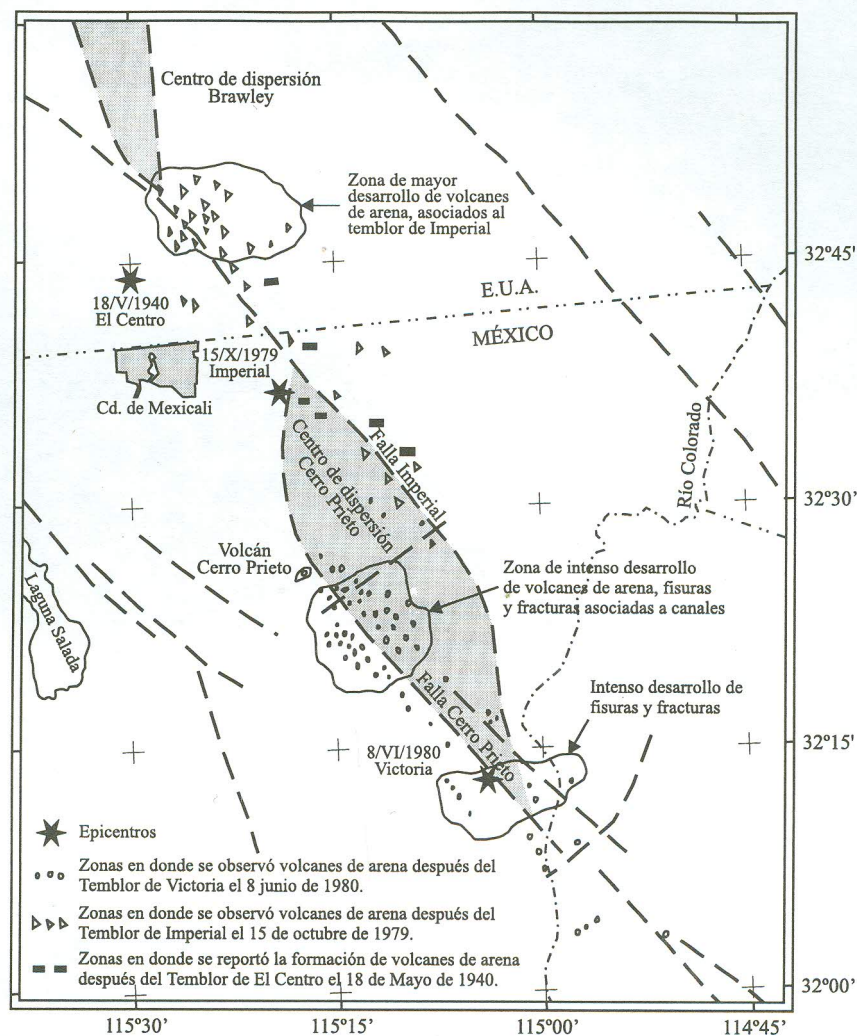


Figura 2. Marco estructural del Valle Mexicali-Imperial con la localización de los temblores con $M > 6$ en el presente siglo y las zonas donde se observó la formación de estructuras por licuefacción.

deformación en la parte más superficial de la columna sedimentaria, (que resulta del flujo de los fluidos contenidos en los poros), al generarse una mezcla fluida que reduce la cohesión de los sedimentos consolidados. Es importante señalar que el proceso no genera cambio en el volumen, sólo en el estado físico.

Durante la ocurrencia de un temblor, la licuefacción del terreno ocurre, generalmente, en los 10 m más superficiales de la columna de sedimentos saturados de agua, debido a que, con la profundidad, la presión litostática aumenta y por lo mismo se incrementa la resistencia del sedimento a ser deformado. La licuefacción se genera al iniciarse el movimiento del terreno inducido por la aceleración y por el efecto del esfuerzo de cizalla sobre el sedimento saturado. Normalmente, cuando el sedimento y el agua forman una mezcla producida por un movimiento sísmico, ésta sale a la superficie en forma violenta a través de conductos pre-existentes o bien, por fracturas generadas por un fenómeno similar al de hidrofracturamiento. Como resultado se forman volcanes de arena de grano medio a fino y arcilla, los cuales pueden mantener un flujo de la mezcla agua-sedimento aún días después de haber ocurrido el temblor. La Figura 3 es

un esquema de una sección vertical, en la que se muestran tres zonas (A, B y C) que corresponden a tres diferentes casos de licuefacción. En A, el material licuable fluye a la superficie a través de un solo conducto alimentador. En B, únicamente se desarrollan intrusiones tabulares que no llegan hasta la superficie. En C, existe una capa superficial intemperizada la cual, al momento del temblor, se fractura provocando que se formen bifurcaciones del dique alimentador. Para que se desarrolle cualquiera de los tres casos, es necesario que el esfuerzo cortante, inducido por el temblor se propague a través de la arena generando una deformación de cizalla, que está en función del ángulo γ (Figura 4).

Para que la mezcla de sedimento-agua fluya hacia la superficie es necesario que se mantenga abierto el conducto alimentador, el cual se encuentra debajo del cono o cráter por donde sale el fluido a la superficie, como se observa en la Figura 5. El primer material sólido que sale es arena de grano fino con una cantidad moderada de limo que, en su movimiento ascendente hacia la superficie, incorpora clastos de forma irregular, de las capas que sobreyacen al estrato licuado (Figura

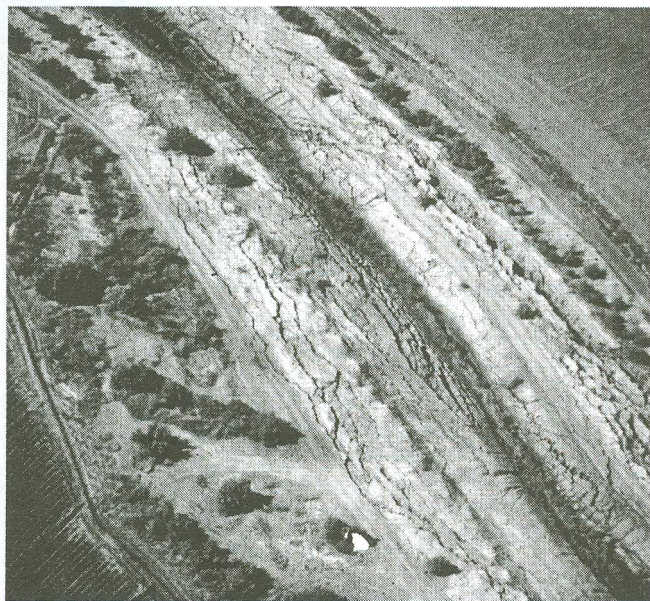


Figura 6. Fracturamiento producido por el temblor de Victoria 8 de junio de 1980, paralelo a un canal de irrigación en el Valle de Mexicali, fotografía aérea.

de ellas delimitan a los grabenes, Cerro Prieto y Brawley (Figura 2). Los temblores analizados en este trabajo se asocian a las Fallas Imperial y Cerro Prieto, que delimitan al graben de Cerro Prieto.

La Falla Imperial es una estructura de rumbo, con un movimiento lateral derecho que delimita el sector oriental del graben o centro de dispersión Cerro Prieto, en donde se ubica el campo geotérmico del mismo nombre. La Falla Imperial tiene un rumbo de N42W, con un echado sensiblemente vertical y una longitud de 75 km, desde aproximadamente 3 km al sur de la ciudad de Brawley, California, hasta unos 16 km al oriente del Volcán Cerro Prieto, en el Valle de Mexicali (Figura 2). La Falla Cerro Prieto es paralela y estructuralmente similar a la Falla Imperial, delimita la margen occidental del centro de dispersión de Cerro Prieto y se extiende por más de 80 km, internándose en el Golfo de California hasta la Cuenca de Wagner. El trazo de la falla es visible únicamente en su sector sur, desde el sitio conocido como Mesa de Andrade hasta el occidente del Golfo de Santa Clara (Figura 1). Hacia el norte, su trazo ha sido inferido a través de la distribución de epicentros, así como por información geofísica (gravimetría, magnetometría, sísmica de reflexión y refracción) y estratigráfica obtenida de la perforación de pozos en el campo geotérmico Cerro Prieto. A esta falla se le asocia un temblor de $M=7.1$ que ocurrió el 31 de Diciembre de 1934 (Barnard, 1968).

SISMOS MAYORES Y LICUEFACCIÓN EN EL VALLE DE MEXICALI

Por su ubicación dentro del contexto tectónico, el Valle de Mexicali se caracteriza por su alto nivel de sismicidad, con magnitudes que van desde microsismos hasta sismos de

magnitud 7 ó inclusive mayores. Se sabe de la ocurrencia de eventos con magnitud cercana a 8, como el temblor de 1892, con epicentro ubicado en la vecindad de la Sierra de Cucapá (Strand, 1980; Mueller y Rockwell, 1991). Otros sismos históricos importantes han ocurrido en 1875 ($M = 6.5$) y en 1906 ($M = 5.7$) (Anderson y Bodin, 1987); (Se desconoce la ubicación epicentral de ambos).

A partir de 1932, con la instalación de la red simológica del Sur de California se tiene un mejor control sobre la localización de los sismos que ocurren en el sur de California y norte de Baja California. Desde entonces, en la región Mexicali-Imperial han ocurrido tres eventos de magnitud mayor a 6, según descripción de Ulrich (1941), Sylvester (1979), González-García J. (1990 b); Wong et al. (1997). Los temblores de El Centro y de Imperial se asocian a la Falla Imperial, mientras que el sismo de Victoria fue producido por la Falla Cerro Prieto (Figura 2). Ambas fallas son generadoras de una microsismicidad muy alta, (Frez y Frías-Camacho, 1998) así como de temblores de magnitudes entre 4 y 5 que no han producido licuefacción o daño material en la región.

De acuerdo con lo observado en el valle de Mexicali-Imperial, los procesos de licuefacción fueron similares a los descritos en el caso A de la Figura 3, documentándose durante y después de los sismos de El Centro, Imperial y Victoria, la estructura y granulometría típica de los volcanes de arena. Asociada al mismo proceso se observó la formación de fracturas y grietas que, en la mayoría de los casos, se presentan y distribuyen en forma paralela a canales de irrigación o drenes construidos en la zona agrícola (Figuras 6 y 7). Conjuntamente con las fracturas se generaron estructuras sedimentarias del tipo de volcanes de arena, los que se presentan en casi toda la zona agrícola del valle (Figuras 8 y 9).

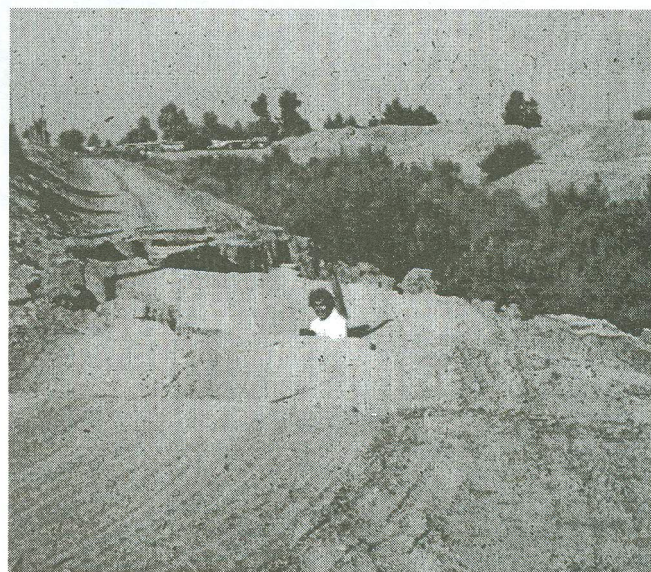


Figura 7. Conjunto de fracturas producidas por el temblor de Imperial 15 de octubre de 1979, asociada a un canal de irrigación, observese que la profundidad de las fracturas es somera.



Figura 8. Volcán de arena producido por el temblor de Victoria del 8 de junio de 1980 en un campo de cultivo de algodón en el Valle de Mexicali.



Figura 9. Conjunto de volcanes de arena generados por licuefacción durante el temblor de Victoria del 8 de junio de 1980 en la zona del campo geotérmico de Cerro Prieto.

La distribución de los volcanes de arena producidos por los temblores de mayo de 1940, octubre de 1979, y el de junio de 1980, no sigue un mismo patrón. La información existente, permite inferir que hubo más licuefacción en el temblor de 1940, que en 1979 (Youd, y Wieczorek, 1982; Muir y Scott, 1982). La diferencia en la generación de los volcanes de arena entre los dos temblores es significativa, tanto en cantidad como en su distribución, lo cual está relacionado con las velocidades inducidas al terreno, con la distribución de los sedimentos arcillo-arenosos en subsuelo y con el grado de saturación de agua. A lo largo del trazo de la Falla Imperial, la concentración de sedimentos licuables cerca de El Centro es mayor que en el Valle de Mexicali (Youd y Wieczorek 1982). A pesar de que los tres sismos tuvieron una magnitud mayor que 6 y que sus epicentros se localizan en una cuenca con características estructurales y estratigráficas similares, se observó una marcada diferencia en la cantidad de volcanes de arena, y en el desarrollo de fracturas paralelas a los canales de irrigación y otras en estructuras civiles. No obstante que los valores de las aceleraciones y velocidades de los temblores de 1940 y 1979 son parecidos, esto es, aceleración horizontal = $0.3g$ y velocidades = 35 cm/seg (Brune *et al.*, 1982), la diferencia en abundancia y distribución de los volcanes de arena parece que fue controlada por el grado de saturación de los sedimentos (Youd y Wieczorek 1982). El temblor de Victoria de 1980, produjo una aceleración horizontal de hasta de $.85 g$ y en el sentido vertical, por momentos excedió a $1g$ (Simons 1982). La máxima velocidad fue de 58 cm/seg . Este movimiento generó volcanes de arena y fracturas en los extremos NE y SW del graben de Cerro Prieto, en cantidades similares al temblor de 1940, lo que hace suponer que las condiciones físicas de los sedimentos son parecidas. De acuerdo con el mismo tipo de observaciones, se infiere que la zona central cercana al trazo de la Falla Imperial está formada por sedimentos distintos. También es significativa la diferencia en daños materiales producida por los tres temblores, siendo mayores los causados por el temblor de 1980 (Suárez *et al.*, 1982; Sharp R., 1982).

Los volcanes de arena generados por el temblor de 1979 se desarrollaron a lo largo de una franja de 2 km de anchura, a ambos lados del trazo de la Falla Imperial. Se reportaron daños leves a distancias de 16 km del epicentro y aislados volcanes de arena a 35 km al noroeste de donde se observaron rupturas superficiales de la Falla Imperial (Muir y Scott, 1982).

Al temblor de Victoria del 8 de junio de 1980, cuyo epicentro se localizó a 45 km al sur del Valle Imperial, se le asocia a la Falla de Cerro Prieto (Figura 2). Produjo una gran cantidad de estructuras de licuefacción, dominando los volcanes de arena. Un aspecto interesante de este sismo es que la falla Cerro Prieto no tuvo manifestaciones superficiales después del temblor. La mayor concentración de volcanes de arena se observó al norte del Ejido Victoria, en la cercanía de la planta geotérmica Cerro Prieto, donde se presentaron hasta 50 volcanes de arena en un área de 10 m^2 (Figura 9) (Suárez *et al.*, 1982). De acuerdo con Cobo (1980), se llegaron a contar hasta 1200 volcanes de arena y un poco más de 350 fracturas en un área de

23 Km² en la vecindad del campo geotérmico Cerro Prieto. Los volcanes de arena se desarrollaron hasta el lugar conocido como Mesa de Andrade, ubicado 40 km al suroeste del epicentro y hacia el norte, en las cercanías del Ejido Michoacán, a 30 km del epicentro (Figura 2). La mayor concentración de estructuras de licuefacción se presentó al norte del epicentro, entre los poblados de Pescaderos y Estación Delta. El fenómeno de licuefacción fue menor hacia el sur del epicentro, como lo indica la densidad de volcanes de arena y fracturas. En la Figura 10 se muestran algunas grietas y fracturas, desarrolladas en la cercanía de pozos productores de vapor del campo geotérmico de Cerro Prieto.



Figura 10. Fracturas generales por el temblor de Victoria del 8 junio de 1980 en la zona de pozos de extracción de vapor, en el campo geotérmico de Cerro Prieto.

En ninguno de los tres sismos estudiados las estructuras generadas por licuefacción se alinean en la dirección de las fallas Imperial y Cerro Prieto. Cobo (1980) identificó tendencias preferentes de fracturamiento hacia NW, NE y E-W. De éstas, los grupos de fracturas orientadas NE y E-W podrían ser de carácter tectónico. Se encontraron evidencias de debilitamiento del terreno en la zona, en donde Cobo (1980), reportó la existencia de grietas y fracturas de origen tectónico, aunque este debilitamiento también puede ser asociado a la extracción cercana de vapor y a la remoción de tierra para la construcción de canales no revestidos.

De acuerdo con la información recopilada, con las observaciones de campo realizadas después de los sismos de 1979 y 1980, se infiere que las dos fallas presentan un comportamiento diferente. Después del temblor de 1940, la Falla Imperial mostró rompimiento superficial de orientación NW-SE, dirigido desde la zona del epicentro al sur de El Centro California, hacia los límites del actual Ejido Tamaulipas (antes Cuapá), en el Valle de Mexicali. En contraste, el temblor de 1979, con localización epicentral en la zona de aeropuerto en el Valle de Mexicali, tuvo una propagación de ruptura de sur a norte. Por su parte, y no obstante que su magnitud fue menor, el temblor de Victoria de 1980, asociado a la Falla Cerro Prieto generó aceleraciones más altas, pero no tuvo manifestaciones superficiales. Lo que es común en los tres sismos es el proceso de licuefacción derivado de las aceleraciones del terreno, aunque fueron diferentes para cada una (Munguía, 1983). Los daños materiales en la región urbana y agrícola de Mexicali-Imperial también fueron diferentes.

CONCLUSIONES

La región que comprende a los valles de Mexicali-Imperial se encuentra en un graben relleno por sedimentos que fueron depositados en un ambiente de delta. Las fallas sísmogenéticas más importantes son Cerro Prieto e Imperial, que son fallas de rumbo con movimiento relativo lateral derecho de orientación N 40 W y marcan los límites occidental y oriental del centro de dispersión Cerro Prieto.

La zona del Valle de Mexicali-Imperial ha sufrido los efectos de tres temblores de magnitud 6.1, 6.6, y 7.1 en los últimos 55 años. Se sabe de la ocurrencia de otros eventos de mayor magnitud, pero su ubicación epicentral es incierta.

Después de la ocurrencia de los temblores de El Centro en 1940, Imperial en 1979 y Victoria en 1980, según se observó en la región del Mexicali-Imperial, se produjo licuefacción y formación de volcanes de arena, así como fracturas y grietas en las zonas donde el terreno ha sufrido debilitamiento por la construcción de obras civiles. El fracturamiento desarrollado tiende a ser paralelo a los canales de irrigación, mientras que la distribución de los volcanes de arena es aleatoria y parece estar en función directa de la profundidad del nivel freático, de la distribución y tipo de sedimentos y de su grado de saturación.

Las estructuras asociadas al proceso de licuefacción fueron más abundantes en los temblores de 1940 y 1980 que en el de 1979. Esto parece relacionarse con las aceleraciones y velocidades inducidas por los sismos, que fueron más altas para los temblores de 1940 y 1980, mientras que para el de 1979, los valores fueron ligeramente mayores a la mínima requerida para producir licuefacción. Así, al parecer, la magnitud mínima necesaria para que haya licuefacción es $M > 5$, magnitud capaz de inducir aceleraciones verticales y horizontales de 1.5 g y 0.6 g, respectivamente.

Para la región del Valle de Mexicali-Imperial se estima que los temblores de magnitud igual o mayor a 6, que generen aceleraciones del terreno mayores a 1 g en el sentido vertical, de 0.3 g en el horizontal y velocidades mayores a 34 cm/s, son potencialmente capaces de romper el equilibrio en los sedimentos someros y producir fluidización.

Finalmente, en la región del Valle de Mexicali-Imperial se conjugan dos aspectos que deben considerarse para efectos de edificación y desarrollo urbano: a) la incidencia de sismos cuya magnitud es igual o mayor a 6 y su posible periodo de recurrencia de aproximadamente cada 30 años (Frez y Frías-Camacho, 1998); b) el suelo y subsuelo reúnen las propiedades sedimentológicas y físicas para producir licuefacción inducida por sismos y afectar de forma directa a las obras civiles.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece los arbitrajes y las atinadas sugerencias de Héctor Romero y Luis Delgado. Sus críticas y recomendaciones fueron de gran utilidad para mejorar este trabajo. De igual manera se agradece a Victor M. Frías Camacho todo su apoyo y ayuda en la elaboración del material gráfico y presentación del presente trabajo así como a José de Jesús Mojarro por su ayuda en la preparación del material fotográfico.

REFERENCIAS

- Anderson, J., and Bodin, P., 1987, Earthquake recurrence models and historical seismicity in the Mexicali-Imperial Valley, Bulletin Seismological Society of America, V. 77, 562-578.
- Barnard, F. L., 1968, Structural Geology at the Sierra de los Cucapas, Northeastern Baja California, México and Imperial County, California, PhD Thesis, Dept. of Geology, University of Colorado, 157 pp.
- Brune, N. J., Vernon III, F.L., Simons, R. S., Prince, J., y Mena, E., 1982; Strong-motion data recorded in México during the main shock. En: the Imperial Valley, California, Earthquake of October 15, 1979, United States Geological Survey Professional Paper 1254, p. 319-350.
- Cobo, J. M., 1980, Informe del levantamiento de manantiales y fracturas ocasionadas por el sismo del día 8 de Junio de 1980. Informe, Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto, Mexicali B.C. Comisión Federal de Electricidad 12 pp.
- Chávez, D., González, J., Reyes, A., Medina, M., Duarte, C., Brune, J.L., Simons, R., Hutton, L.K., German, P.T., and Johnson, C.L., 1982, Main shock location and magnitude determination using combined U.S. and Mexican data: en: The Imperial Valley California Earthquake of October 15, 1979, U.S. Geological Survey, Professional Paper 1254, 51-55.
- Elders, W.A., Rex, W., Meidan, T., Robinson, P.T., and Biehler, S., 1972, Crustal spreading in Southern California, Science, 178, 15-24.
- Frez, J., 1982, Main Shock location and fault mechanism, En: J.G. Anderson and R.J. Simons (editores), The Mexicali Valley Earthquake of 9 June 1980, Earthquake Engineering Research Institute Newsletter, 16, 3, 74-76.
- Frez, J. and Gonzalez, J.J., 1989, Sismicidad y mecanismos focales en el Valle de Mexicali-Imperial, Geofísica Internacional, 28, 643-691.
- Frez, J. and González, J.J., 1991, Crustal structure and seismotectonics of Northern Baja California. En: J.P. Dauphin and B. Simoneit (editores) The Gulf and Peninsular Province of the Californias, America Association of Petroleum Geologists Memoir 47, 261-283.
- Frez C., J. y Frías-Camacho, V.M., 1998, Mapas Anuales de sismicidad para la región fronteriza de ambas Californias, GEOS, Vol. 18, No. 2, pp. 112-130.
- González, García, J.J., 1986, Sismotectónica del Valle de Mexicali 1977-1980, Tesis de Maestría en Ciencias Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 164 pp.
- González García, J.J., 1990a, La Falla Imperial en el Valle de Mexicali a 50 años del Temblor Imperial, magnitud Richter 7.0 del 18 de Mayo de 1940, Comunicaciones Académicas CICESE, CISIT9003, 37 pp.
- González García, J.J., 1990b, La Falla Imperial en el Valle de Mexicali, Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, No. 40, 35-46.
- Lomnitz, C., Mooser, F., Allen, C.R., Brune, J.N., and Thatcher, W., 1970, Seismicity and tectonics of the Northern Gulf of California region, México, preliminary results, Geofísica Internacional, 10, 37-48.
- Muir, S.G. and Scott, R.F., 1982, Earthquake-generated sand blows formed during the main shock. En: The Imperial Valley California Earthquake of October 15 1979. U.S. Geological Survey, Professional Paper 1254, 247-250.
- Muller, K.J. and Rockwell, T.K., 1991, Late Quaternary structural evolution of the Western margin of the Sierra Cucapa, Northern Baja California. En: J.Paul Dauphin and Bernd R.T. Simoneit (editores), The Gulf and Peninsular Province of the California, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, 249-260.
- Munguía-Orozco, L., 1983, Strong ground Motion and source mechanism studies in the Northern Baja California- Southern California region. PhD Thesis in Earth Science, University of California San Diego, 152pp.
- Seed, H.B., 1979b, Soil liquefaction and cyclic mobility for level ground during earthquakes, Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineering, 105, 201-255.
- Sharp, R.V., 1982, Surface rupture observed at the Ejido Saltillo Baja California, after the Mexicali Earthquake of 9 June 1980. En J.G. Anderson and R.S. Simons (editores), The Mexicali Valley Earthquake of 9 June 1980, Earthquake Engineering Research Institute, Newsletter, 16, 94-98.

- Strand, C.L., 1980, Pre-1900 earthquakes of Baja California and San Diego County, M. Sc Thesis, Geology Dept. San Diego State University, 320 pp.
- Simons, R. 1982 The strong motion record from station Victoria. En J.G. Anderson and R.S. Simons editores, The Mexicali Valley Earthquake of 9 June 1980, Earthquake Engineering Research Institute, Newsletter, 16, No.3, p 79-83
- Suárez, F., Sieh, K.E. and Elders, W.E., 1982, A review of geological effects and damage distribution of the June 9, 1980, Mexicali Valley Earthquake. En J.G., Anderson and R.S. Simons (editores), The Mexicali Valley Earthquake of 9 June 1980, Earthquake Engineering Research Institute Newsletter, 16, 99-105.
- Sylvester, A.G., 1979, Earthquake damage in Imperial Valley California, May 18, 1940 as reported by T.A. Clark, Bulletin of the Seismological Society of America, 69, 547-568.
- Ulrich, F.P., 1941, The Imperial Valley Earthquake of 1940, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 31, No. 1, 13-31.
- Wong, V., Frez, J. and Suárez, F. 1997, The Victoria, México, Earthquake of June 9, 1980, Geofísica Internacional, 36, 139-159.
- Youd, T.L. and Wiecezorek, G.F., 1982, Liquefaction and secondary ground failure. En: The Imperial Valley California Earthquake of October 15, 1979, U.S. Geoplogical Survey Professional Paper 1254, 223-246.