



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Metodología para la evaluación del peligro
por licuación del suelo, inducido por sismo,
usando un sistema de información
geográfica**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

PRESENTA:

Diana Calipse Rosado Viurques

Tutor:

Dr. Eduardo Reinoso Angulo

Enero 2010



A mis padres por todas esas conversaciones que me inspiran para seguir alcanzando mis metas.
Gracias por apoyarme incondicionalmente.

A mis hermanas (Atenea, Avril y Ariadna), por hacerme reír en los momentos más inesperados, por confiar en mí y por enseñarme que no importa cuántas complicaciones hay en el camino, siempre se puede seguir adelante.

Es importante agradecer a todos aquellos que directa o indirectamente han contribuido a terminar éste trabajo y también a quienes de alguna manera han sido parte de mi vida.

A mis padres por todo el apoyo, las críticas y buenos momentos.

A mis hermanas por ser pacientes y dejarme hablar todo lo que quiero, por acompañarme en las noches en que trabajaba en esta tesis, por los sueños que comparten conmigo.

A mi familia por estar ahí siempre que los necesito, por apoyarme en todo momento y sobre todo por confiar en mí.

A Aliskair Anguiano por toda esa paciencia y los buenos ratos que pasamos en la facultad, por hacerme pensar en todo lo que me espera y por la amistad que tenemos.

A Paola Guevara, Pablo Reyes y Astrid López, cinco años desde que iniciamos esta aventura juntos y siguen ahí, porque la amistad no solo es para los buenos momentos, gracias por estar también en los malos y por todas las críticas, al final siempre ayudan.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería (José Luis, Ana, Diego, Pablo, María, Itzel, Rocio, Manuel y todos los que no menciono aquí) me enseñaron mucho sobre el significado de la amistad. Con ustedes aprendí a ser ingeniero.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería (Ricardo Carlos, Orlando Fabela y Sandra Quiroga), mucho de este trabajo se lo debo a su apoyo.

A los doctores Eduardo Reinoso, Miguel Ángel Jaimes y Mauro Niño por confiar en mí, por toda la paciencia para aclarar mis dudas y por contribuir de alguna manera en la creación de este trabajo.

A mis sinodales, Ing. Enrique del Valle, Ing. Luis Arturo Tapia, M.C. Javier Lermo y Dr. Martín Cárdenas por sus comentarios para este trabajo de tesis.

A la Facultad de Ingeniería por otorgarme las herramientas necesarias para emprender el nuevo camino que me espera.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi Alma Mater y darme la oportunidad de formarme como ingeniero.

Índice General

Índice de figuras	3
Índice de tablas	6
Resumen	7
Introducción	8

Capítulo 1 Licuación del suelo

1.1 ¿Por qué, cómo y cuándo ocurre la licuación del suelo?	12
1.1.1 Definición	12
1.1.2 Proceso de licuación	13
1.2 Factores que intervienen en la licuación del suelo	15
1.2.1 Factores geotécnicos y geológicos	15
1.2.2 Factores sísmicos	17
1.3 Efectos de la licuación del suelo	20
1.3.1 Falla de flujo	20
1.3.2 Desplazamiento lateral	20
1.3.3 Oscilaciones horizontales	20
1.3.4 Volcanes de arena o sismitas	21

Capítulo 2 Casos de licuación del suelo por sismo

2.1 En el mundo	22
2.1.1 Kobe (1995)	22
2.1.2 Northridge (1994)	26
2.1.3 Kocaeli (1999)	29
2.2 En México	32
2.2.1 Colima, sismo de Tecomán (2003)	33
2.2.2 Tlaxcala, sismo de Tehuacán (1999)	37
2.3 Otros casos menos documentados	40

Capítulo 3 Métodos existentes para evaluar el peligro por licuación del suelo por sismo

3.1 Índice máximo de licuación	46
3.2 Método propuesto por Youd y Perkins	49
3.2.1 Mapa de fallamiento del suelo	49
3.2.2 Mapa de susceptibilidad a presentar agrietamientos y/o asentamientos	51
3.3 Método simplificado de Seed e Idriss	52
3.4 Velocidad de onda de corte	54

Capítulo 4 Ejemplo de aplicación simplificada del cálculo del peligro de licuación por sismo en la República Mexicana, empleando un SIG

4.1 Definición de SIG	57
4.2 Condiciones sismo-tectónicas de la República Mexicana	58
4.3 Metodología para la obtención de mapas de peligro por licuación del suelo	59

Capítulo 5
El caso particular de Manzanillo, Colima

5.1 Ubicación del municipio de Manzanillo en el estado de Colima	77
5.2 Geología y geotecnia	78
5.3 Características sismo-tectónicas	79
5.4 Licuación del suelo en Manzanillo	82
5.4.1 1995	82
5.4.2 2003	82
5.5 Análisis de mapas generados	83
Conclusiones	90
Recomendaciones para futuras investigaciones	91
Referencias	92

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 Estado de esfuerzos entre partículas antes de la aplicación de carga cíclica	14
Figura 1.2 Estado de las partículas durante y después de la aplicación de una carga cíclica	14
Figura 1.3 Acelerograma del sismo de Tecomán, Colima	19

Capítulo 2

Figura 2.1 Distancia del epicentro a la ciudad de Kobe	24
Figura 2.2 Daños debidos a licuación de suelo en el puerto de Kobe, Japón	25
Figura 2.3 Daños debidos a licuación del suelo en el puerto de Kobe, Japón	25
Figura 2.4 Mapa de velocidades pico del suelo (cm/s) durante el sismo de Northridge, 1994. Área de Los Ángeles y Valle de Santa Mónica	26
Figura 2.5 Distribución de daños por licuación durante el sismo de Northridge	27
Figura 2.6 Distribución de tuberías rotas por licuación durante el sismo de Northridge, 1994	28
Figura 2.7 Densidad sísmica de la zona del Mar Mediterráneo y de Turquía	29
Figura 2.8 LSI calculado en un SIG para la ciudad de Sakarya	30
Figura 2.9 Comparación de los datos obtenidos del LSI calculado en un SIG y la distribución de daños después del sismo de Kocaeli para la ciudad de Sakarya	31
Figura 2.10 Límites y velocidades de desplazamiento (aproximados) entre placas	32
Figura 2.11 Mapa de regionalización sísmica, tomando en cuenta valores de aceleración máxima del suelo	33
Figura 2.12 Localización del sismo de Tecomán (2003)	35
Figura 2.13 Geología de la zona de Manzanillo, Colima	35
Figura 2.14 Mapa comparativo de zonas que presentaron licuación de arenas durante los sismos de Manzanillo (1995) y Tecomán (2003)	36
Figura 2.15 Hundimiento de piso en Villa de Álvarez, Colima	37
Figura 2.16 Desplazamiento lateral en el puerto de Manzanillo	37
Figura 2.17 Localización focal del sismo de Tehuacán	38
Figura 2.18 Geología de la región del Altiplano de Tlaxcala	38
Figura 2.19 Evidencia de licuación de arenas en un sembradío del Altiplano de Tlaxcala	39
Figura 2.20 Representación gráfica de los lugares en donde se ha registrado licuación de suelo, de acuerdo a la bibliografía	40
Figura 2.21 Geología del área de Chiapa de Corzo	41
Figura 2.22 Geología del Valle de Mexicali	42
Figura 2.23 Geología del área de Lázaro Cárdenas	43
Figura 2.24 Litología del área de Jaluco y Manzanillo	44

Capítulo 3

Figura 3.1 Decaimiento del LSI conforme aumenta la distancia al epicentro	47
Figura 3.2 Variación de los esfuerzos de cizalla con la profundidad	53
Figura 3.3 Rango de valores de γ_e para diferentes tipos de suelos	54

Capítulo 4

Figura 4.1 Sismos con magnitud 5.0 o más en México	59
Figura 4.2 Fases para la obtención de mapas de peligro por licuación del suelo debido a un sismo	60
Figura 4.3 Mapa de municipios en los que se ha presentado licuación del suelo	61
Figura 4.4a Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona de Mexicali	66
Figura 4.4b Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M= 7.05	67
Figura 4.4c Zonas susceptibles a licuación en el estado de Baja California	67
Figura 4.5 a Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M= 6.01	68
Figura 4.5 b Zonas susceptibles a licuación en el estado de Baja California para un evento de M= 6.01	68
Figura 4.6 a Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona sur de Jalisco	69
Figura 4.6 b Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M= 8.05	70
Figura 4.6 c Zonas susceptibles a licuación obtenidos de la intersección de litologías, aceleraciones mayores a 0.15 de g	70
Figura 4.7 a Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona de Colima	71
Figura 4.7 b Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M=7.58	71
Figura 4.7 c Zonas susceptibles a licuación	72
Figura 4.8 a Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona de Michoacán	73
Figura 4.8 b Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M= 6.65	74
Figura 4.8 c Zonas susceptibles a licuación	74
Figura 4.9 Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona de Tlaxcala	75
Figura 4.10 Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona centro de Chiapas	76

Capítulo 5

Figura 5.1 Localización geográfica de Manzanillo, Colima	77
Figura 5.2 Límites de la placa de Cocos obtenidos a partir de Batimetría	79
Figura 5.3 Modelo de la placa de Cocos subduciendo bajo la Norteamericana frente a las costas del estado de Colima	80
Figura 5.4 Límites del bloque de Jalisco	81
Figura 5.5 Litología del área de la Bahía de Manzanillo	84
Figura 5.6a Mapa de pendientes y litología susceptible a licuación en el área de la Bahía de Manzanillo	85
Figura 5.6b Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M= 7.82	85
Figura 5.6c Zonas susceptibles a licuación	86
Figura 5.7a Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M= 7.82	87
Figura 5.7b Zonas susceptibles a licuación	87
Figura 5.8a Localización de la zona de estudio mencionada en reporte de ERN (2009)	88
Figura 5.8b Comparación con los resultados obtenidos en la figura 5.7b.	89

Índice de tablas

Capítulo 2

Tabla 2.1 Sismos que provocaron licuación de arenas en Japón de 1872 a 1965.	23
Tabla 2.2 Geología en el área de los Ángeles y los Valles de San Fernando y Santa Mónica	27
Tabla 2.3. Sismos ocurridos en la región de Colima y Jalisco, 1900-2003	34

Capítulo 3

Tabla 3.1 Influencia de varios factores en la susceptibilidad de licuación, L, y la deformación permanente del suelo, X	48
Tabla 3.2 Susceptibilidad de suelos a sufrir licuación de arenas acorde a Youd y Perkins (1978)	51

Capítulo 4

Tabla 4.1 Datos de casos de licuación del suelo en la República Mexicana	62
Tabla 4.2. Susceptibilidad de suelos a sufrir licuación	64
Tabla 4.3 Contenido de finos y composición de rocas de las que se tiene registro en la base de datos empleada	65
Tabla 4.4 Clasificación de arenas de acuerdo al tamaño de partícula y condiciones necesarias para que ocurra el fenómeno de licuación de arenas	65
Tabla 4.5 Litología referida en la base de datos e ID	65

Resumen

En el desarrollo de este trabajo se realizó un mapa de peligro por licuación de suelos inducido por sismos en algunas zonas de la República Mexicana. La estimación del peligro se lleva a cabo mediante la obtención de mapas de características geológicas, topográficas y de aceleración pico del terreno. El énfasis se hace en las aceleraciones del terreno y en la información histórica, debido a los casos de re-licuación del terreno. Se muestran los resultados de un análisis especial de la zona de Manzanillo, afectada por los sismos de Manzanillo (1995) y Tecomán (2003). Se muestran, mapas finales de zonas de diferentes estados de la República Mexicana donde se ha presentado licuación (Chiapas, Baja California, Tlaxcala y Michoacán) y donde se conjugan ciertos factores que permiten esto.

Introducción

Quizá uno de los fenómenos más destructivos y notorios durante un sismo es la licuación del suelo. El asentamiento de éste y los 'volcanes' de arena son manifestaciones de dicho fenómeno y se hacen presentes debido al movimiento de las partículas por la incidencia de ondas sísmicas en estratos de arenas no consolidadas.

La licuación del suelo ocurre debido a la pérdida de resistencia al esfuerzo cortante durante un sismo. Se sabe que la magnitud del desastre es proporcional a la distancia al foco, la magnitud del evento (*Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, 1993, Youd y Perkins 1978 y Ambraseys 1991*) y la duración de éste, además de tener en cuenta características propias del lugar, tales como permeabilidad y consolidación del estrato o cercanía entre el nivel freático y el estrato de depósitos granulares sueltos. Por ello, desde principios del siglo XX se ha estudiado la licuación del suelo.

El primer registro oficial de este fenómeno se dio con el sismo de San Francisco (1906), pero no fue sino hasta los años 30's cuando Arthur Casagrande realizó investigaciones para explicar lo que sucedía con los estratos de arenas no consolidadas durante un sismo.

Debido al carácter destructor del fenómeno, cada vez son más los autores que se enfocan en tratar de predecir las zonas en las que se puede presentar. Los estudios sobre licuación del suelo tienen como base el conocimiento de la sismicidad, geología y geotecnia del lugar de interés. A continuación se hablara de los conceptos más básicos de sismicidad y peligro sísmico, El último concepto es introducido recordando que es el objetivo de este trabajo; hacer un cálculo del peligro por licuación del suelo debido a un sismo.

En el caso de México, este fenómeno se ha hecho evidente ante la incidencia de sismos como el de Manzanillo (1995) o el de Tecmán (2003), dejando una serie de daños considerables en la infraestructura. De ahí la necesidad de encontrar una metodología para localizar zonas susceptibles a este fenómeno, con el fin de prever daños y pérdidas materiales y humanas, además de ayudar en la planeación urbana.

Sismicidad

Los sismos son provocados por el movimiento entre placas tectónicas que forman la corteza terrestre. Referente a México y el resto de Latinoamérica, las placas que interactúan en la región son las de Norteamérica, Rivera, Cocos, del Caribe, Nazca, Sudamericana, Scotia y Antártica.

Cada placa tiene actividad diferente con las placas colindantes. Un tipo de actividad entre placas es aquella en la que chocan dos placas con desplazamiento contrario, provocando fuerzas de fricción y deformaciones. Al deformarse las placas se acumula energía, sin embargo, llega el momento en que la fricción no soporta la fuerza de deformación, rompiéndose el equilibrio y liberándose energía en forma de ondas, lo que comúnmente llamamos sismo. Estos son los llamados sismos de subducción. Las zonas de subducción en el planeta abarcan cerca de 55 000 km y generalmente implican actividad volcánica, consecuencia de las altas presiones y temperaturas alcanzadas por la litosfera (placa) que subduce. Debido a su ubicación tectónica, los sismos de subducción son quizá los más comunes en la parte del litoral del Pacífico de México.

Sin embargo, en el planeta no todos los sismos son de subducción. Si hay algún desplazamiento relativo horizontal de las fallas se produce un sismo intraplaca, que como su nombre lo dice, se produce en el interior de una placa.

La sismicidad de un lugar depende de la cercanía a la fuente tectónica. En algunos casos, las instituciones gubernamentales o de investigación de los países ponen a disposición mapas de riesgo y/o peligro sísmico, en donde queda registrada la sismicidad del lugar. Éste tipo de mapas generalmente se publican en códigos de diseño sismoresistente de estructuras, en el caso de México el ejemplo más común de estos mapas y códigos de diseño es el desarrollado por CFE.

Parámetros sísmicos.

Momento sísmico. Propuesto por Aki en 1966, el momento sísmico tiene que ver con el tamaño de la fuente, haciéndolo un parámetro útil para medir el tamaño del evento. Éste parámetro es el producto del coeficiente de rigidez del medio donde se produce el terremoto, el área de la dislocación, y el desplazamiento medio de la misma. En la mayoría de los casos es difícil estimar las dimensiones de la falla, y el momento sísmico se determina a partir del espectro de las ondas sísmicas registradas, (Muñoz, 1989).

Magnitud. Se tienen diferentes tipos de magnitud, dependiendo de la aplicación se pueden calcular:

- Magnitud local (M_L).
- Magnitud de ondas de volumen (m_b)
- Magnitud duración (M_d)
- Magnitud tsunami (M_T)
- Magnitud energía (M_E)

Para efectos de éste trabajo se hablará particularmente de otros dos tipos de magnitud:

1. Magnitud de ondas superficiales (M_s). Válida para sismos de foco superficial, se basa en la amplitud máxima registrada en grupos de ondas Rayleigh con periodos (T) de entre 18 y 22 s. Las correcciones consideran la distancia epicentral y la profundidad del foco:

$$M_s = \text{Log}(A/T) + 1.66\text{Log}\Delta + 3.3$$

Donde A es la amplitud del desplazamiento del suelo en micras y Δ la distancia epicentral en grados, la fórmula anterior es válida para sismos ocurridos entre los 18 y 20° de distancia epicentral y para focos menores a 70 km.

2. Magnitud momento (M_w). La magnitud momento está basada en el momento sísmico (M_0), obtenido a partir de los parámetros que relacionan la geometría de la falla, la profundidad del foco y el desplazamiento máximo durante el evento. El momento sísmico es quizá la medida más consistente de un sismo, dando lugar a la definición de la escala magnitud-momento (Kanamori, 1977):

$$M_w = (2/3)\text{Log}(M_0) - 6.0$$

Donde M_0 se expresa en $N \cdot m$.

Intensidad Es el único parámetro no instrumentado. Se mide en base a las afectaciones sufridas por la población y las estructuras de un área. La escala de medición de intensidad más utilizada en América es la de Mercalli Modificada, mientras en Europa es más común la propuesta por Medvedev, Karnik y Sponheuer.

Aceleración máxima o aceleración pico. Es la aceleración máxima registrada en los acelerogramas obtenidos en un lugar. La aceleración varía de acuerdo al tipo de suelo.

Velocidad máxima. Como su nombre lo dice es la velocidad máxima a la que se desplazan las ondas en un medio.

Peligrosidad Sísmica

La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de excedencia de un movimiento sísmico con duración fija y en un lugar determinado. La definición analítica más común es dada por la United Nations Disaster Relief Organization (*UNDRO, 1982*):

$$H = P[x(s) \geq x_0 | t]$$

Donde H (hazard) es la peligrosidad sísmica, P es la probabilidad de superación de un valor umbral x_0 , s es el lugar y t el tiempo.

La peligrosidad sísmica generalmente depende de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del suelo, por lo cual es muy frecuente encontrarla en función de estos términos, aunque también lo puede estar en función de la intensidad macro sísmica, que se relaciona con la destructividad del evento.

Los métodos de estimación de peligrosidad se dividen en dos grupos:

Deterministas. Asumen que la sismicidad es estacionaria y que el terreno se comportara como lo hizo en eventos pasados, es decir, no se tendrá un sismo mayor a ninguno de los ya registrados. Estiman el límite superior del movimiento, expresado en términos del parámetro elegido, como lo serían el desplazamiento, la velocidad o la aceleración. En la ingeniería sísmica éste tipo de métodos no son comunes por que implican que todas las estructuras de una región presentan la misma peligrosidad, lo cual no es cierto.

Probabilistas. Como su nombre lo dice, emplean la probabilidad como herramienta. Con información de sismos pasados calculan para cada parámetro de interés un periodo de retorno asociado, entendiéndose por periodo de retorno la cantidad de años en que se espera que la intensidad de movimiento alcance el nivel de referencia. A diferencia de los deterministas, consideran los efectos de todos los eventos que pueden afectar un área. A su vez, estos se dividen en paramétricos (se basan en la adopción de un modelo de zonas sismo genéticas) y no paramétricos (emplean funciones de distribución de valores extremos).

Para realizar un buen estudio de peligrosidad sísmica es necesario conocer dos aspectos importantes: la sismicidad regional y las características de atenuación del lugar. Si se combinan estos dos elementos se puede tener una caracterización del movimiento debido a sismos en la zona de estudio, aunque para hacerla más completa se debe tomar en cuenta el tipo de fuente y la forma de propagación de energía. En caso de hacer microzonificación, también se considera la amplificación de las ondas en el lugar.

Los análisis de evaluación del peligro sísmico en las últimas décadas han sido mejorados con la utilización de los datos geológicos que permiten obtener la historia sísmica de las fallas activas. Los registros históricos e instrumentales son sumamente importantes para reflejar precisión en los valores de sismicidad a largo plazo y efectuar correctas evaluaciones del peligro por eventos sísmicos.

México por su ubicación geográfica y tectónica tiene este peligro latente, por eso éste trabajo tiene tres objetivos principales:

1. Crear una herramienta que permita realizar un mapa de peligro por licuación del suelo como consecuencia de la ocurrencia de sismos.
2. Estudiar los métodos propuestos anteriormente para evaluar la susceptibilidad a la licuación de suelos causada por sismos. A partir de ellos elegir el que mejor se adapte a las características geológicas, tectónicas y geotécnicas de la República Mexicana, en caso de que ninguno se adecuó a ellas, proponer la adaptación de alguno.
3. Aplicar dicho método a un modelo, empleando datos de sismos pasados y comparar los resultados con eventos reales como es el caso del sismo de Colima (2001).

Esta tesis ha sido dividida en 5 capítulos de los que se hace un corto resumen a continuación:

En el Capítulo 1 se habla de manera simplificada de lo qué es, cómo y por qué se presenta la licuación del suelo. Se explican conceptos básicos que los autores de artículos relacionados con el tema manejan de manera común. Para finalizar el capítulo se exponen las consecuencias de éste fenómeno.

El Capítulo 2 es un repaso de los casos de licuación del suelo más conocidos y estudiados en el mundo, Kobe (1995) y Northridge (1994). Además se incluye un breve resumen de los casos registrados en México.

En el Capítulo 3 se mencionan algunos de los métodos más conocidos para evaluar el peligro por licuación, desde los propuestos por *Youd y Perkins (1978)* o *Seed e Idriss (1971)* hasta el más actual aunque no más común en el que se emplea la velocidad de ondas de corte.

El Capítulo 4 es la base de esta tesis, un mapa de peligro por licuación del suelo para ciertas zonas de la República Mexicana, se toman como parámetros la aceleración y pendientes del terreno, además de la geología.

Para el Capítulo 5 se hace un estudio detallado de la zona de Manzanillo, Colima en el que se comparan los resultados con los sitios en los que se ha presentado licuación en el mismo municipio.

Los resultados se discuten en el capítulo posterior, para finalizar con las conclusiones.

Capítulo 1

Licuación del suelo

1.1 ¿Porqué, cómo y cuándo ocurre el fenómeno de licuación?

1.1.1 Definición

Para entender el proceso de licuación del suelo, es necesario definir dicho fenómeno. Se entiende por licuación la pérdida de esfuerzo en un suelo no cohesivo saturado debido a la acumulación de presiones de agua de poro durante una carga cíclica. Una definición más precisa es la dada por Terzaghi en 1950:

“El arreglo de las partículas de una arena fina o de un limo grueso puede ser tan inestable que una ligera perturbación del equilibrio de los granos ocasiona un rearrreglo de las partículas; en consecuencia las partículas se asientan en posiciones más estables y la porosidad del sedimento decrece.

Cuando ocurre este proceso arriba del nivel freático, no tiene más efecto notable que el generar asentamientos en la superficie del terreno. Opuestamente, de ocurrir bajo el nivel freático sus consecuencias pueden ser catastróficas, ya que la viscosidad del agua que ocupa los vacíos de la arena impide un decremento rápido de la porosidad.”

La licuación es el resultado de la tendencia de los suelos a disminuir su volumen cuando han sido sometidos a una carga cíclica. En suelos no cohesivos, la transformación de un estado sólido a líquido es consecuencia del aumento de la presión de poro que disminuye el coeficiente de fricción durante un terremoto.

De manera más general, diversos autores han definido la licuación como la transformación de *“un estado sólido a un estado líquido como consecuencia del aumento en la presión de poro y la reducción de la presión efectiva de la masa del suelo”*. Por lo tanto, la carga soportada inicialmente en dirección vertical por los puntos de contacto, es ahora soportada por el agua que ocupa los vacíos en el suelo. De esta manera, el suelo pierde su resistencia y se comporta como un fluido.

Existen diferentes métodos para estimar el potencial de licuación, de ellos se hablará más adelante en el Capítulo 3. Un ejemplo es el método japonés para evaluar el potencial de licuación que se basa en el cálculo del Factor de Seguridad contra Licuación:

$$F_L = \frac{R}{I} \quad 1.1$$

Donde R es el radio de esfuerzo cíclico del suelo y L es el radio del esfuerzo cíclico de cizalla inducido en el suelo durante el sismo.

- Si $R/L = 1$, ocurrirá el fenómeno de licuación.
- Si $R/L \neq 1$, no ocurrirá el fenómeno de licuación.

Para terminar de complementar la definición del fenómeno de licuación, es necesario hacer referencia a la expresión de la resistencia al esfuerzo cortante de la arena, propuesta por Coulomb en 1776 y modificada por Terzaghi en 1925, quien tuvo en cuenta por primera vez, la influencia trascendental del agua contenida en el suelo.

$$\tau = (\sigma - u) \tan \varphi = \sigma_v' \tan \varphi \quad 1.2$$

Donde σ es el esfuerzo total, u es la presión de poro, σ_v' es el esfuerzo efectivo y φ es el ángulo de fricción interna del material.

En otros términos, la licuación se ha expresado como:

- Si $u = \sigma_v'$, la relación del exceso de presión de poros llega a ser $\frac{u}{\sigma_v'} = 1.0$, el fenómeno de licuación se desarrolla.
- Si $u = 0$, la relación del exceso de presión de poros llega a ser $\frac{u}{\sigma_v'} = 0$, el fenómeno de licuación no se desarrolla.

1.1.2 Proceso de licuación

Este es un fenómeno complejo, aún no es muy claro y bien comprendido cómo ocurre, por lo que se tienen diferentes interpretaciones. Sin embargo, una manera simple de describirlo es la siguiente:

Un depósito de suelo consiste en un grupo de partículas individuales, cada una de ellas se encuentra en contacto con otras circundantes. Las partículas apoyadas entres sí producen fuerzas de contacto que las mantienen juntas y en su lugar, derivando en la estabilidad del suelo y proporcionándole resistencia, (figura 1.1).

Si se tiene un grupo de partículas de suelo no cohesivo, suelto y saturado, y se le aplica una carga violenta se genera la ruptura de su estructura. Al deteriorarse la estructura, las partículas se mueven libremente buscando la manera de formar una estructura más densa.

Durante un sismo la aplicación de la carga es rápida y espontánea, no se da tiempo a que la estructura se reacomode lentamente y se expulse el agua contenida en los poros. Esto se ve acompañado de un incremento en la presión del agua (provocando la reducción de fricción entre partículas), al grado en que el suelo comienza a ablandarse y perder resistencia.

Las fuerzas de contacto entre partículas se vuelven mínimas debido sobre todo a la alta presión del agua. En casos extremos, la presión de agua es tan grande que las partículas se ven separadas y comienzan a moverse libremente en ésta, comportándose como un líquido viscoso más que como sólido (figura 1.2).

Antes de un terremoto, la presión del agua es relativamente baja. Al ocurrir un sismo, la presión del agua puede ser tan grande, que como se mencionó previamente, las partículas tengan la libertad de moverse, para posteriormente reacomodarse de manera estable (figura 1.2). Actividades como voladuras o aquellas relacionadas con vibraciones del suelo también pueden generar un aumento en la presión del agua y por lo tanto fallamiento de éste (Ambraseys y Sarma, 1969, Alberro y Hernández, 2002).

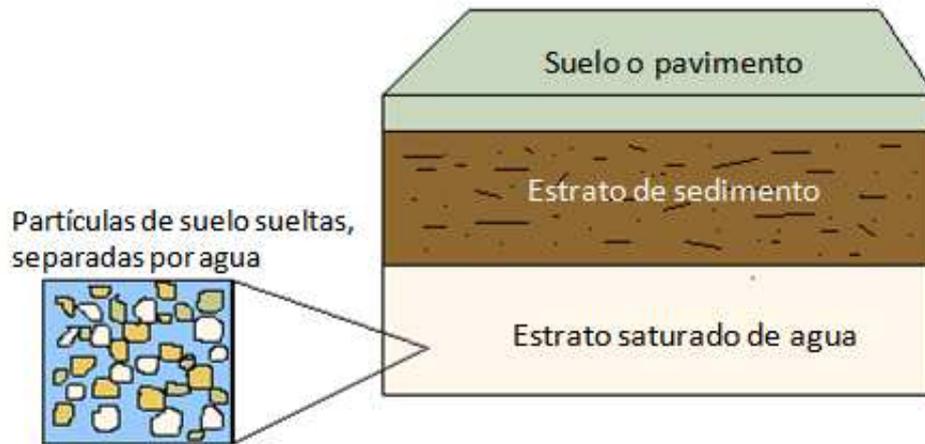


Figura 1.1. Estado de esfuerzos entre partículas antes de la aplicación de carga cíclica

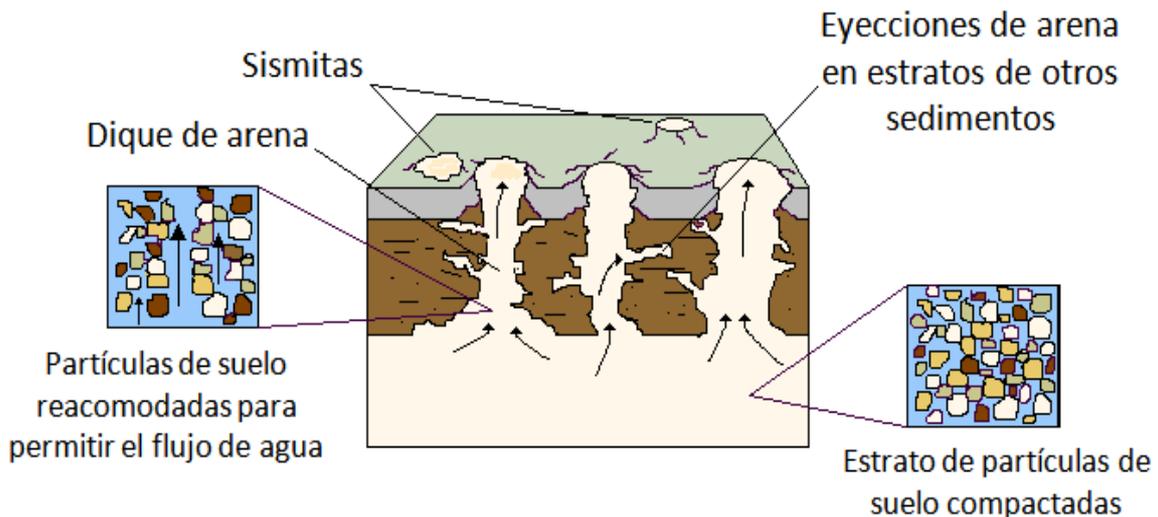


Figura 1.2. Estado de las partículas durante y después de la aplicación de una carga cíclica

1.2 Factores que intervienen en la licuación del suelo

Acorde con *Youd (1984)*, la licuación ocurre a menudo en el mismo lugar donde ya se ha presentado, cuando las condiciones del suelo y de agua han permanecido similares por determinado tiempo. Investigaciones en lugares como Kobe, Japón o Manzanillo, México han proporcionado evidencia de la recurrencia de este fenómeno, lo cual ha permitido la elaboración de mapas de sitios donde la susceptibilidad de licuación puede ser alta por este factor, como ejemplo encontramos los realizados por *Power y Holzer (1996)* para Estados Unidos.

Los depósitos de suelos recientes, con el nivel de aguas freáticas (NAF) muy superficial tienen un mayor riesgo de licuarse. La licuación generalmente ocurre en depósitos granulares del Holoceno al Pleistoceno donde el nivel de agua está a menos de 15 m de profundidad. El NAF tendrá un papel importante, pues de él depende el nivel de saturación y por lo tanto, afecta los esfuerzos efectivos.

1.2.1 Factores geotécnicos y geológicos

Los factores más importantes en la respuesta del suelo son el material o materiales preexistentes en la zona, su composición, su gradación, su contenido de finos y la forma de sus partículas. Estas características son conocidas como factores geológicos o geotécnicos, importantes para el estudio de la licuación del suelo.

a) Composición del suelo

La acción del hombre altera significativamente las condiciones del medio al realizar excavaciones o aplicación de carga al terreno. Entonces, la respuesta del terreno frente a un sismo se ve modificada por esas intervenciones.

Desde el punto de vista de la ingeniería geológica, el suelo se define como un agregado de minerales unidos por fuerzas débiles de contacto, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación en agua (*González et al, 2002*).

La cantidad de finos contenida en el suelo es otro factor que interviene en el potencial de licuación, cuando se tienen suelos con un contenido de entre 3 y 8 % de finos hay una disminución del número de contactos interpartícula, por lo que disminuye la resistencia del suelo al esfuerzo cortante. Aunque, si se aumenta el contenido de este tipo de materiales, se llegara a un punto en el que la cantidad de finos impida el acomodamiento de las partículas gruesas para formar una estructura más densa y el contacto interpartícula será el adecuado como para resistir la aplicación de una carga cíclica (carga sísmica), la influencia de la cantidad de materiales finos y la granulometría de un suelo en la licuación de éste, es explicada de una manera breve por *Seed, et al. (1971)*.

b) Distribución granulométrica

Las arenas finas uniformemente graduadas, tienen mayor probabilidad de licuarse que las arenas gruesas. Esto por que la permeabilidad de las arenas gruesas es más grande que la de arenas finas, la presión de poro desarrollada durante las vibraciones se disipa más fácilmente en arenas gruesas que en arenas finas. Lo que reduce el potencial de licuación de las arenas gruesas.

c) Permeabilidad

Quando el agua de poro se mueve entre los canales de un depósito licuable, dicho movimiento se ve retrasado si el suelo es poco permeable. En consecuencia, suelos con un contenido de finos determinado (3-8%) son más susceptibles a la licuación por que inhiben el drenaje del exceso de presiones de poro. Los suelos arcillosos menos permeables pueden impedir la rápida disipación del exceso de presión de poro generada por un depósito de arenas saturadas cercano.

d) Relación de vacíos y Densidad relativa

Ovando (1986), menciona que si el comportamiento de un material puede ser descrito por su relación esfuerzo – tensión, el radio de vacío es una de las propiedades escalares que mejor puede relacionar el invariante entre estas dos cantidades tensoriales, sin embargo, éste no provee ninguna información de la dirección o sentido de esta relación. Se sabe que si la relación de vacíos es menor, la susceptibilidad de un suelo a licuarse disminuye. Además, La relación de vacíos influye en la saturación del suelo, teniendo que la saturación de un suelo se define como:

$$S = \frac{\text{Volumen de fluidos}}{\text{Volumen de huecos}} \quad \text{e) 1.3}$$

Empleando la porosidad:

$$\eta = \frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Volumen total}} = \frac{e}{1 + e} \quad \text{f) 1.4}$$

el volumen específico:

$$v = 1 + e \quad \text{g) 1.5}$$

Si la cantidad de huecos en el terreno es nula y estos se encuentran llenos de líquidos, se dice que el terreno está saturado. El índice de vacíos mide la ‘esponjosidad’ del esqueleto sólido y, por lo tanto, debe estar relacionado con la resistencia del suelo. *‘Es así posible imaginar un grado máximo de compacidad para el que el índice de vacíos tome un valor mínimo (e_{\min}) y un grado mínimo de compacidad correspondiente al valor máximo del índice de huecos (e_{\max}). De esta forma la situación real de un suelo puede medirse respecto a estos estados con el valor de la llamada densidad relativa (D_r):*

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad \text{h) 1.6}$$

Un valor D_r próximo a cero indica que el empaquetado es muy flojo, mientras que los valores próximos a la unidad indican suelos densos.’(Alarcón, 1989). Para éste caso importan los suelos con densidad relativa cercana a la unidad.

i) Forma de las partículas

'La importancia de la forma de las partículas componentes del suelo en la licuación radica en que esta influye en la distribución y orientación de los contactos intergranulares, así como en la magnitud de las fuerzas de fricción interpartícula' (Ovando, 1986) y en la gradación del mismo. Diferentes autores han demostrado que los materiales de partículas angulares y mejor graduados tienen menor potencial de licuación que aquellos que no cumplen con estas características. Por regla general, las arenas fluviales son más angulares que las lacustres y las marinas (Legget, 1964).

j) Fricción entre partículas

La fricción entre partículas no solo depende de la forma y tamaño de estas, sino también de la composición mineralógica de estas, la condición físico química en que se encuentren y de la naturaleza del fluido de poro. Ovando (1986), menciona que *'el ángulo de fricción entre partículas se relaciona directamente con el movimiento de esfuerzos de las arenas'*. Para el caso de licuación de suelos la fricción entre partículas es importante, dado que para que el material se comporte como fluido, la fricción debería ser nula o acercarse a ello.

k) Geometría de los estratos

Después de algunos análisis, Alberro y Hernández (2002), suponen que la geometría de los estratos del subsuelo influye en el comportamiento de éste. Estos autores proponen que al aumentar en un 400% el espesor del estrato superficial aumenta en un 600% el tiempo de respuesta del sistema, es decir, si se aumenta el espesor del manto superficial, se puede retrasar el tiempo que tarda un suelo en licuarse después de un sismo. Ello porque los esfuerzos de tensión se incrementan.

l) Cociente de Poisson

En los suelos saturados sometidos a carga sin drenaje en el corto plazo el cociente de Poisson es exactamente 0.5 (Izquierdo, 2001).

1.2.2 Factores sísmicos

Considerados como riesgos endógenos, es decir, producidos en el interior de la Tierra, los sismos se originan por la acumulación de tensiones de deformación de las capas de la Tierra, siendo liberadas de forma brusca. Se rompen masas de rocas que se encuentran sometidas a grandes presiones y estos materiales se reordenan, con la liberación de energía, que se manifiesta a través del terreno por medio de ondas. El foco de inicio es denominado hipocentro y se puede situar a diferentes profundidades. A partir de este foco, la energía se libera en forma de ondas, que se generan y propagan en todas direcciones de manera concéntrica, llegando al epicentro, que es el punto sobre la vertical más cercana a la superficie, donde llegan con la máxima intensidad. Son especialmente frecuentes cerca de los bordes de las placas tectónicas que constituyen la corteza terrestre o litosfera. Las ondas sísmicas son, por tanto, ondas de propagación, porque transmiten la fuerza que se genera en el foco sísmico hasta el epicentro en proporción a la intensidad y magnitud de cada sismo.

Los datos de estos eventos son registrados mediante instrumentos transductores llamados sismógrafos. Estos datos ayudan a prevenir desastres y comprender el comportamiento del terreno en respuesta a ciertos esfuerzos.

a) Magnitud del movimiento sísmico y aceleración del suelo

Los efectos de la licuación históricamente se han limitado a un radio determinado, marcado desde el epicentro de un sismo. Autores como *Kuribayashi* y *Tatsuoka*, citados por *The Japanese Society of Mechanics and Foundation Engineering* en su Manual para la Zonificación de Riesgo Sísmico y Geotécnico, proponen una correlación entre la distancia epicentral R_e (km) y la magnitud del sismo (M) para casos de licuación observados en Japón. Estos autores concluyen que la ecuación que mejor describe esta correlación es:

$$\log R_e = 0.77 M - 3.60 \tag{1.3}$$

Por su parte, *Youd* y *Perkins* (1978) introducen la idea de la relación entre el radio epicentral y la ocurrencia de licuación para sismos ocurridos en Estados Unidos. Sin embargo, es *Ambraseys* (1991) quien muestra que los efectos de la licuación históricamente se han limitado en una zona a una distancia determinada del epicentro del sismo, aumentando la susceptibilidad con el incremento de la magnitud del movimiento. Llegando a la siguiente ecuación:

$$M_w = -0.31 + 2.65 * 10^{-2} R_e + 0.99 \log(R_e) \tag{1.4}$$

$$M_w = 0.18 + 9.2 * 10^{-2} R_f + 0.90 \log(R_f) \tag{1.5}$$

Donde M_w es la magnitud del momento, R_e corresponde a la distancia epicentral y R_f a la distancia a la falla. De acuerdo a *Ambraseys* (1991), para cada valor de M_w , R_e y R_f , existe una distancia máxima hasta donde puede ocurrir licuación del suelo, con pocas excepciones.

La magnitud del momento (M_w) está relacionada con la magnitud de los esfuerzos y deformaciones a que se somete el suelo. De acuerdo a la distancia epicentral, el movimiento producirá una aceleración en el terreno, la cual puede o no amplificarse dependiendo de las características del lugar hasta llegar a la superficie. Así, las ondas de corte arribaran al lugar produciendo una distribución de esfuerzos en función del tiempo, causando deformación al suelo.

A pesar de que las características del terreno cambian de lugar a lugar, diversos autores han propuesto aceleraciones promedio a las que se presenta la licuación del suelo. Así, *González et al.* (2002) menciona que generalmente para que se dé la licuación del suelo debe presentarse una magnitud de movimiento superior a 5.5 y aceleraciones por arriba de 0.3 g donde g es la aceleración de la gravedad (figura 1.3 en la componente norte - sur), por su parte, *Seed et al.* (1971), proponen un rango de aceleraciones de entre 0.25 y 0.35 g dependiendo de la densidad relativa para arenas con un tamaño promedio de 0.2 mm.

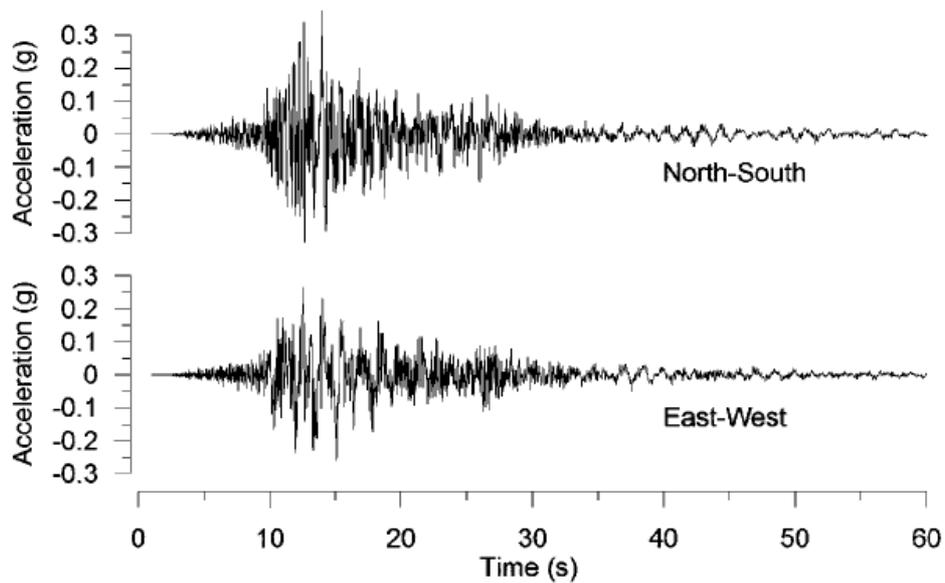


Figura 1.3. Acelerograma del sismo de Tecomán, Colima. Tomada de Wartman et al, 2003.

Jiunn et al. (2006), estudiaron la respuesta de los suelos saturados en un modelo físico usando una caja laminar biaxial en una mesa vibratoria. Midió las aceleraciones a diferentes profundidades durante movimientos a varias amplitudes. Para medir las propiedades del suelo empleó tres métodos, curva de tiempo de trayectoria, curva de amplificación y movimiento de vibración libre, al juntarlas analizó la aceleración para estimar la velocidad efectiva de la onda de corte y el radio de amortiguamiento del suelo. Para la curva de tiempo de viaje obtuvo valores cercanos a 87 m/s. Estos últimos sirvieron para estimar el radio de amortiguamiento, que para casos no licuables fue de entre 4-12%.

Durante éste experimento, se trato de igualar las condiciones de aceleración predominantes durante el sismo de Chi Chi, Taiwán en 1999, se observó que en muchas de las pruebas no se presentó licuación del suelo, pero en los casos en que lo hizo fue con una aceleración mínima de aproximadamente 0.03 g.

b) Duración del movimiento sísmico

Generalmente, la duración de un sismo es de entre 5 y 40 s, sin embargo, si éste se prolonga la condición no drenada se hace predominante, es decir, se restringe la disipación de la presión de poro y por el contrario aumenta, produciendo condiciones de esfuerzo efectivo nulo y, por lo tanto, licuación del suelo.

1.3 Efectos de la licuación del suelo

Hay ocasiones en que la licuación del suelo desencadena una serie de fenómenos destructivos. Se hablará de algunos de ellos a continuación:

1.3.1 Falla de flujo

Los flujos o coladas son movimientos de masas de suelo o bloques rocosos con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua sin presentar superficies de rotura definidas. El agua es el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia a que da lugar en materiales poco cohesivos (*González et al, 2002*).

Flujos de sedimento fluidificado o licuado

Estos flujos ocurren en sedimentos (saturados, no consolidados y no cohesivos) que pierden temporalmente el contacto entre sus granos, es decir, su resistencia, de modo que quedan suspendidos por el fluido de poro, por ende se mueven pendiente abajo (pueden hacerlo en pendientes tan bajas como 3°) como una capa móvil, por acción de la gravedad. Existen tres tipos básicos de desplazamiento:

- Flujos de tierra. Los materiales del suelo en estado licuado se desplazan rápidamente cuesta abajo por acción de la gravedad.
- Flujo lateral. Las capas superficiales del suelo o del sedimento se desplazan lateralmente por pendientes suaves o hacia superficies libres, como márgenes del río.
- Flotación. Los objetos menos pesados que el sedimento licuado flotan en su superficie mientras se desplaza.

1.3.2 Desplazamiento lateral

Este concepto hace referencia al movimiento de bloques rocosos o masas muy coherentes y cementadas sobre material blando y deformable. Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas (entre 0.3° y 3°). Los movimientos son debidos a la pérdida de resistencia del material subyacente, que fluye o se deforma bajo el peso de bloques rígidos, (*González et al, 2002*). Se dan en pendientes suaves y pueden ser de gran extensión, al generarse grietas, volcaduras de estructuras y desplazamientos diferenciales. Este tipo de fallas es el causante de la mayoría de los daños por licuación, la consecuencia más evidente de ella es el daño a tuberías.

1.3.3 Oscilaciones horizontales

Donde el terreno es plano o la pendiente demasiado suave para permitir desplazamientos laterales, la licuación de estratos subyacentes puede causar oscilaciones que no dependen de las capas superficiales. Dichas oscilaciones se manifiestan hacia los lados, arriba y abajo en la forma de ondas de terreno (*EERI, 1994*).

1.3.4 Volcanes de arena o sismitas

Al pasar la onda sísmica, el orden de las partículas cambia y busca un estado más denso. La velocidad del sismo impide la expulsión del agua que se encuentra en los poros provocando el aumento de presión intersticial, lo que lleva a la licuación. Este flujo conlleva eyecciones de arena hacia la superficie, formando volcanes de arena, sand blows, diques clásticos y sills clásticos. Cabe resaltar, que de acuerdo a *Alberro y Hernández (2002)*, para que existan los volcanes de arena debe haber material superficial ligeramente cohesivo, puesto que *'los materiales sin cohesión no permiten que las grietas o conductos permanezcan abiertos bajo los esfuerzos de tensión generados'*.

En ambientes subacuáticos se forman otro tipo de estructuras como laminaciones convolutas.

Capítulo 2

Casos de licuación del suelo por sismo

2.1 En el mundo

La ocurrencia de sismos no tiene las mismas consecuencias en todos los ambientes geológicos. Sin embargo, *Lomnitz (1997)*, habla de la similitud de condiciones geológicas superficiales y los riesgos que conllevan estas en lugares como Kobe, Loma Prieta y México.

Se trata de ambientes transicionales que debieran presentar amplificación de ondas de manera parecida, lo que explica el porqué en los tres lugares se presentó licuación del suelo durante o inmediatamente, después de algún sismo.

A continuación se hablará de algunos casos de licuación del suelo en el mundo y en México.

2.1.1 Kobe (1995)

La ciudad de Kobe ($34^{\circ} 41'N$, $135^{\circ} 10'E$), se encuentra localizada en la prefectura de Hyogo, Japón, siendo uno de los puertos más importantes a nivel mundial. Japón se localiza en el límite de tres placas tectónicas (Placa del Pacífico, Placa Filipina y Placa Euroasiática), por lo que la ciudad está bajo peligro de sufrir sismos de manera constante, poniendo en riesgo a más de un millón y medio de personas que la habitan.

Antes del sismo de 1964 (epicentro en $38^{\circ}21' N$, $139^{\circ}11' E$ y profundidad de 40 km), Japón tenía un historial de este tipo de fenómenos en todo su territorio. *Kuribayashi, et al. (1975)*, hace una recopilación de los sitios donde se presentó licuación del suelo desde 1872 hasta 1965, tabla 2.1.

Para 1965, de acuerdo a *Kuribayashi, et al. (1975)*, diferentes autores ya habían observado re-licuación del suelo en Japón, además de la relación entre este fenómeno y la intensidad, magnitud y distancia al epicentro del sismo. En el caso de la distancia, después de analizar diferentes reportes, los mismos autores llegaron a la conclusión de que aproximadamente el radio de afectación por licuación era de no más de 60 km desde el epicentro, viéndose afectados mayoritariamente los depósitos aluviales; especialmente los viejos cauces de ríos.

Tabla 2.1 Sismos que provocaron licuación de arenas en Japón de 1872 a 1965. Kuribayashi, et al. (1975)

	Sismo	Año, Mes, Día	Magnitud	Profundidad focal (km)	Epicentro
1	Hamada	1872/03/14	7.1		34.8° N, 132.0° E
2	Koshigun	1887/07/22	6.1		37.7° N, 139.0° E
3	Kumamoto	1889/07/28	6.3		32.8° N, 130.7° E
4	Nobi	1891/10/28	8.4 (7.9)		35.6° N, 136.6° E
5	Tokyo	1894/06/20	7.5		35.7° N, 139.9° E
6	Shonai	1894/10/22	7.3		39.2° N, 139.5° E
7	Tone – karyu	1895/01/25	7.3		35.9° N, 140.4° E
8	Rikuu	1896/08/31	7.5		39.5° N, 140.7° E
9	Kamitakai	1897/01/17, 04/30	6.3, 6.3		36.6° N, 138.2° E
10	Minami Uonumagun	1898/05/26	6.7		36.9° N, 138.9° E
11	Fukuoka	1898/08/10, 08/12	6.5, 6.5		33.5° N, 130.2° E
12	Gono (Anegawa)	1909/08/14	6.9		35.4° N, 136.3° E
13	Ugosen	1914/03/15	6.4		39.5° N, 140.4° E
14	Shimabara	1922/12/08	6.5, 5.9		32.7° N, 130.1° E
15	Kanto	1923/09/01	7.9		35.2° N, 139.3° E
16	Tajima	1925/05/23	7		35.7° N, 134.8° E
17	Kitatango	1927/03/07	7.5	10	35.6° N, 135.1° E
18	Ishinomaki	1927/08/06			
19	Sekihara	1927/10/27	5.3	0 - 10	37.5° N, 138.8° E
20	Kaga – nanseibu	1930/10/17			
21	Kita – izu	1930/11/26	7	0 - 5	35.1° N, 139.0° E
22	Nishi – Saitama	1931/09/21	7	10 -20	36.1° N, 139.2° E
23	Noto	1933/09/21	6	15	37.1° N, 137.0° E
24	Shizuoka	1935/07/11	6.3	10	35.0° N, 138.4° E
25	Kawashiyamoto	1936/02/21	6.4	20	34.5° N, 135.7° E
26	Kinkazan – oki	1936/11/03	7.7		38.2° N, 142.2° E
27	Oga	1939/05/01	7	0	39.95° N, 139.8° E
28	Nagano	1941/07/15	6.2	5 - 20	36.7° N, 138.3° E
29	Tottoriken – oki	1943/03/04, 03/05	6.1, 6.1	20, 20	35.6° N, 134.2° E
30	Tottori	1943/09/10	7.4	10	35.5° N, 134.2° E
31	Tonankai	1944/12/07	8	0	33.7° N, 136.2° E
32	Mikawa	1945/01/13	7.1	0	34.7° N, 137.0° E
33	Nankai	1946/12/21	8.1	30	33.0° N, 135.6° E
34	Fukui	1948/06/28	7.3	20	36.1° N, 136.2° E
35	Tokachi – oki	1952/03/04	8.1	4.5	42.15° N, 143.85° E
36	Daishoji – oki	1952/03/07	6.8	20	36.45° N, 136.20° E
37	Tokushima – nanbu	1955/07/27			33.8° N, 134.3° E
38	Futatsui	1955/10/19	5.7	0 - 10	40.3° N, 140.2° E
39	Nagaoka	1961/02/02	5.2	20	37° 27' N, 138° 50' E
40	Hyuganada	1961/02/27	7	40	31° 36' N, 131° 51' E
41	Miyagiken – hokubu	1962/04/30	6.5	0	38° 44' N, 141° 08' E
42	Niigata	1964/06/16	7.5	40	38° 21' N, 139° 11' E
43	Ebino	1968/02/21, 02/22, 03/25	5.7, 6.1, 5.6/5.7, 5.4	0, 0/0, 10	38° 01' N, 130° 43' E
44	Tokachi – oki	1968/05/16	7.9	0	40° 44' N, 143° 35' E

Lo sucedido en Kobe durante el “Gran sismo de Hanshin” (34.6 N y 135.0 E) en enero 17 de 1995, fue una re-licuación del suelo; en 1964 se registró un evento similar. La relación entre la distancia y dicho fenómeno se observó nuevamente, Kobe se encuentra a 17 km. del epicentro (figura 2.1).

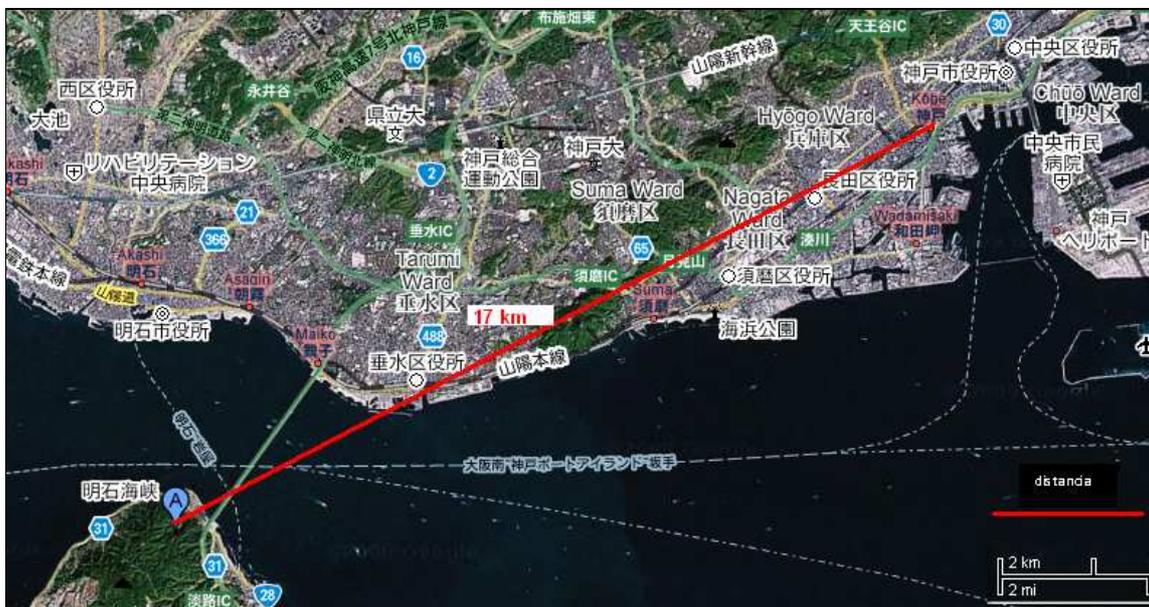


Figura 2.1 Distancia del epicentro a la ciudad de Kobe. Tomada de Google maps.

El movimiento del terreno fue de aproximadamente 10 y 16 cm en dirección horizontal y vertical, respectivamente, los más grandes jamás registrados en Japón. Respecto a las aceleraciones y velocidades máximas, se estimaron en 0.83 g y más de 40 cm/s respectivamente. Estos parámetros varían de acuerdo a la distancia al epicentro. Esto implica aceleraciones cercanas a la gravedad terrestre, lo que indica que varios objetos, e incluso personas, no podían mantenerse en pie, ya que para aceleraciones de 1 g, los objetos serían despedidos por los aires; inclusive aceleraciones de 0.5 g, arrojarían al suelo objetos de pie (Masias, --). Se presentaron amplificaciones del sitio que sumadas con desplazamientos de corta duración provocaron serios daños. En las figuras 2.2 y 2.3 se presentan los daños debidos a licuación del suelo en el puerto de Kobe, Japón, provocando el colapso de algunas grúas del puerto.



Figura 2.2 Daños debidos a licuación de suelo en el puerto de Kobe, Japón. Tomada de cee.engr.ucdavis.edu/faculty/boulanger/geo_photo_album/

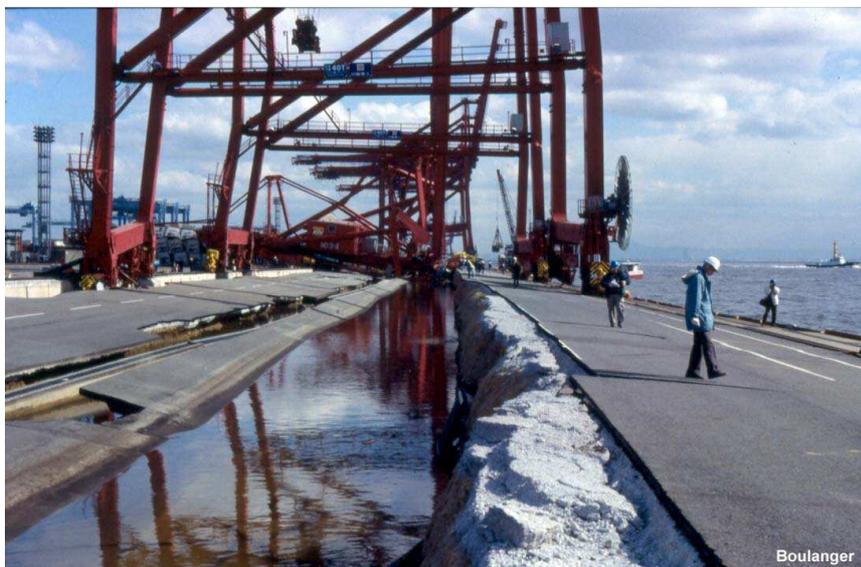


Figura 2.3 Daños debidos a licuación del suelo en el puerto de Kobe, Japón. Tomada de cee.engr.ucdavis.edu/faculty/boulanger/geo_photo_album/

2.1.2 Northridge (1994)

Northridge, California, es una pequeña ciudad cercana a Los Ángeles. Sitio históricamente asociado a fallas del terreno por su cercanía al sistema de Fallas de San Andrés. El 17 de enero de 1994 a las 4:30:55 a.m., tiempo local, se registró un sismo de magnitud (M_w) 6.7 a una profundidad de 18 km, con localización focal $34^\circ 12' 78'' N$ y $118^\circ 32'22''W$.

Este sismo sin duda, causó uno de los mayores desastres en la historia de California. Durante e inmediatamente después del evento se observaron tuberías rotas y daños a estructuras, indicadores de licuación del suelo. De acuerdo a *Trifunac, et al. (1994)*, la causa principal fue la velocidad del suelo en ciertas áreas, excedente a 150 m/s.

Los Ángeles es una ciudad altamente 'instrumentada', por lo que el evento fue detectado en más de 200 estaciones. Sin embargo, la densidad de registros no permite hacer un estudio detallado de las variaciones de velocidad en pequeñas áreas, lo cual sería de gran ayuda para entender el comportamiento de las estructuras durante un movimiento. *Trifunac, et al. (1994)*, establecieron un mapa de velocidades pico del suelo durante el sismo de Northridge en las áreas de los Valles de San Fernando y Santa Mónica además de la ciudad de Los Ángeles, figura 2.4. En él se puede observar que en gran parte de la zona de estudio los mayores desplazamientos corresponden a depósitos sedimentarios, mientras en roca firme estos disminuyen en gran medida.

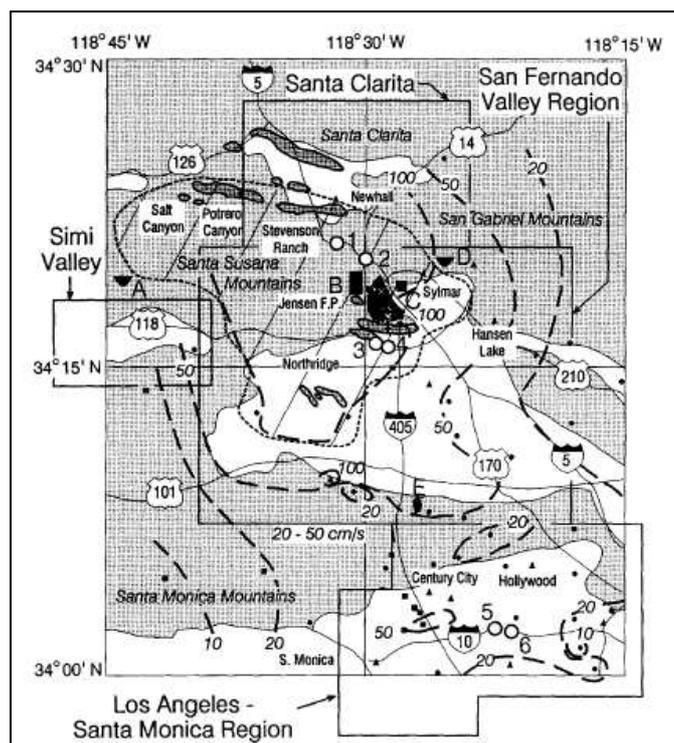


Figura 2.4 Mapa de velocidades pico del suelo (cm/s) durante el sismo de Northridge, 1994. Área de Los Ángeles y Valle de Santa Mónica. (Tomada de *Trifunac, et al., 1998*)

A partir de estos mapas, el mismo autor realizó relaciones entre velocidad, geología (tabla 2.2) y daño en estructuras y tuberías, (figuras 2.5 y 2.6).

Tabla 2.2 Geología en el área de los Ángeles y los Valles de San Fernando y Santa Mónica.
(Tomada de Trifunac, et al., 1998)

		Holoceno (<10 000 años)	Pleistoceno (10 000 - 1 700 000 años)
		Qyf	Qof
Limos y arcillas	Qya2 (0 - 3 m)	S1*	S3
	Qya1 (0 - 30 m)	S2	S4
	Qoa		
		Qym	Qom
Arenas	Qya2 (0 - 3 m)	H1	H3
	Qya1 (0 - 30 m)	H2	H4
	Qoa		H5
		Qyc	Qoc
Gravas	Qya2 (0 - 3 m)	H6	H9
	Qya1 (0 - 30 m)	H7	H10
	Qoa	H8	H11
		Qyvc	Qovc
Guijarros	Qya2 (0 - 3 m)	H12	
	Qya1 (0 - 30 m)	H13	
	Qoa	H14	H15
Sedimentarias e intrusivas	Ts - rocas sedimentarias no diferenciables anteriores al cuaternario		T
	Tv - Rocas volcánicas no diferenciables anteriores al cuaternario		
	pTb - Rocas metamórficas e intrusivas del mesozoico y anteriores		

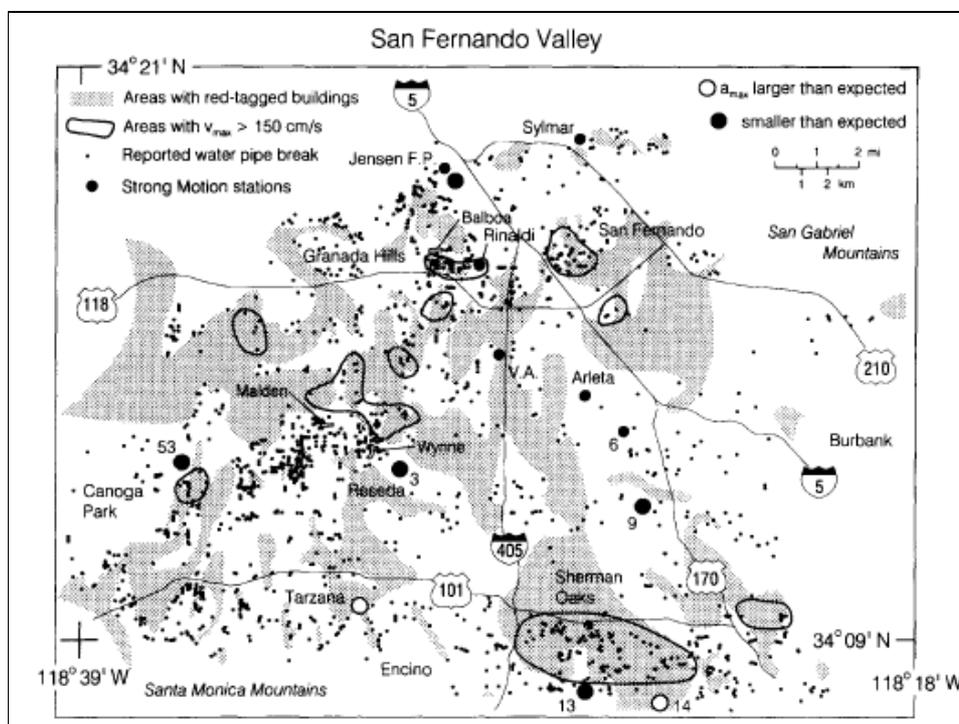


Figura 2.5 Distribución de daños por licuación durante el sismo de Northridge.
(Tomada de Trifunac, et al., 1998).

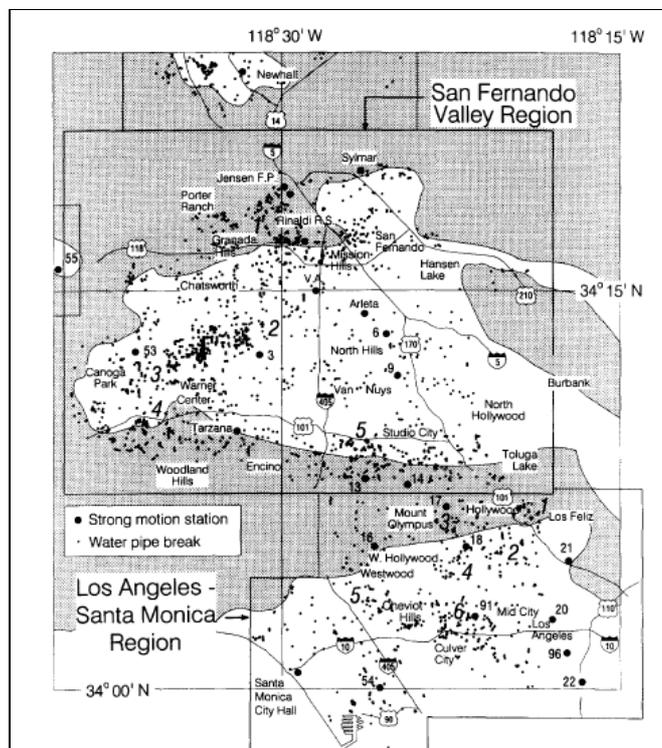


Figura 2.6 Distribución de tuberías rotas por licuación durante el sismo de Northridge, 1994. Tomada de Trifunac, et al., 1998.

Al observar de manera detallada la figura 2.5, se encuentra que la mayor parte de los daños estructurales coinciden con depósitos sedimentarios correspondientes al Holoceno, predominando los ubicados en un estrato de arcillas de 3 m de espesor. Aunado a ello, si se toma en cuenta que las tuberías rotas en el subsuelo son un referente de la ocurrencia de licuación, se puede ver que la mayor destrucción fue consecuencia de este fenómeno.

El sismo de Northridge dejó a su paso 72 muertos y 12,000 heridos así como pérdidas por más de 30 billones de dólares. Nótese que los mapas de posible licuación no coinciden en un cien por ciento, pero se acercan mucho al escenario que se presentó, reforzando la idea de que es útil hacer mapas de prevención.

2.1.3 Kocaeli (1999)

Históricamente, la zona comprendida entre España y Turquía ha tenido una gran actividad sísmica, ello se puede ver en la figura 2.7 tomada del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), además, en la misma figura se observa la densidad sísmica para el caso particular de Turquía. Para la creación de ambas imágenes se tomaron en cuenta eventos de magnitud 5 o más, dicha actividad sísmica es la principal consecuencia de la interacción entre las placas tectónicas Europea y Africana, la falla que separa a estas placas atraviesa el territorio turco de oeste a este.

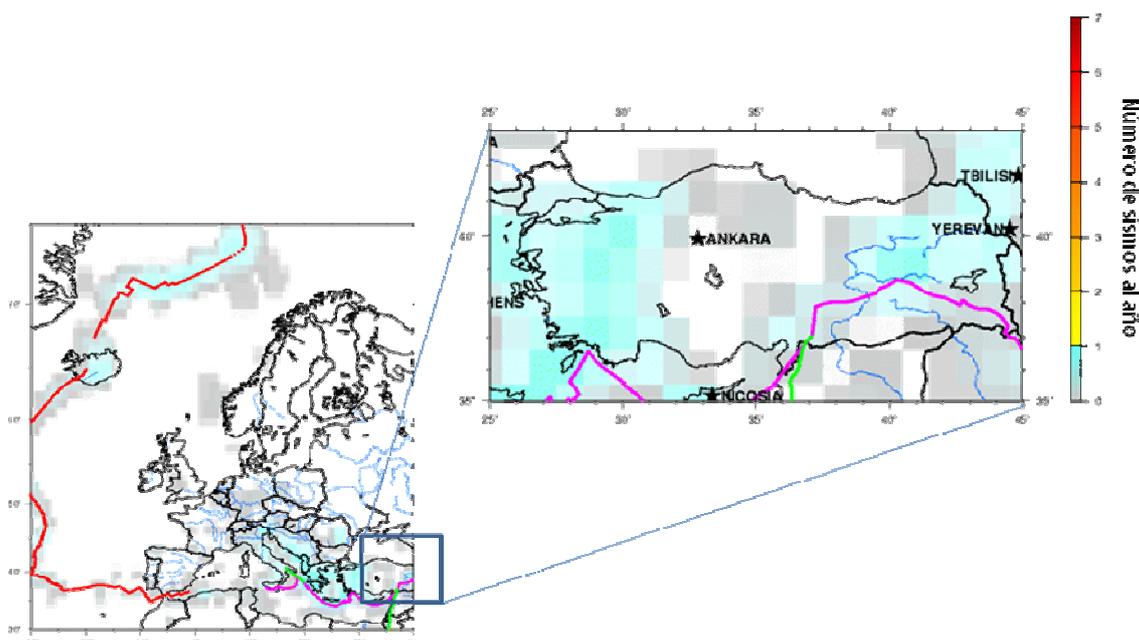


Figura 2.7 Densidad sísmica de la zona del Mar Mediterráneo y de Turquía, para su realización se tomaron eventos con magnitud 5 o más. Tomada y modificada del USGS (www.usgs.gov)

El Turkey National Strong Ground Motion Program (TKYHP, por su nombre en turco), institución encargada de estudiar y registrar el comportamiento sísmico de la zona de Turquía, reporta un evento para el día 17 de agosto de 1999. Las características de éste son, localización 40.70° latitud norte y 29.91° longitud este (localidad de Kocaeli, Turquía), profundidad de 18 km, M_D 6.7, M_W 7.4 y aceleraciones máximas de 0.407 g en promedio. *Yoshida, et al. (2001)*, reportan que entre otras, las consecuencias de este evento fueron 15,000 vidas humanas y 24,000 heridos, además de las pérdidas materiales.

Debido a la gran devastación que dejó este evento (comúnmente conocido como sismo de Kocaeli), diferentes investigadores se dieron a la tarea de estudiar el fenómeno de licuación del suelo (véase *Yoshida et al., 2001; Cetin, et al., 2004; Yilmaz, et al., 2004; Ardan, et al., 2008* y *Erdik --*, entre otros). Todos ellos coinciden en apuntar que las pérdidas mayores se dieron en un radio de no más de 50 km del epicentro. Quizá esto se deba a que a tan corta distancia la aceleración del suelo es más significativa que a grandes trayectos, además de que el tipo de suelos (aluviales en su mayoría) no responden de manera favorable al paso de las ondas sísmicas.

Ardan et al. (2008), reporta que las localidades más afectadas por el sismo de Kocaeli fueron aquellas asentadas en depósitos del cuaternario a distancias de entre 20 y 40 km del epicentro. Además, habla de que la licuación fue evidente por sismitas, fisuras y desplazamiento del suelo, el área de estudios de estos autores fue la Bahía de Izmit y el lago Sapanca, en donde observaron desplazamientos laterales de hasta 352 cm y hundimientos de 30 cm.

Por su parte, *Yoshida, et al. (2001)*, estudiaron los daños en la ciudad de Adapazari, atribuyen los daños por licuación a la localización de la ciudad entre los ríos Sakarya y Cark, lo que influye en el tipo de depósitos y en la alta saturación del suelo, además de que el nivel freático se encuentra entre 1 y 3 m de profundidad.

Cinte et al. (2004), efectuaron una serie de observaciones en la Bahía de Izmit, en ella observaron que en zonas como el campo de soccer y la estación de policías se presentaron desplazamientos de hasta 2.4 m. Posiblemente la magnitud del fenómeno se debió a la cercanía con el mar, aunado a la pobre gradación granulométrica de la que hablan los autores.

El artículo más trascendente para este trabajo es el publicado por *Yilmaz y Cetin (2004)*. En él se muestra una serie de mapas hecha en un SIG para calcular el índice de licuación (LSI, Liquefaction Severity Index en inglés) para la ciudad de Sakarya. El método empleado para el cálculo de este factor es similar al explicado en el capítulo 3 de esta tesis. En la figura 2.8 se observa el cálculo del LSI para la ciudad de Sakarya. Los mismos autores hicieron una comparación de sus resultados con los datos registrados por el sismo de Kocaeli (figura 2.9). En la figura 2.9 se observa que en la parte noreste de la ciudad donde el LSI es mayor, los daños registrados después del sismo de Kocaeli fueron mayores, lo que hace suponer que correlacionando los datos geotécnicos de manera adecuada en un SIG puede dar buenos resultados para el cálculo de ciertos fenómenos propios del suelo.

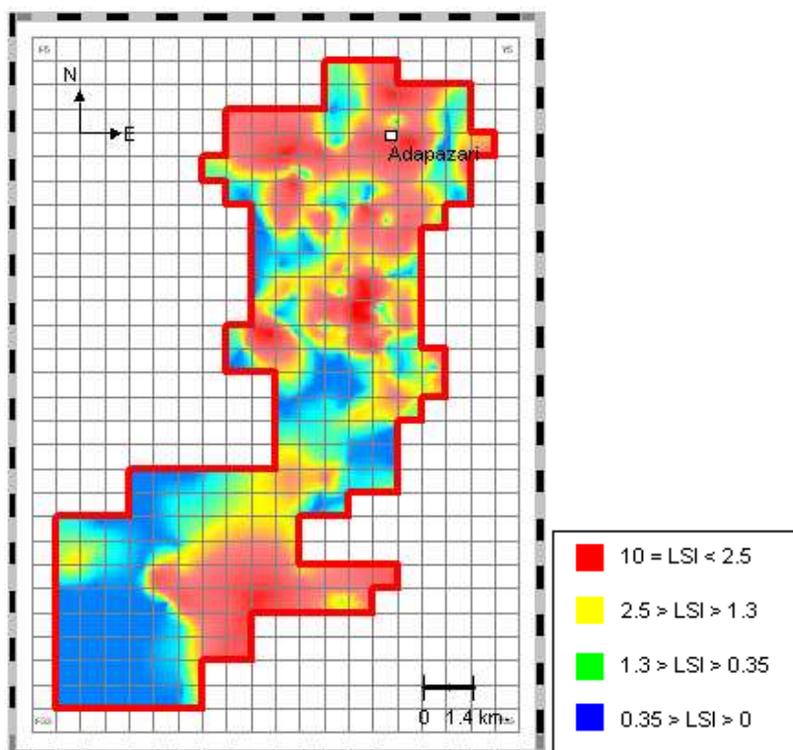


Figura 2.8 LSI calculado en un SIG para la ciudad de Sakarya. Tomada de *Yilmaz y Celtin (2004)*.

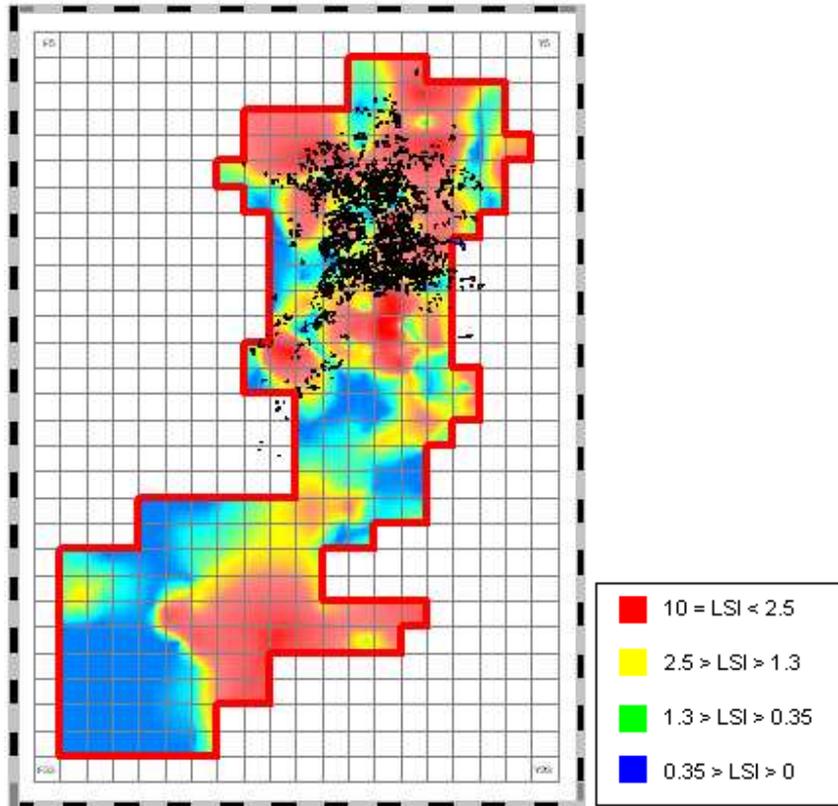


Figura 2.9 Comparación de los datos obtenidos del LSI calculado en un SIG y la distribución de daños después del sismo de Kocaeli para la ciudad de Sakarya. Tomada de Yilmaz y Celtin (2004).

2.2 En México

México se encuentra una zona de interacción de cinco placas tectónicas: las de Rivera, de Norteamérica, de Cocos, del Caribe y del Pacífico. Como consecuencia de dicha interacción, se generan grandes esfuerzos. Si estos sobrepasan la resistencia de los materiales que constituyen las placas, se genera una ruptura; por lo tanto, una gran liberación de energía manifestándose en ondas sísmicas. En la figura 2.10, se muestran los límites y velocidades de desplazamiento (aproximados) entre placas (Bitrán, et al., 2003). Una consecuencia de la 'liberación' de energía de todas estas placas ha sido la manifestación de 'alta sismicidad', por lo que diferentes instituciones se han tomado la tarea de hacer un mapa de regionalización sísmica para el país, como el de la figura 2.11, realizado por Pérez, et al. (2008). En la figura 2.11 se presenta la regionalización sísmica, tomando en cuenta valores de aceleración máxima del suelo.



Figura 2.10. Límites y velocidades de desplazamiento (aproximados) entre placas. (Bitrán, et al., 2003)

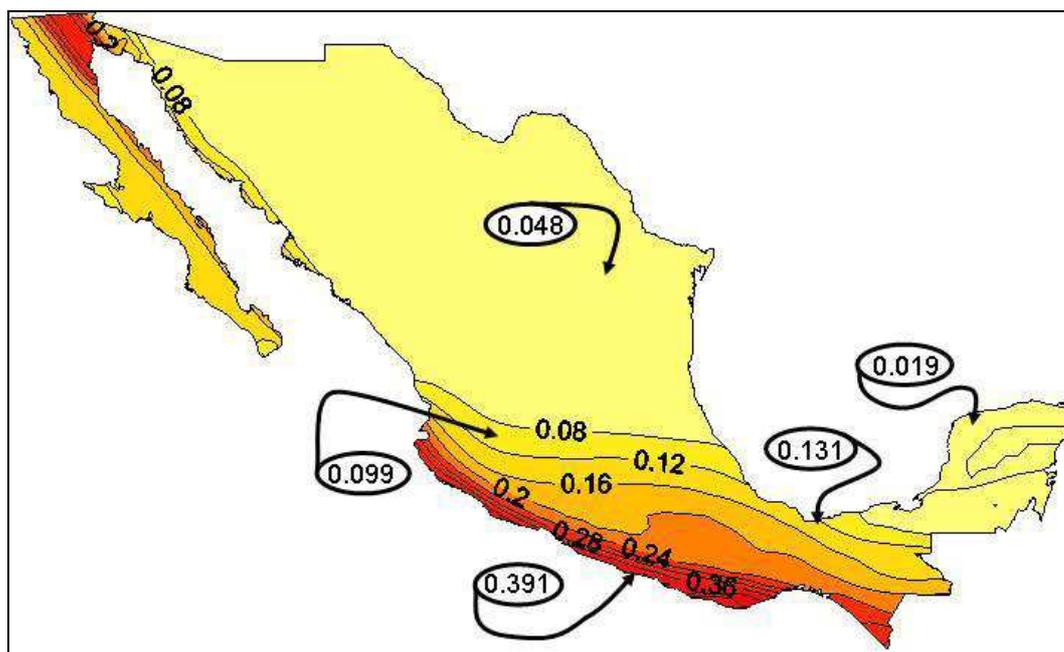


Figura 2.11. Mapa de regionalización sísmica, tomando en cuenta valores de aceleración máxima del suelo. (Pérez, et al., 2008)

En el mapa de regionalización sísmica de la figura 2.11, la aceleración del suelo va de 0.019 a 0.39, en orden creciente conforme se acerca a la zona de subducción en la zona del Pacífico. Este tipo de mapas se hacen para incluirse en reglamentos empleados en el ámbito de la construcción, a fin de evitar la mayor cantidad de daños posibles ante efectos producidos por sismos. Por ejemplo, daños en viviendas por deslizamientos de laderas, inestabilidad de taludes, hundimientos o licuación del suelo, todos ellos efectos consecuentes de la aceleración del suelo entre otros factores.

Algunos de los casos de licuación de suelo más significativos ocurridos en México son presentados a continuación de manera general.

2.2.1 Colima, sismo de Tecomán (2003)

El estado de Colima, México, se encuentra en el litoral del Océano Pacífico, entre 18°41' y 19°31' latitud norte y 103°29' y 104°41' longitud oeste. De acuerdo a las figuras 2.10 y 2.11, Colima se localiza en una zona de interacción entre las placas de Rivera, del Pacífico, de Cocos y de Norteamérica, teniendo un promedio de 0.2 g en la aceleración del suelo. Aunque la sismicidad en Colima no es comparable con la del estado de Guerrero, no es despreciable. Debido a su localización geográfica debe ser tomada en cuenta, pues a consecuencia de sismos pasados se han observado pérdidas importantes.

Una cantidad importante de sismos han ocurrido en la región (tabla 2.3), algunos de ellos como el de Manzanillo 1995, dejaron daños considerables. No obstante, en este trabajo sólo se tomará en cuenta el de Tecomán 2003, debido a la mayor información obtenida sobre el fenómeno de licuación para este evento.

Tabla 2.3. Sismos ocurridos en la región de Colima y Jalisco, 1900-2003. (Gutiérrez, 2003)

FECHA	REGIÓN	LATITUD (°N)	LONGITUD (°W)	Magnitud	Profundidad (Km)
20/01/1900	Jalisco-Colima	20.0	105.0	7.3	33
03/06/1932	Jalisco-Colima	19.570	104.420	8.2	33
18/06/1932	Jalisco-Colima	19.500	103.500	7.8	33
30/01/1930	Colima-Michoacán	18.412	103.019	7.3	24
09/10/1995	Colima (Manzanillo)	19.05	104.20	8.0	17
21/01/2003	Colima (Tecomán)	18.22	104.6	7.4	10

Licuación del suelo por el sismo de Tecomán (2003).

El 21 de Enero de 2003, a las 20:06:31 hrs, hora local, diferentes estaciones sismológicas registraron un evento ubicado en coordenadas variables dependiendo de la agencia. En general, localizan el epicentro a unos 30 km frente a las costas del poblado de Tecomán, Colima, México. En la figura 2.12, se presenta la localización epicentral del sismo de Tecomán frente a las costas de Colima. Al igual que la localización, la magnitud (M_w) varía con el reporte, Harvard CMT estima M_w 7.5, SGUS reporta M_w 7.6 y el SSN calcula M_w 7.6, por lo que se tomará en cuenta un evento de M_w 7.6.



Figura 2.12. Localización del sismo de Tecomán (2003).

La costa de Colima se caracteriza geológicamente por depósitos del Holoceno, típicamente arenas uniformes, de acuerdo a *Wartman, et al. (2003)*, haciendo de esta una zona susceptible a licuación, en la figura 2.13 se aprecia la geología de la zona de Manzanillo, Colima.

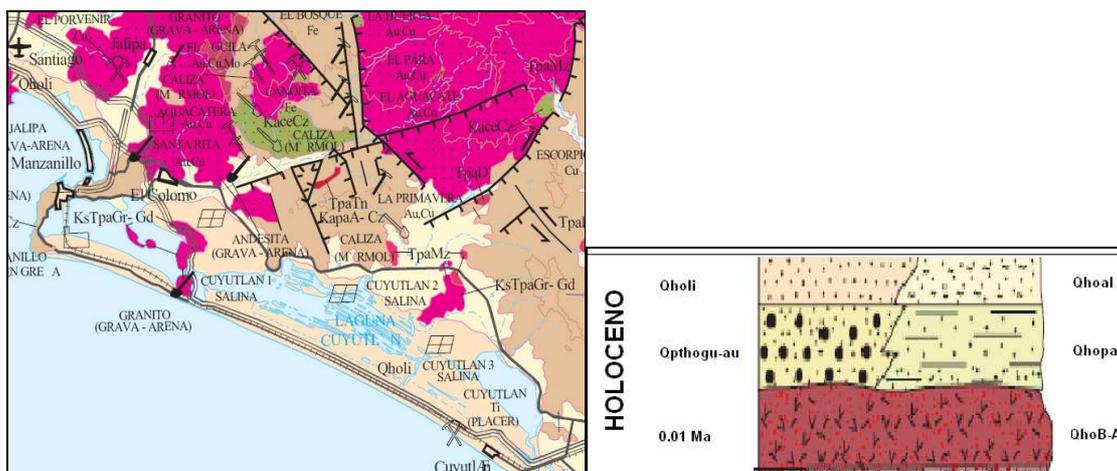


Figura 2.13. Geología de la zona de Manzanillo, Colima. (SGM, 2008)

Se ha observado que las zonas en las que se presenta licuación o desplazamiento lateral de suelo (consecuencia de licuación) una vez, tienen alta probabilidad de repetir la ocurrencia de este fenómeno. En el caso del sismo de Tecomán, las áreas que presentaron alguno de estos dos fenómenos por el sismo de Manzanillo en 1995 lo volvieron a hacer durante el sismo de Tecomán en 2003. Cabe aclarar que no todos los puntos afectados siguieron este patrón. De acuerdo a *Wartman, et al. (2003)*, un mapa comparativo de las zonas que presentaron licuación y/o desplazamiento lateral del suelo durante los sismos de Manzanillo 1995 y Tecomán 2003 sería el expuesto en la figura 2.14, esto se discute más adelante.

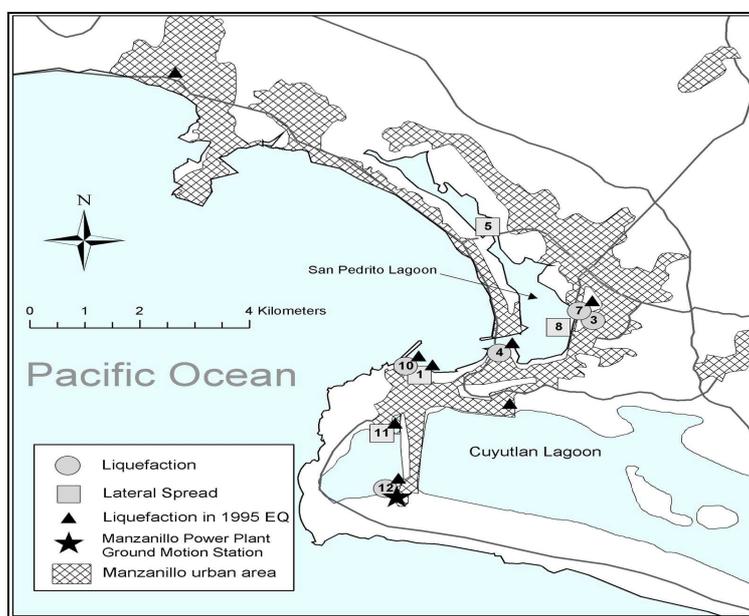


Figura 2.14. Mapa comparativo de zonas que presentaron licuación de arenas durante los sismos de Manzanillo (1995) y Tecomán (2003). (Wartman, et al., 2003)

Conforme a la figura 2.14, seis de nueve lugares en donde se presentó licuación o desplazamiento lateral del suelo en el puerto de Manzanillo, ya tenían antecedentes de este fenómeno; lo que nos lleva a confirmar la teoría antes expuesta. Ahora bien, los daños registrados son variados en magnitud y tipo.

Las principales áreas afectadas fueron el puerto de Manzanillo y las zonas urbanas de Villa de Álvarez y Colima, sobre todo entre estas últimas dos en lugares inhabitados, disminuyendo las posibles pérdidas humanas o materiales.

En Villa de Álvarez, al noroeste de la ciudad de Colima, la pérdida de resistencia al esfuerzo, el asentamiento del suelo y el desplazamiento lateral, en combinación, causaron daños en el poblado de San Isidro. El daño incluyó levantamiento, hundimiento y/o agrietamiento de bloques de concreto del piso; agrietamiento y/o deformación en pavimento y aceras y desplazamiento lateral, sobre todo en estructuras residenciales. En la figura 2.15, se presenta el hundimiento del piso en Villa de Álvarez, Colima debido a la licuación del suelo.

Los habitantes locales reportaron que inmediatamente después del sismo se vieron 'ebulliciones' de lodo y arena de grietas del pavimento y bloques de concreto dañados, que es otra manifestación del fenómeno de licuación. Estudios (*Enomoto, et al., 2004* y *Lermo y Ovando, --*) encontraron que dentro de la ciudad de Colima y la parte urbana de Villa de Álvarez, los mayores daños se concentraron en zonas con presencia de aluviones sueltos en donde generalmente existen arroyos que ya fueron entubados o quedaron cubiertos y obturados por la mancha urbana.

Dentro del desarrollo de la microzonificación sísmica de la ciudad de Colima, *Lermo y Ovando (--)*, desarrollaron una serie de acelerogramas sintéticos. En ellos se observa que la aceleración para la zona III (Villa de Álvarez entra en esta zona) puede llegar hasta 0.4 de g, debido principalmente al fenómeno de amplificación consecuente de las características del suelo. Además, *Enomoto, et al. (2004)*, encontraron que en las zonas con mayor presencia de daños, el periodo fundamental se encuentra entre 0.1 y 0.2 s.



Figura 2.15. Hundimiento de piso en Villa de Álvarez, Colima. (*Bitrán, et al., 2003*)

En la costera de Manzanillo, consistente de bloques prefabricados, después del sismo se pudo ver la deformación causada por la propagación del movimiento lateral (ver figura 2.16). Acorde con *Wartman, et al. (2003)*, la inclinación del suelo fue de aproximadamente 3% y el desplazamiento lateral del orden de 1 a 3 m. Los daños por licuación se limitaron casi exclusivamente a dicha zona,

incluyendo un camino cercano al centro y un paso del boulevard principal. La licuación ocurrió en áreas no significativas por lo que las operaciones del puerto no se vieron afectadas. Pero debido al crecimiento de la ciudad, esto puede ser un peligro para las futuras construcciones que se decida hacer ahí, por lo que debe ser considerado dentro de estudios futuros.



Figura 2.16. Desplazamiento lateral en el puerto de Manzanillo.
(Wartman, et al., 2003)

2.2.2 Tlaxcala, sismo de Tehuacán (1999)

El Estado de Tlaxcala se localiza en la parte central de México, entre las coordenadas 19°44' y 19°06' latitud norte y 97°38' y 98°43' longitud oeste, ubicando estos puntos en la figura 2.11, Tlaxcala se encuentra en una zona de baja sismicidad, donde quizá la máxima aceleración del suelo sea del orden de 0.4 g, valor que entra en el rango de aceleraciones para que se dé la licuación del suelo.

Conforme a *Lermo y Bernal (2006)*, los sismos que han afectado al estado tienen su origen en tres fuentes básicas:

- El proceso de subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica, dando origen a sismos de gran magnitud ($M > 7.0$) en toda la República Mexicana.
- La deformación interna de la Placa subducida, ocasionando sismos de menor magnitud ($M_w = 7.0$) en comparación con la primera. El mecanismo focal de estos sismos obedece a una deformación de tipo extensional.
- Deformación cortical debido a sistemas de fallas presentes en el estado. Esta fuente daría origen a sismos de magnitudes moderadas a pequeñas que producirían daños locales.

Presencia de licuación del suelo por el sismo de Tehuacán (1999)

A pesar de que la región de Tlaxcala-Puebla es una zona de baja sismicidad, el 15 de junio de 1999, a las 15:42:06 horas, tiempo local, se registró un sismo de magnitud 6.7 a 92 km de profundidad, con localización focal según el Servicio Sismológico Nacional (SSN) de 18.2° norte y 97.47° oeste (ver figura 2.17) y según *Aguirre, et al. (1999)*, con localización epicentral de 18.3° norte y 97.6° oeste a profundidad de 40 km.

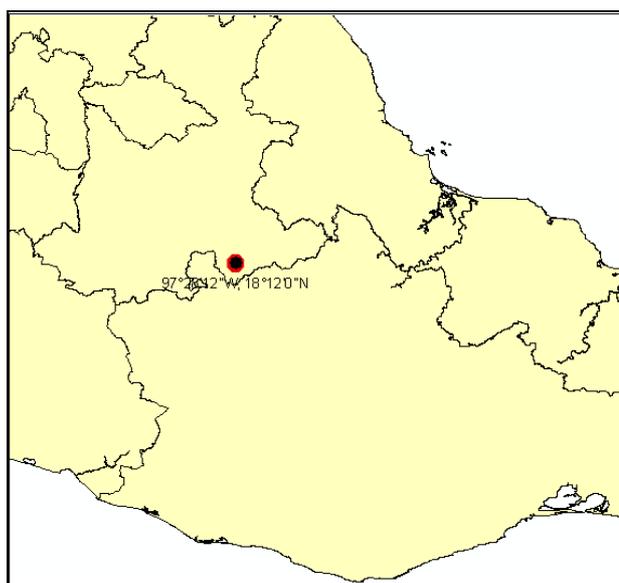


Figura 2.17. Localización focal del sismo de Tehuacán, según el SSN.

La geología preponderante en el Altiplano de Tlaxcala es de origen volcánico, predominan las andesitas y depósitos fluvio-glaciares más recientes, sobre todo en las faldas del volcán 'La Malinche'. Dentro de esta zona, durante el sismo de Tehuacán 1999, se presentó extrañamente y por primera vez un caso de licuación del suelo (Ramírez, et al., 1980). En la figura 2.18, se muestra la geología de la región del Altiplano de Tlaxcala, también conocida como Valle Puebla-Tlaxcala.

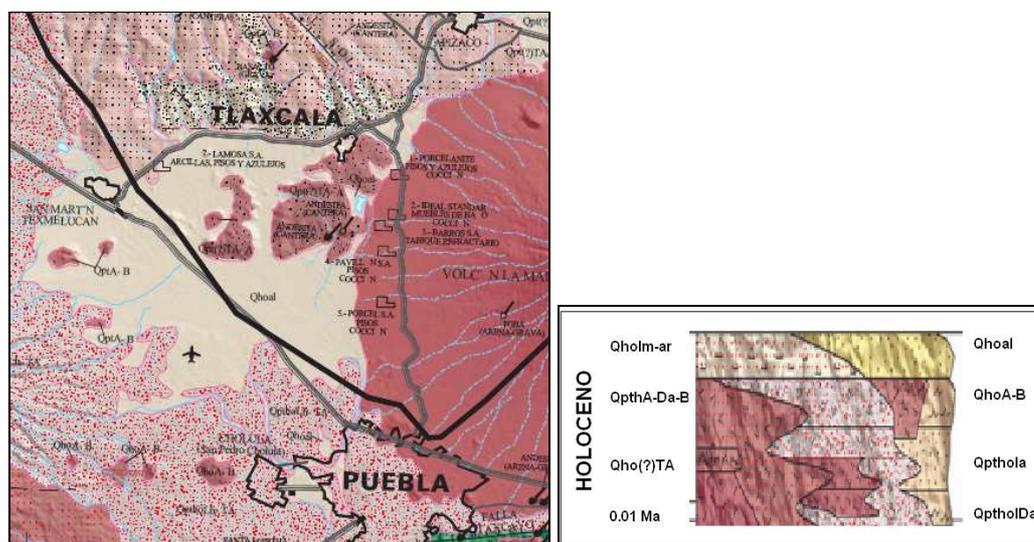


Figura 2.18. Geología de la región del Altiplano de Tlaxcala.(SGM, 2008)

El fenómeno se registró en una zona rural a 140 km del epicentro aproximadamente, unos 20 km al sur de la ciudad de Tlaxcala, al noroeste de la ciudad de Puebla. No se tiene información precisa sobre las condiciones del lugar, según el CENAPRED, los pobladores dijeron ver salir arena limosa y oscura a través de grietas y volcancitos (ver figura 2.19), que posteriormente se identificó como cenizas volcánicas. Los primeros estudios hechos por CENAPRED en 1999, indican que se trata de arenas finas uniformes con proporción alta de granos limosos sin plasticidad, la proporción de finos varió entre 28 y 45% del total.



*Figura 2.19. Evidencia de licuación de arenas en un sembradío del Altiplano de Tlaxcala.
(Ovando, comunicación personal)*

2.2.3 Otros casos menos documentados

Además de los casos arriba mencionados, existen otros menos documentados o de los que se cuenta con poca información, figura 2.20. A continuación se hablará brevemente de algunos de ellos.

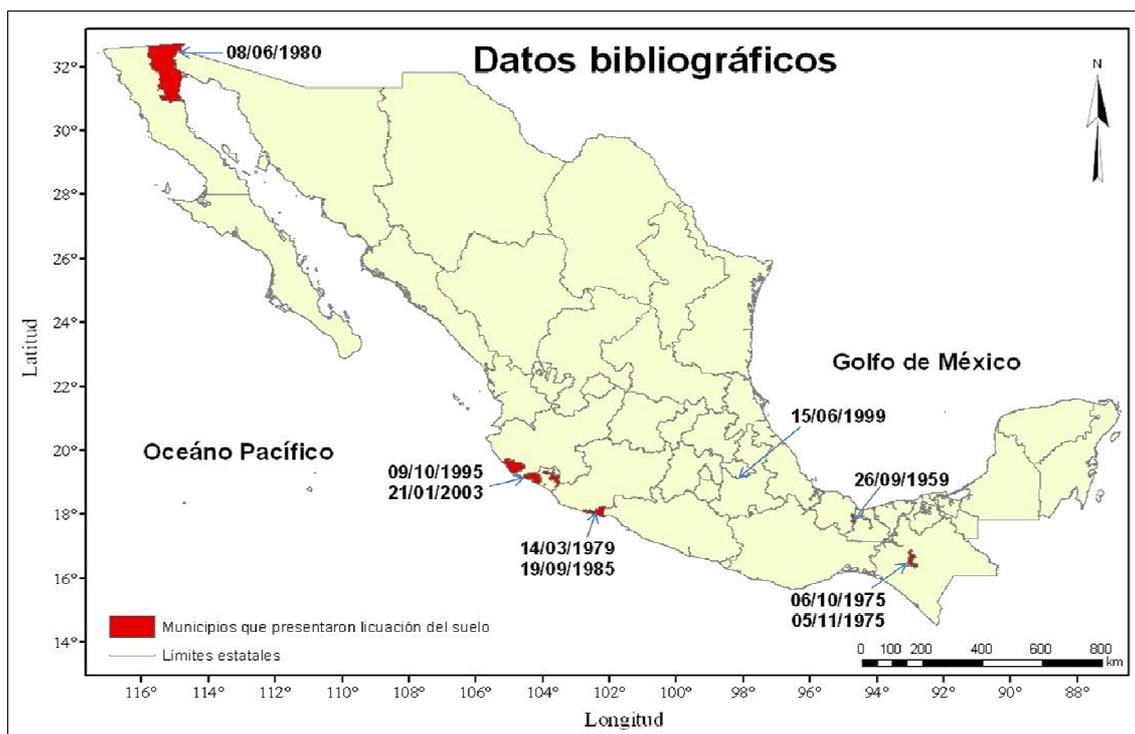


Figura 2.20 Representación gráfica de los lugares en donde se ha registrado licuación de suelo, de acuerdo a la bibliografía.

Chiapa de Corzo, Chiapas (1975)

En la geología del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas predominan las rocas sedimentarias (lutita – arenisca) de la formación Soyalo, perteneciente al Holoceno (figura 2.21). A través del municipio pasan los ríos Grijalva y Santo Domingo, en las riveras de estos se registraron evidencias del fenómeno de licuación en el año 1975 (Ramírez y Taboada, 1980).

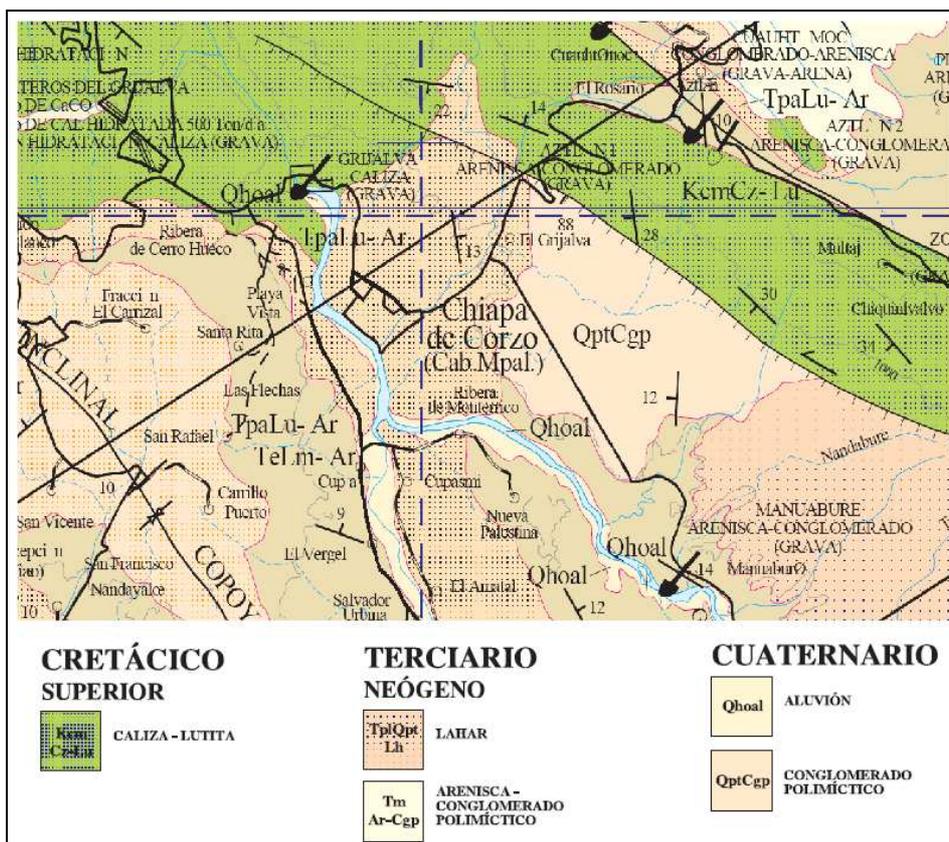


Figura 2.21. Geología del área de Chiapa de Corzo. SGM (2009)

El 6 de octubre y el 5 de noviembre de ese año ocurrieron un par de sismos provocando aceleraciones del orden de 0.3 g en el área (Arenas, 1980). La consecuencia fue que en zonas con depósitos de aluviones con granulometrías correspondientes a arenas medianas en su mayoría se presentara licuación del subsuelo. El fenómeno se hizo evidente mediante la aparición de grietas y volcanes de los que salía arena y agua, así como desplazamientos laterales, de acuerdo a Arenas (1980).

Valle de Mexicali (1980)

La región del Valle de Mexicali se encuentra en una zona tectónicamente activa, basta con ver en un mapa su cercanía a la Falla de San Andrés. Además, el Valle de Mexicali está dentro de la región fisiográfica del Delta del Río Colorado. De acuerdo a las cartas publicadas por el Servicio Geológico Mexicano, la litología del área corresponde a sedimentos del Holoceno (figura 2.22), por lo que resulta ser una zona con posibilidad de presentar licuación del suelo.

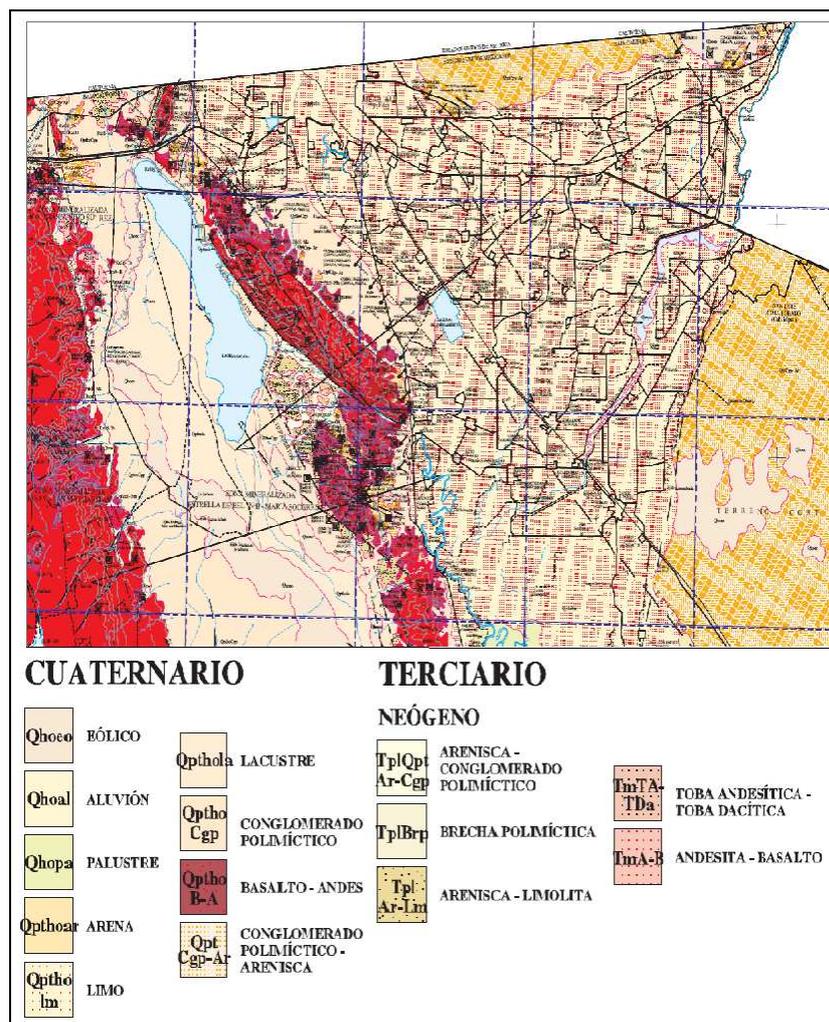


Figura 2.22. Geología del Valle de Mexicali. SGM (2008).

En junio de 8 de 1980 se registró un sismo a una distancia epicentral de no más de 10 km del Valle de Mexicali, con una magnitud de 8.1° y una profundidad cercana a 15 km. Las aceleraciones del suelo registradas fueron de aproximadamente 0.4 g, de acuerdo a *Ramírez, et al. (1980)*.

La combinación de las aceleraciones de tal magnitud y el tipo de sedimentos presentes en el Valle permitieron la licuación del suelo, evidente por la presencia de grietas y volcanes de arena.

Lázaro Cárdenas, Michoacán (1979, 1985)

El Puerto de Lázaro Cárdenas se localiza en la parte suroeste del estado de Michoacán. Ubicando al estado y, principalmente al municipio de Lázaro Cárdenas en el mapa de la figura 2.11 observamos que se encuentra en una zona que podría ser catalogada de alta sismicidad, con posibles aceleraciones del suelo de hasta 0.9 g.

La litología del municipio es variada, va de las calizas del Aptiano a las areniscas del Holoceno (figura 2.23). Por su ubicación fisiográfica, el puerto es parte del delta del Río Balsas. En el mismo puerto o cerca de él se distinguen diferentes tipos de depósitos sedimentarios, los médanos, aluviones y manglares cercanos a la playa, los depósitos de planicie costera, el delta antiguo y el delta moderno.

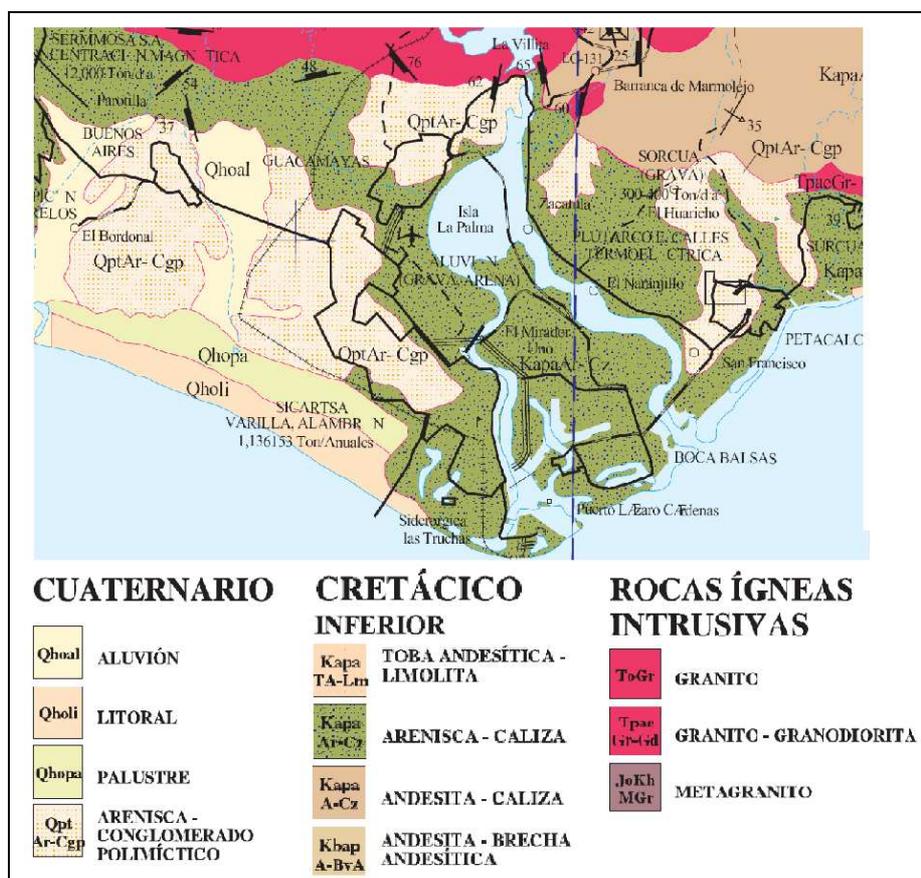


Figura 2.23 Geología del área de Lázaro Cárdenas. SGM (2008)

Debido al tipo de depósitos donde se encuentran los suelos y a la alta sismicidad de la zona, instalaciones del puerto han presentado problemas por licuación en más de una ocasión. La primera fue por el sismo del 14 de marzo de 1979 (17.75°N, -101.263°W, $M_w=6.5$), durante el cual las aceleraciones del suelo llegaron a rangos de 0.3 g de acuerdo a Ramírez y Taboada (1980). La segunda fue por el sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985 (18.08°N, -102.94°W, $M_w=8.1$), las aceleraciones del suelo esta vez fueron de 0.4 g (Ramírez y Lugo, 2000).

Jaluco, Jalisco y Manzanillo, Colima (1995)

Jaluco y Manzanillo son dos comunidades localizadas en los estados de Jalisco y Colima respectivamente. Ambas se encuentran en la provincia fisiográfica conocida como Sierra Madre del Sur, a una altura de no más de 2.5 m sobre el nivel del mar y están en la costa.

El 9 de octubre de 1995 ocurrió un sismo de magnitud 8.0 en las coordenadas 19.055°N, - 104.205°W con profundidad focal de 33 km, acorde a reportes de la NOAA. La distancia epicentral en ambos casos no fue de más de 60 km, lo que aunado a la litología local (figura 2.24), derivó en licuación del suelo.

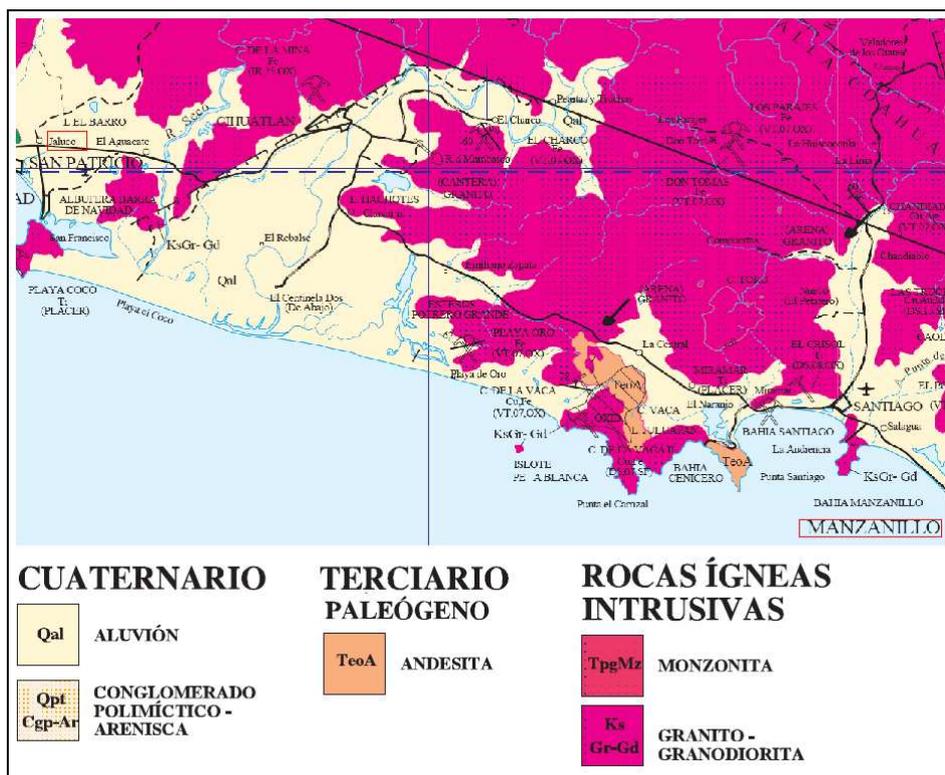


Figura 2.24. Litología del área de Jaluco y Manzanillo. SGM (2008)

En el caso de Jaluco, las consecuencias de la licuación fueron desastrosas, primero se vieron eyecciones de arena a través de grietas, roturas de tuberías y drenaje, asentamientos de casas y hundimientos y agrietamientos de pisos. Lo más caótico fue se colapsaron o hubo que demoler cerca del 25 % de las construcciones (Ramírez y Lugo, 2000).

El puerto de Manzanillo por su parte, evidenció la licuación del suelo en depósitos mayormente artificiales. De acuerdo a Ramírez y Lugo (2000), hubo daños debidos a desplazamiento lateral de taludes y el hundimiento de piso lo que provocó la ruptura de pavimento y tuberías.

Capítulo 3

Métodos existentes para evaluar el peligro por licuación del suelo por sismo

La “*Society of Japanese Mechanics and Foundation Engineering*” mediante su publicación del Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (*Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 1993*) hace una clasificación de los diferentes métodos empleados para evaluar la susceptibilidad de un suelo a sufrir licuación teniendo tres grados; los cuales varían de acuerdo a los datos empleados y sus posibles aplicaciones y contratiempos. A continuación se presenta una breve descripción.

GRADO I

Estos métodos están basados en datos preexistentes de fuentes publicadas. Para ello existen dos tipos de criterios:

1. Evaluación de la extensión máxima del área susceptible a licuación.
 - a) Criterio de Magnitud- Máxima distancia.
 - b) Criterio de Intensidad.
2. Estimación de la susceptibilidad a licuación basándose en datos preexistentes
 - a) Criterio de Geología y Geomorfología
 - b) Índice máximo de licuación (LSI)

GRADO II

La diferencia con el método de Grado I radica en que, en el Grado II se incluyen datos de fuentes públicas y privadas, es decir, se tienen datos aún no publicados. Además, en ellos se puede manejar información obtenida de fotografías aéreas, estudios de campo e incluso, entrevistas con residentes locales.

1. Criterio Geológico y Geomorfológico para evaluar la susceptibilidad a la licuación de arenas.
2. Método propuesto por *Youd y Perkins (1978)* en su artículo Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential.
3. Método propuesto por *Wakamatsu*.
4. Mapas basados en estudios geológicos y geomorfológicos de áreas específicas.

GRADO III

El grado III está basado en criterios de estudios geotécnicos de sitio y se apoyan en los criterios de Grado I y II. Sin embargo, éstos son más específicos y toman en cuenta características propias del sitio, siendo minuciosos, por ejemplo, se calcula la resistencia a licuación del depósito, o la resistencia máxima al esfuerzo cortante inducido por vibración o sismo, inclusive se hacen pruebas de penetración estándar.

1. Evaluación *in situ* de susceptibilidad a licuación tomando como base pruebas de penetración estándar.

- a) Procedimiento simplificado de *Seed e Idriss (1971)*.
- b) Procedimiento adoptado por Japanese Highway Bridge Code
- c) Criterio Chino para evaluación de la susceptibilidad a licuación.

2. Evaluación de efectos de licuación

- a) Daños en presencia de una capa no licuable.
- b) Índice del potencial de licuación

Con base en cualquiera de los métodos anteriores y teniendo en cuenta características propias de la situación y el lugar, es posible evaluar la susceptibilidad de un suelo a sufrir licuación.

Dependiendo del caso de estudio, la mayoría de los autores se inclinan por calcular la susceptibilidad de un área a presentar licuación haciendo modificaciones a tres métodos preexistentes, aclarando que no son los únicos, el cálculo del Índice Máximo de Licuación, el método propuesto por *Youd y Perkins (1978)* o el método propuesto por *Seed e Idriss (1971)*, recientemente, también se ha expandido el uso del cálculo de la velocidad de ondas *s* como indicador de posible licuación. Cabe aclarar que cada autor adapta el método de cálculo acorde al área y los datos con los que cuenta. A continuación se dará una breve explicación de estos métodos.

3.1 Índice máximo de licuación

El Índice Máximo de Licuación, llamado LSI por sus siglas en inglés (Liquefaction Severity Index), es un método de grado 1, de manera general es una medida del desplazamiento del suelo medido en pulgadas. Está basado en el desplazamiento lateral de depósitos deltaicos y fluviales del Holoceno (*Technical Comitte for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, 1993*).

Para seleccionar el ambiente geológico, el LSI se normaliza con respecto a las condiciones propias de cada sitio, principalmente el movimiento del terreno. El movimiento del terreno puede quedar en función de la aceleración pico del suelo o la velocidad pico del suelo, *A*, y la duración del movimiento, *D* (ecuación 3.1).

$$LSI = f(A, D) \quad 3.1$$

Donde *A* se atenúa logarítmicamente y *D* se incrementa con la distancia, además ambas se incrementan con la magnitud. Lo anterior sugiere que la ecuación del LSI está claramente relacionada con la distancia al epicentro y la magnitud de cada evento sísmico (ecuación 3.2). Éste parámetro puesto en un sistema de información geográfica proporciona un índice de posible desplazamiento máximo para una zona (en pulgadas).

$$LSI = g(M, \log R) \quad 3.2$$

Donde M es la magnitud y R el radio a la fuente de energía. Para evaluar esta hipótesis, *Youd (1987)* evaluó varios sismos en el oeste de Estados Unidos y en Alaska, tomando en cuenta estos dos factores.

El resultado fue la ecuación 3.3 en la que el logaritmo en base 10 es aplicado al LSI en lugar del radio de distancia. Si se analiza la figura 3.1, se puede ver que el LSI decrece conforme aumenta la distancia, suponiendo una M_w de 7.5.

$$\log(LSI) = -3.49 - 1.86 \log R + 0.98 M_w \quad 3.3$$

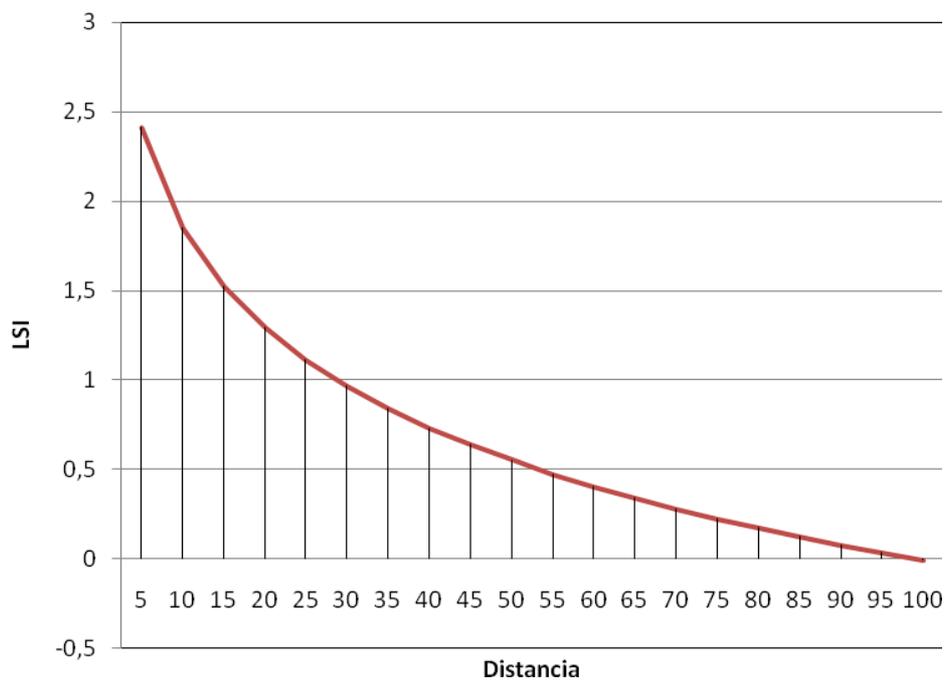


Figura 3.1 Se observa el decaimiento del LSI conforme aumenta la distancia al epicentro.

Youd (1987) propone los factores de deformación del suelo por licuación, que deberían tomarse en cuenta al calcular el LSI (tabla 3.1).

Tabla 3.1 Influencia de varios factores en la susceptibilidad de licuación, L, y la deformación permanente del suelo, X. Tomada de Youd (1987).

Factor	Influencia	Valor por LSI
Factores sismológicos		
Intensidad del movimiento	L y X incrementan con la intensidad.	-
Duración del movimiento del suelo	L y X incrementan con la duración del movimiento.	-
Factores sedimentológicos		
Espesor del estrato licuable	L y X generalmente incrementan con el espesor.	Mayor de 3 m.
Área de la zona susceptible a licuación	X generalmente incrementa con la extensión del área.	Capa continua bajo un área mayor.
Confinamiento del estrato por sedimentos impermeables	L y X incrementan con el drenaje lento.	No especificado.
Edad de los sedimentos	L decrece con la edad del sedimento.	Holoceno tardío.
Litificación y sedimentación	L y X decrecen con la litificación y cementación.	No cementado.
Modo de emplazamiento	L y X decrecen con altas energías en el emplazamiento.	Depósitos fluviales o de otro tipo por o en agua.
Factores topográficos		
Pendiente del terreno	L y X decrecen o incrementan dependiendo de si el sedimento es contractivo o dilatativo.	Pendientes de entre 0.5 y 5%.
Cercanía de la superficie libre	X generalmente incrementa con la cercanía de la superficie libre.	No especificado.
Factores hidrológicos		
Nivel freático	L y X decrecen con la profundidad del nivel freático.	Profundidad menor o en 3 m aproximadamente.
Presión artesisiana	L y X incrementan con la presión artesisiana.	Menor que 0.
Factores ingenieriles		
Tamaño de grano del sedimento	L es mayor en arenas limpias que en arenas sucias.	Suelos granulares no cohesivos.
Densidad relativa del sedimento	L y X decrecen con el incremento de la densidad o la resistencia a la penetración.	$2 < N_1 < 10$
Fábrica o empaque del arreglo	L se ve influenciada por el empaquetamiento o la fábrica.	No especificado.

3.2 Método propuesto por Youd y Perkins

Se trata de un método cualitativo en el que se requiere la compilación de dos mapas que arrojaran un tercero. El primer mapa consiste en áreas de posible fallamiento del suelo. El fallamiento del suelo es una función de la sismicidad del área y el radio de ocurrencia de un sismo de intensidad suficiente como para causarlo, esto en un área con materiales susceptibles a la licuación. Si se toma en cuenta un periodo de recurrencia de este tipo de fenómenos, se puede tener un mapa en términos de probabilidades. La información mínima requerida para hacer un mapa de posible fallamiento del suelo es la localización y frecuencia de la ocurrencia de sismos que igualmente tengan una magnitud y distancia desde su epicentro hasta las zonas en donde puede inducir licuación del suelo.

El segundo mapa es un mapa de susceptibilidad a fallamiento del suelo, éste se basa en la geología del lugar y la susceptibilidad de estos a presentar licuación. Es importante marcar las zonas más susceptibles a fallar como serían sedimentos mal graduados, de origen fluvial y perteneciente al Holoceno.

3.2.1 Mapa de Fallamiento del suelo

Youd y Perkins (1978) asumen que la relación de los ciclos de esfuerzos $\left(\frac{\tau}{\sigma_0}\right)$, y los ciclos de carga, N , pueden ser aproximados por la siguiente ecuación exponencial 3.4:

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_0}\right)^a N^b = c \quad 3.4$$

Donde a , b y c son constantes dependientes del tipo de suelo, y τ y σ_0 el máximo ciclo de esfuerzo de cizalla y la presión de confinamiento respectivamente. Igualmente se asume que $\left(\frac{\tau}{\sigma_0}\right)$ es una función de la amplitud del movimiento del suelo y que esta varía con la magnitud, M , y la distancia al punto origen del sismo, r , de acuerdo a la relación:

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_0}\right) = k_1 r^{-k_2} \exp(k_3 M) \quad 3.5$$

Donde k_1 , k_2 y k_3 son constantes. Esta relación magnitud-distancia es similar a otras dependientes de los parámetros de movimiento del suelo, como la de aceleración máxima o velocidad máxima. Además se supone que N es una medida de la duración del movimiento del suelo y varía con M y r , como otros parámetros de movimiento, por una relación de la forma:

$$N = m_1 r^{-m_2} \exp(m_3 M) \quad 3.6$$

Donde m_1 , m_2 y m_3 son constantes. Sustituyendo las ecuaciones 3.5 y 3.6 en 3.4 tenemos:

$$\left(\frac{\tau}{\sigma_0}\right)^a N^b = k_1^a m_1^b r^{-(ak_2+bm_2)} \exp[(ak_3+bm_3)M] \quad 3.7$$

Para un factor de atenuación y una respuesta del suelo dada, y condiciones de máxima distancia, R , hacia la superficie de puntos donde el movimiento del suelo es lo suficientemente fuerte como para causar licuación para parámetros específicos, suponiendo que $r = R$, se puede hacer una sustitución y aplicando logaritmos se llega a:

$$M = \frac{\log c - \log(k_1^2 m_1^2) + (ak_2 + bm_2) \log R}{(ak_2 + bm_2)} \quad 3.8$$

Agrupando constantes, se tiene:

$$M = C_1 + C_2 \log R \quad 3.9$$

Existe una relación lineal entre R y M , el logaritmo de la primera se incrementa con la segunda. Las constantes C_1 y C_2 varían con el factor de atenuación y las características del sitio.

El obtener R arroja como resultado el lugar geométrico más lejano de la fuente de energía en donde se podría presentar licuación, esto si existe una combinación de los ciclos de esfuerzos y los ciclos de carga ($\frac{\tau}{\sigma_1}$) y N con valores suficientes para inducir el fenómeno en estudio. Durante un sismo de magnitud M , se podría presentar licuación del suelo en un sitio determinado si la distancia que resulta es menor que R , en cambio, si es mayor podría no tener porque presentarse.

El mapa de fallamiento del suelo se hace de manera similar a uno de riesgo sísmico. Las fuentes sísmicas son divididas en áreas fuente y fallas, la actividad sísmica en ambos casos se considera constante. Se estima que la energía liberada durante un sismo en un área fuente se distribuye de manera uniforme sobre el área afectada. Para las fallas, cualquier sismo tiene una posición definida, pero en este caso se asume que su posición es toda la falla. Hay que puntualizar, que los autores suponen que la energía liberada durante un sismo dado no pasará más allá de la frontera del área o falla fuente donde ocurre.

Para un punto dado, la posibilidad de que falle el suelo debido a una fuente dada es calculada de la siguiente manera. Se calcula la distancia entre el punto a evaluar y el centro del área fuente, el cual representa el punto de energía liberada. Para cada rango de magnitudes dadas de la sismicidad de las áreas fuente se considera el valor medio de dicho rango. Observando una gráfica de M contra $\log(R)$, la distancia correspondiente a la magnitud central es mayor o menor que la distancia del punto central de la fuente al punto estudiado. Si es mayor puede ocurrir que falle el suelo con un sismo de tal magnitud y a esa distancia del epicentro, con lo que se suma dicho evento a una frecuencia acumulativa anual, f_c . Lo mismo se hace para todas las fuentes y fallas que pudieran afectar al punto de estudio, obteniéndose así una f_c total para el mencionado punto.

Para cada periodo T , el número de ocurrencias esperado está dado por Tf_c . Este número de ocurrencias puede ser tratado como el parámetro m de probabilidad discreta con distribución de Poisson, como sigue:

$$P(n) = \frac{m^n}{n!} e^{-m} \quad 3.10$$

Agregando el factor T , se tiene

$$P(0) = e^{-m} = e^{-Tf_c} \quad 3.11$$

con lo que se puede crear un mapa con 'periodos de retorno' para la ocurrencia de licuación.

3.2.2 Mapa de susceptibilidad a presentar agrietamientos y/o asentamientos

Este resulta más fácil de realizar que el mapa de fallamiento del suelo, *Youd y Perkins (1978)* proponen tomar en cuenta principalmente las características geológicas de la región de acuerdo a la tabla 3.2. En ella se presentan los factores a considerar acorde a la edad del depósito, ésta se divide en cuatro periodos. Se observa que los depósitos de menos de 500 años y aquellos correspondientes al Holoceno presentan una mayor susceptibilidad que aquellos del pleistoceno o prepleistoceno, quizá debido a un mayor asentamiento. Además, las zonas de playa o relacionadas con depósitos de ríos de baja energía son las que presentan mayor posibilidad de licuación.

Tabla 3.2. Susceptibilidad de suelos a sufrir licuación de arenas acorde a *Youd y Perkins (1978)*.

	DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS NO COHESIVOS	SUSCEPTIBILIDAD DE ACUERDO A LA EDAD DE DEPÓSITO			
		Menos de 500 Años	Holoceno	Pleistoceno	Pre Pleistoceno
DEPÓSITOS CONTINENTALES					
Canal de río	Localmente variable	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja
Llanura de inundación	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Abanicos y planos aluviales	Dispersos	Moderada	Baja	Baja	Muy baja
Terrazas y planos marinos	Dispersos	-	Baja	Muy baja	Muy baja
Delta y abanico-delta	Dispersos	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Lacustre y playa	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Bases de laderas	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Talud	Dispersos	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
Dunas	Dispersos	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Loess (depósito eólico)	Variable	Alta	Alta	Alta	Muy baja
Depósitos glaciares	Variable	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
Tuff (Roca compuesta de cenizas y polvo volcánico endurecido)	Raro	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
Tefra (material volcánico de precipitación)	Dispersos	Alta	Alta	?	?
Residuos sólidos	Raro	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
Sebka	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
AMBIENTES COSTEROS					
Delta	Dispersos	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja
Estuario	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Playa alta energía	Dispersos	Moderada	Baja	Muy baja	Muy baja
Playa baja energía	Dispersos	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Laguna	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Orilla de costa	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
AMBIENTES ARTIFICIALES					
Sedimentos no compactados	Variable	Muy alta	-	-	-
Sedimentos compactados	Variable	Baja	-	-	-

La combinación de un mapa con el reconocimiento de zonas geológicas susceptibles a licuación del suelo y el mapa de fallamiento darán como resultado un tercer mapa. Este último es el mapa de susceptibilidad de licuación, que era la relación que se quería encontrar.

3.3 Método simplificado de Seed e Idriss

Tomando en cuenta el tipo de suelo, la densidad relativa, la presión de confinamiento inicial, la intensidad del movimiento sísmico y su duración, *Seed e Idriss (1971)* proponen un método para evaluar la susceptibilidad de un suelo a licuarse. A continuación se explicara brevemente en qué consiste.

Después de establecer todas las condiciones de suelo y del supuesto evento, se determina el tiempo que duran los esfuerzos de cizalla a que este es sometido a diferentes profundidades.

Considerar los ciclos de esfuerzos provocados por el sismo como si fueran uniformes, además de graficarlos en función de la profundidad. Para ello se considera la intensidad del movimiento del suelo, la duración temporal del evento y la variación de los esfuerzos de cizalla con la profundidad de interés.

Tomar muestras de estratos a diferentes profundidades en el área de interés. Someter estas muestras a pruebas de compresión tomando en cuenta las presiones de confinamiento iniciales en campo. Tomando en cuenta los ciclos de esfuerzos provocados por el sismo, calcular en laboratorio un número de ciclos similar o aproximado a este que provoquen la licuación de la muestra. Para ello deben considerarse factores como el tipo de suelo, condiciones de emplazamiento y condiciones iniciales de esfuerzo efectivo.

Para comparar los esfuerzos de cizalla del sismo con los requeridos para causar licuación, determinar los depósitos en que se espera que pueda ocurrir licuación. Si se tratan esfuerzos diferentes a varias profundidades, se puede hacer un análisis de la respuesta del suelo.

Dentro de este método, los autores exponen una forma simple de evaluar los esfuerzos inducidos por un sismo, como se explica a continuación.

En teoría, los esfuerzos de cizalla actuantes en cada punto de un depósito de suelo durante un sismo, aparecen justo cuando las ondas de corte atraviesan dicho depósito. Si la columna de suelo sobre un elemento de este a una profundidad h se comporta como un cuerpo rígido y la aceleración máxima en la superficie del suelo es a_{max} , el máximo esfuerzo de cizalla en el elemento de suelo sería dado por:

$$(T_{max})_y = \frac{\gamma h}{g} a_{max} \quad 3.12$$

Donde, γ es el peso del suelo y las otras variables han sido explicadas previamente. Como la columna de suelo se comporta como un cuerpo deformable, el esfuerzo de cizalla actuante a una profundidad h , $(T_{max})_d$, al ser determinada mediante análisis de respuesta de este, debería ser menor que $(T_{max})_y$, y puede ser expresada como:

$$(T_{max})_d = \gamma_d (T_{max})_y \quad 3.13$$

Donde γ_d es un coeficiente de reducción del esfuerzo, con valores menores a 1. Las variaciones de $(T_{max})_d$ y $(T_{max})_y$ son generalmente como se muestran en la figura 3.2.

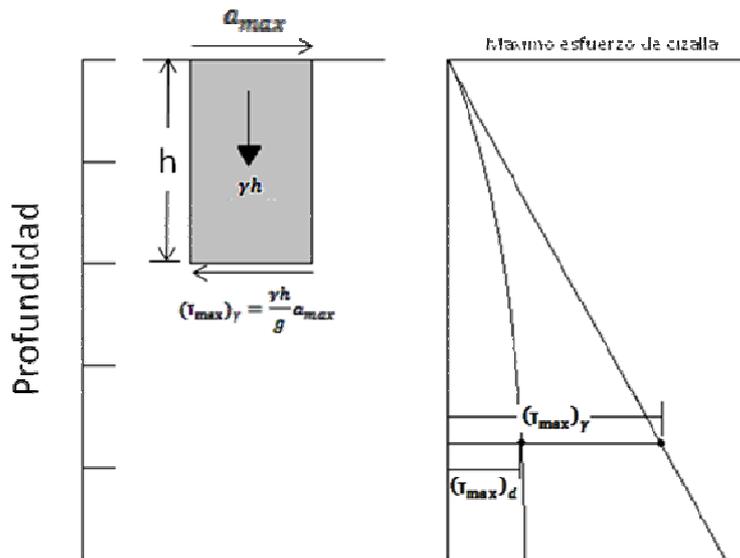
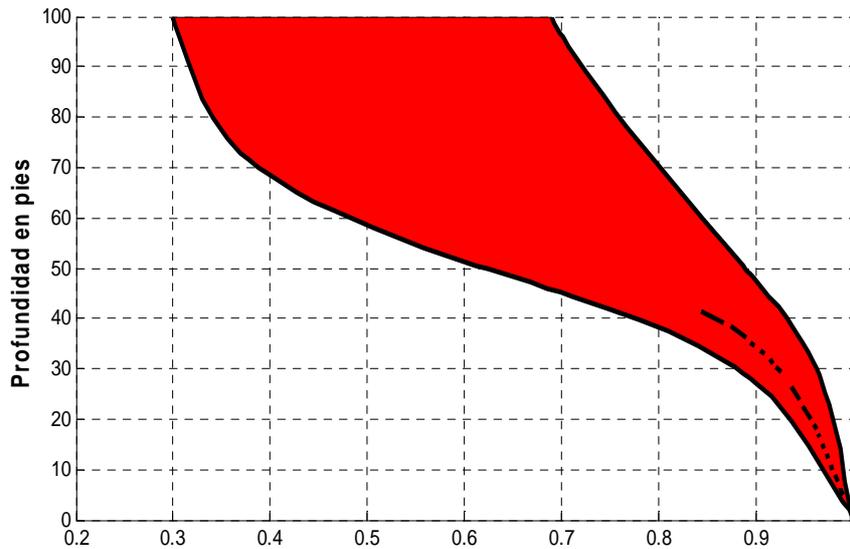


Figura 3.2 Variación de los esfuerzos de cizalla con la profundidad. Modificada de Seed e Idriss, 1971.

Calculando varios valores para γ_d para una variedad de eventos y condiciones de suelo compuestos de arenas a una profundidad de unos 16 m se demuestra que γ_d falla dentro del rango de valores que se muestra en la figura 3.2 para una profundidad de unos 15 m, un cálculo aproximado y razonable del máximo esfuerzo de cizalla que actúa durante un sismo se podría expresar mediante la relación:

$$(\tau_{\max})_{\gamma} = \frac{\gamma h}{g} a_{\max} \gamma_d \tag{3.14}$$

Donde los valores de γ_d son tomados de la línea discontinua de la figura 3.3. La profundidad crítica para el desarrollo de licuación, si es que se presenta, debería estar dada regularmente por la profundidad arrojada de esta relación.



$$\gamma_d = \frac{(\tau_{max})_d}{(\tau_{max})_v}$$

Figura 3.3 Rango de valores de γ_d para diferentes tipos de suelos. Modificada de Seed e Idriss (1971).

Después de varias pruebas, se llega al resultado de que para fines prácticos, el ciclo de esfuerzos de cizalla puede ser expresado por:

$$\tau_{av} \approx 0.65 \times 0.95 \times \frac{\gamma h}{g} a_{max} \quad 3.15$$

3.4 Velocidad de onda de corte

El caso de la determinación de una correlación entre la velocidad de la onda de corte (VSW por sus siglas en inglés) y la susceptibilidad de un suelo a licuarse puede obtenerse a partir de una prueba *in situ*, o de una prueba de laboratorio. El fundamento de esta prueba es que “tipos de suelos iguales deben tener similar velocidad de onda de corte cuando se encuentran en condiciones análogas”, Tokimatsu y Uchida, 1990.

Las propiedades elásticas pueden ser relacionadas con la resistencia a la licuación ya que incluye un comportamiento plástico, esto es porque la presión de poro generada durante la licuación está gobernada por el característico cambio de volumen del suelo en un pequeño ciclo de esfuerzos de cizalla. A su vez, el cambio de volumen depende de la fábrica del suelo y su densidad, y por lo tanto, del módulo de corte elástico (Yunmin y Ren-peng, 2005, Tokimatsu y Uchida, 1990, Kayabali, 1996).

Tokimatsu y Uchida (1990), haciendo uso de artículos de otros autores, define el módulo de corte elástico como:

$$G_0 = AF(\rho)(\sigma'_v)^n \quad 3.16$$

En donde σ'_m es la media efectiva de la presión de confinamiento en kgf/cm^2 y definido por $(1 + 2K_0)(\sigma'_v/3)$, siendo σ'_v la presión de confinamiento vertical efectiva y K_0 es el coeficiente de tierra en reposo, n es una constante de aproximadamente 0.5, A es una constante que refleja la fábrica del suelo y se obtiene a partir de varios registros de esfuerzos y tensiones y es asignada en un rango de valores entre 500 y 900. Por último, $F(e)$ es una función de la relación de vacíos, e , que puede estar dada por la redondez de los granos del suelo, la ecuación 3.17 lo describe mejor:

$$F(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e) \quad 3.17$$

Cuando diferentes tipos de suelo están involucrados se debería corregir G_0 , tomando en cuenta la presión de confinamiento el módulo de corte normalizado sería:

$$G_N = G_0 / [F(e_{min})(\sigma'_m)^n] \quad 3.18$$

En donde G_0 es el módulo de corte elástico, $F(e_{min})$ es una función que define la relación mínima de vacíos y σ'_m la medida efectiva de la presión de confinamiento. La eficiencia del módulo de corte normalizado puede explicarse como sigue:

$$G_N = A[F(e)/F(e_{min})] \quad 3.19$$

Teniendo el valor correcto de G_N se puede emplear una metodología simple para encontrar la relación entre la velocidad de onda de corte, V_s , y la resistencia a licuación a determinada profundidad en un sitio. De acuerdo a *Tokimatsu y Uchida (1990)*, se pueden seguir los siguientes pasos para encontrar esta relación:

- Determinación del módulo de corte elástico, basado en la velocidad de onda de corte en el sitio:

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad 3.20$$

En donde ρ es la densidad de masa.

- Evaluación del módulo de corte normalizado, a partir de la ecuación 3. 18 con información referente al esfuerzo efectivo y el radio mínimo de vacío del suelo.
- Evaluación de la relación de esfuerzos a causa de licuación en condiciones de prueba triaxial, $(\sigma_d/2\sigma'_0)$, para un número de ciclos específico.
- Conversión del radio de esfuerzo a causa de licuación para condiciones de campo K_0 , (τ_1/σ'_v) :

$$(\tau_1/\sigma'_v) = \gamma_s \frac{1 + 2K_0}{3} (\sigma_d/2\sigma'_0) \quad 3.21$$

donde γ_s es el factor representativo de los efectos de movimiento multidireccional con un valor entre 0.9 y 1.

La prueba SWV es la que mejor representa las propiedades dinámicas del suelo, incluso por encima de pruebas como la de SPT o CPT (*Kayabali, 1996*). Es mejor que estas porque:

- a) La existencia de partículas del tamaño de gravas no influye demasiado en el resultado.

- b) Es una prueba no destructiva.
- c) Se puede realizar en campo y en laboratorio, lo que permite llevar y comprobar los resultados de uno a otro.

Aunque también presenta limitaciones como:

- a) La poca adquisición de datos en campo para establecer una correlación entre la SWV y la susceptibilidad a licuación de un área.
- b) La SWV se hace en intervalos largos de 1 m o más.
- c) No se pueden tener muchas muestras de suelo cuando se realiza esta prueba.

Capítulo 4

Ejemplo de aplicación simplificada del cálculo del peligro de licuación por sismo en la República Mexicana, empleando un SIG

4.1 Definición de SIG

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta de uso reciente, fundamentada en el uso de datos espaciales para la resolución de problemas, actualmente se aplica en un gran número de disciplinas, la complejidad de los problemas científicos y la tecnología, hacen que el rango de soluciones sea variable. *Peña (2006)* define los SIG como “la unión de información y herramientas informáticas (programas o software) para su análisis con objetivos concretos. Por otra parte, al incluir el término ‘Geográfica’ se asume que la información es espacialmente explícita, es decir, incluye la posición en el espacio.”

Los SIG son usualmente vistos como generadores de mapas, pero en general sirven en la solución de problemas concernientes al mundo real. *Longley (2005)* propone que las metas en la solución de problemas empleando un SIG son:

- Ubicación racional, efectiva y eficiente de recursos, teniendo en cuenta un criterio establecido.
- Monitoreo y entendimiento de la distribución espacial de atributos.
- Entender las diferencias entre lugares, y qué características son inherentes a cada uno.
- Entender procesos de ambientes humanos y naturales.
- Prescripción de estrategias para mantenimiento y conservación ambiental.

En el área de las Ciencias de la Tierra, las aplicaciones son muy diversas, por ejemplo:

- Seguir gráficamente la trayectoria de un huracán.
- Representar la geología de un área.
- Ubicación espacial de sismos.
- Prevención de riesgos.
- Ubicación de yacimientos y sus características.
- Representación espacial de pozos petroleros, gaseoductos, etc.

Para representar todo éste tipo de eventos, es necesario el manejo de datos, sin embargo, no todos ellos cuentan con las mismas características. En los SIG existen dos tipos estructuras de datos fundamentalmente, los que se emplean en formato raster y los que se manejan en formato vector. Las características principales de estas estructuras son que tienen un sistema de referencia espacial, se manejan en capas de acuerdo a lo que se quiera representar, se les asigna una escala adecuada acorde con el trabajo a realizar y además se asigna una proyección cartográfica según lo que se quiera hacer con dichos datos.

Los datos espaciales en estructura de vector, son modelos de rasgo de una posición que como su nombre implica tienen una dirección y sentido determinado, se pueden representar como

puntos, líneas o polígonos. Los datos en estructura raster, son un modelo en rejilla de alguna posición, en donde cada pixel toma un valor o característica asignada.

En éste trabajo se emplearon datos en formato vector por la precisión puntual que se requiere para ubicar epicentros y límites definidos de estados y o municipios. Para el caso de mapas de pendientes se emplearan datos en formato raster.

4.2 Condiciones sismo-tectónicas de la República Mexicana

La sismotectónica de la República Mexicana es regida por la interacción de cuatro placas, las de Norteamérica, de Rivera, de Cocos y del Pacífico. Entre estas placas se distinguen fronteras transformantes, divergentes y convergentes. Sumada a la actividad entre placas se tiene un sistema de dislocaciones en el que los principales componentes son la apertura del Golfo de California, el sistema de fallas asociado a la falla de San Andrés en el norte del país y el sistema Polochic - Motagua al sur, en la zona de Chiapas (*Pardo y Suárez, 1995, Dewey y Suárez, 1991*).

Se puede analizar la sismotectónica a partir de las diferentes relaciones entre placas, teniendo así:

- Interacción Placa de Norteamérica – Placa del Pacífico. La interacción de estas placas se da en el norte de México, concretamente en el área del Golfo de California. El límite entre placas es de tipo transformante. La placa del Pacífico se mueve en dirección Noroeste con relación a la Placa de Norteamérica.
- Interacción Placa de Rivera – Placa de Norteamérica e interacción Placa de Cocos – Placa de Norteamérica. La zona de actividad de estas tres placas es dividida en cuatro regiones para su estudio por *Pardo y Suárez (1995)*, se basan en la sismicidad, los mecanismos focales y la geometría de las diferentes zonas. La división propuesta por estos autores es la siguiente:

Jalisco. Donde la Placa de Rivera subduce bajo la de Norteamérica en un ángulo semejante al que se presenta en la subducción de la Placa de Cocos bajo la del Caribe. En donde cabe destacar que la velocidad de subducción de la Placa de Rivera es anormal, incluso podría pensarse que es la de menor velocidad de convergencia en el mundo (hablando de placas con movimientos de subducción).

Región de Michoacán. En esta parte el ángulo de subducción de la Placa de Cocos respecto a la de Norteamérica decrece gradualmente hacia el sureste.

Región Guerrero – Oaxaca. Donde la subducción de la placa de Cocos es casi horizontal, acorde con los mismos autores.

Región Sur de Oaxaca – Chiapas. El ángulo de subducción aumenta gradualmente hasta llegar a una fuerte subducción en Centroamérica.

El régimen tectónico de la República Mexicana es casi completamente dominado por la subducción de la Placa de Cocos bajo la Norteamericana. La mayor concentración de sismos fuertes para el país se da en esta zona, como se aprecia en la figura 4.1.

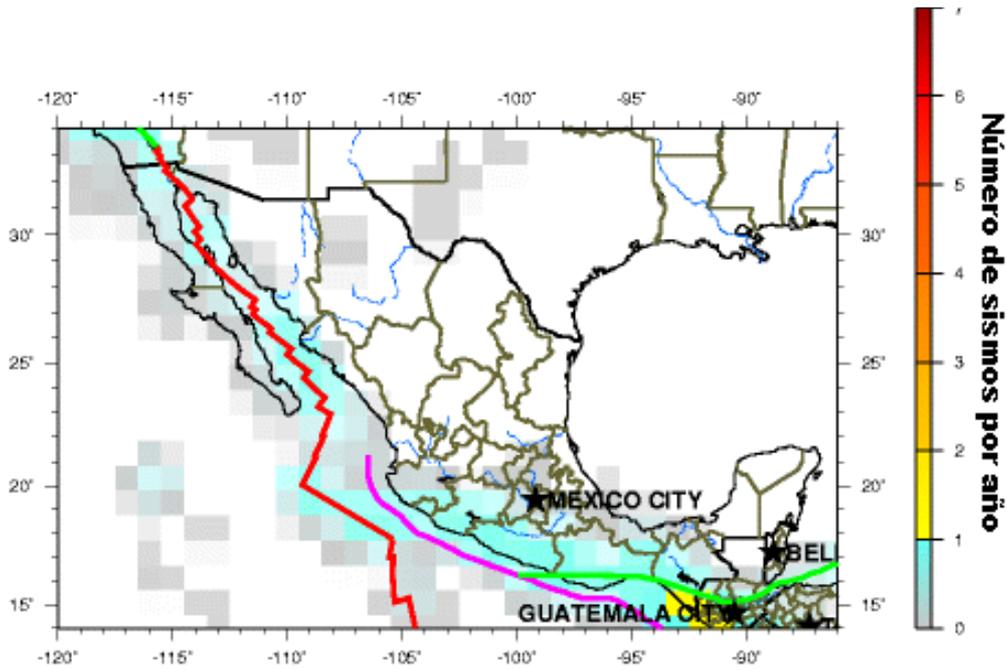


Figura 4.1. Sismos con magnitud 5.0 o más en México. En color morado las zonas de subducción, en rojo las de dorsales y en verde las de fallas transformantes. Modificado del SUGS.

En México los periodos de recurrencia para grandes sismos ($M_s > 7$) van de 30 a 75 años para sismos de $M \geq 8$ en las zonas de subducción (Singh, S. y Ordaz, M., --).

4.3 Metodología para la obtención de mapas de peligro por licuación del suelo

Uno de los avances más significativos de la Ingeniería Sísmica en el siglo XX ha sido el desarrollo de metodologías de estimación de la intensidad de movimiento sísmico en una región. Ciertamente no se puede predecir la ocurrencia de sismos, sin embargo, cualquier fenómeno sísmico puede modelarse a partir de estadísticas de eventos anteriores. Las consecuencias de estos eventos también pueden modelarse empleando probabilidad para estimar aceleraciones futuras del suelo en determinadas regiones.

Un aspecto importante para la obtención de efectos sísmicos es la llamada *peligrosidad sísmica*. La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un movimiento sísmico, debido principalmente a la interacción de placas tectónicas (Benito y Jiménez, 1999). Por fenómeno físico se puede entender agrietamiento, deslizamiento o licuación del terreno entre otros, generalmente este tipo de fenómenos tienen consecuencias adversas a la actividad humana.

Por otra parte, riesgo sísmico es toda aquella consecuencia física, social o económica que conlleva la ocurrencia de un sismo. De acuerdo a la UNESCO:

$$\text{Riesgo sísmico} = \text{peligrosidad sísmica} * \text{vulnerabilidad} * \text{valor económico}$$

Como puede verse, los conceptos de riesgo y peligrosidad sísmica se encuentran totalmente relacionados y para hacer mapas del primero es necesario estimar el segundo, además de la

vulnerabilidad, que debe ser valorada por el ingeniero. La forma de estimar los posibles efectos de un sismo de determinada magnitud y a cierta distancia es tomando en cuenta la respuesta del sitio durante eventos anteriores, con ello se podrían construir funciones de atenuación que permitan predecir futuros efectos ante eventos específicos.

En este capítulo se muestran una serie de mapas de la República Mexicana de peligro por licuación del suelo. Para hacerlos se tomaron en cuenta características geotécnicas y geomorfológicas generales. Cabe destacar que para la utilización de dichos mapas debe considerarse que se trata de un marco general y que los datos no fueron tomados en campo, la mayoría de ellos se obtuvieron de manera teórica.

La metodología para la obtención de estos mapas en un SIG puede estructurarse como se muestra en la figura 4.2. Las etapas de desarrollo se destinaron principalmente a la obtención de pendientes y aceleraciones del suelo para posteriormente relacionarlas con la geología y propiedades físicas características de ciertos lugares.



Figura 4.2. Fases para la obtención de mapas de peligro por licuación del suelo debido a un sismo

- Despliegue de mapa de la República Mexicana.
- Búsqueda de información bibliográfica. Tomando como referencia artículos de la Sociedad Mexicana de Suelos, la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica y el Instituto de Ingeniería (UNAM), se pudo hacer una lista con los eventos más importantes de licuación del suelo en la República Mexicana. En la tabla 4.1 se muestran los datos más importantes de dichos eventos. A partir de ésta tabla se realizó

una representación gráfica de las zonas que presentaron licuación del suelo en un mapa de los municipios (tabla 4.1) de todo el país, como se muestra en la figura 4.3.

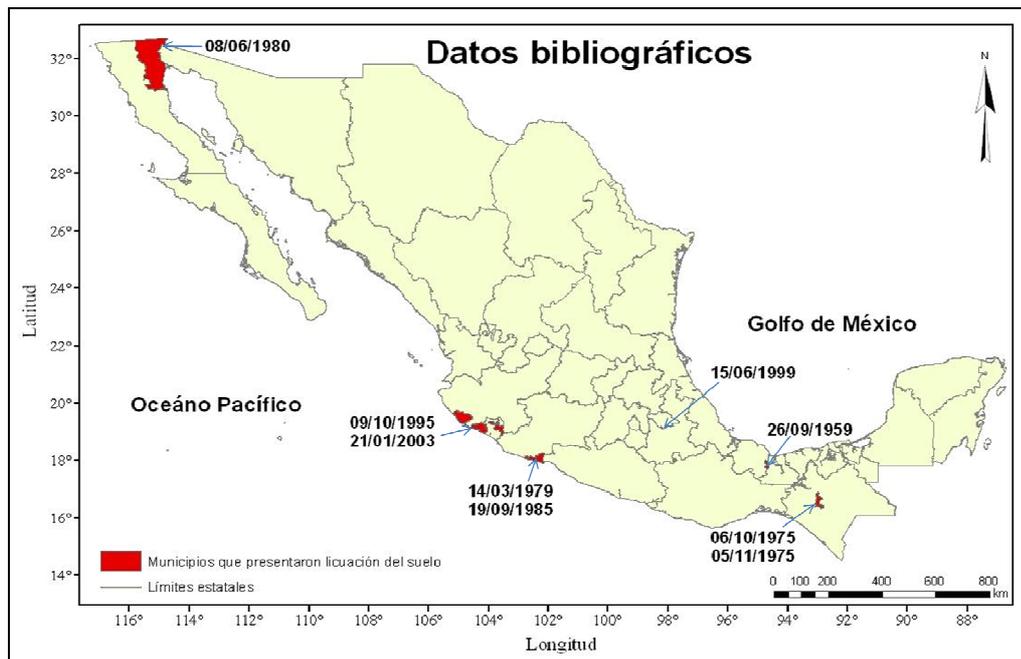


Figura 4.3 Mapa de municipios en los que se ha presentado licuación del suelo (tabla 4.1), datos obtenidos a partir de bibliografía.

- Análisis de propiedades geológicas y geotécnicas en un mapa de la República Mexicana con información obtenida de una base de datos de INEGI. Se tomaron en cuenta criterios geológicos cuantitativos, haciendo uso de la tabla realizada por Youd y Perkins (1978), publicada recientemente en el *Manual for Zonation on Seismic Hazards (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, 2003)*. A ésta tabla se le agregó una columna con el tipo de sedimentos que se encuentran en cada depósito, tabla 4.2. Además, se tomó en cuenta la composición de ciertas rocas incluidas en la base de datos, y en algunos casos, el contenido de finos, tablas 4.3 y 4.4, con lo que se añadió una columna a la base de datos, en la que 1 indica riesgo de licuación alto y 2 riesgo de licuación menor. En la tabla 4.5, se muestra la litología referida en la base de datos y la columna que fue aumentada a la misma (ID).

Tabla 4.1. Datos de casos de licuación del suelo en la República Mexicana

Municipio o Región	Estado	Fecha	Sismo	Longitud (sismo) W	Latitud (sismo) N	Magnitud	Profundidad (km)	Distancia al epicentro (km)	Aceleración máxima del suelo en g	Consecuencias visibles
Jáltipan	Veracruz	26/09/1959		-94.43	18.26	6.4	21		0.2	Daños a cimentación de tres edificios de la marina, desplazamientos horizontales de tramos de los muelles.
Jaluco	Jalisco	09/10/1995	Manzanillo 1995	-104.205	19.055	8	33	< 60	0.2	Eyecciones de arena a través de grietas, roturas de tuberías y drenaje, asentamientos de casas y hundimientos y agrietamientos de pisos
Manzanillo	Colima	09/10/1995	Manzanillo 1995	-104.205	19.055	8	33	< 60	0.2	Desplazamiento lateral de taludes y el hundimiento de piso conllevando a la ruptura de pavimento y tuberías
Lázaro Cárdenas	Michoacán	14/03/1979		-101.263	17.75	6.5		<60	0.3	
Lázaro Cárdenas	Michoacán	19/09/1985	Michoacán 1985	-102.94	18.08	8.1		<60	0.4	
Valle de Mexicali	Baja California	08/06/1980	De Victoria 1980			6.1	15	< 10	0.4	Presencia de grietas y volcanes de arena
Chiapa de Corzo	Chiapas	06/10/1975, 05/11/1975				4.8/5.6	2.5/5	< 10	0.3	Grietas y volcanes de los que salía arena y agua, así como desplazamientos laterales
Valle Puebla – Tlaxcala (Xicohtzingo)	Tlaxcala	15/06/1999	Tehuacán 1999	-97.47	18.2	6.7	92	140	0.28	Flujo de arena limosa y oscura a través de grietas y volcanes
Manzanillo/Villa de Álvarez/Colima	Colima	21/01/2003	Tecomán 2003	104.6	18.22	7.6	10		0.3	Asentamiento del suelo y desplazamiento lateral, levantamiento, hundimiento y/o agrietamiento de bloques de concreto del piso; agrietamiento y/o deformación en pavimento y aceras

- Cálculo de las pendientes a partir de la topografía, empleando un programa realizado por la División de Ingeniería Sismológica del Instituto de Ingeniería. De acuerdo a *Allen et al (2007)*, intuitivamente, las variaciones topográficas debieran ser indicadores de primer orden de la litología y geomorfología de la superficie cercana. Así, al encontrar montañas podremos relacionarlas con roca firme, superficies planas de poca variación altimétrica serán relacionadas con suelos y las zonas de altitudes o variaciones intermedias se relacionaran con otro tipo de rocas. Teniendo en cuenta que la licuación del suelo no se presenta en sitios con roca firme, estos se descartaran automáticamente para el análisis de mapas. En las figuras 4.4 a 4.10 se pueden observar los mapas de variaciones de pendientes relacionadas con los municipios donde se tienen registros de licuación del suelo y la geomorfología de dichas zonas.
- Cálculo de aceleraciones máximas del suelo a partir de un programa del Instituto de Ingeniería, basado en lo propuesto por *Pérez y Ordaz (2008)*. Estos autores proponen la subdivisión de la República Mexicana en cuarenta y tres fuentes de sismos con cuatro posibles orígenes: sismos de subducción, sismos de profundidad intermedia por fallas normales, sismos poco profundos de la corteza continental y sismos del sistema de fallas Polochic – Motagua. Además, proponen que cada una de estas fuentes genera sismos con una relación constante por unidad de área.

La actividad de cada una de las fuentes sísmicas es especificada en términos de la relación de excedencia de las magnitudes generadas con anterioridad. Después de tener la relación de actividad de todas las fuentes, es necesario conocer los daños que estas producen en cada sitio específico. Para ello se emplean ecuaciones que relacionan magnitud, distancia fuente – sitio e intensidad, conocidas como leyes de atenuación. Estas consideran que las intensidades sísmicas de interés son las ordenadas del espectro de respuesta (pseudo - aceleraciones, 5% del damping crítico).

A partir del hecho de que la atenuación es diferente para diferentes frecuencias de onda, *Pérez y Ordaz (2008)*, proponen el uso de tres leyes de atenuación según sea el caso, sismos costeros (propuesta por *Ordaz, 1989*), sismos de profundidad intermedia (citado por *Pérez y Ordaz, 2008* y propuesta por *García, et al., 2005*) y sismos superficiales (citado por *Pérez y Ordaz, 2008* y propuesta por *Abrahamson y Silva, 1997*). Los autores hacen énfasis en el hecho de que aún con todos estos datos no se puede considerar que el cálculo de atenuación en cada punto sea determinístico, debido a que no está libre de incertidumbres. Por ello, consideran que la intensidad se puede suponer una variable aleatoria con distribución log normal y mediana m .

Una vez que se conoce la sismicidad de cada fuente y la atenuación en cada punto, el peligro sísmico se puede computarizar sumando los efectos de todas las fuentes y tomando en cuenta la distancia de cada fuente al punto que se quiere analizar.

- Conjugación de mapas de datos bibliográficos, mapas de litología, mapas de pendientes y mapas de aceleraciones máximas del suelo de la República Mexicana para encontrar zonas susceptibles a presentar licuación, figuras 4.4 a 4.10. Se aprecia la relación entre los mapas en cada figura.

Tabla 4.2. Susceptibilidad de suelos a sufrir licuación acorde a Youd y Perkins (1978).

	DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS NO COHESIVOS	SUSCEPTIBILIDAD DE ACUERDO A LA EDAD DE DEPÓSITO				
		Menos de 500 Años	Holoceno	Pleistoceno	Pre Pleistoceno	Tipo de Sedimentos
DEPÓSITOS CONTINENTALES						
Canal de río	Localmente variable	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja	Arena gruesa a limos
Llanura de inundación	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	Desde grava (extremos) hasta arena fina, limo y arcillas (centro)
Abanicos y planos aluviales	Dispersos	Moderada	Baja	Baja	Muy baja	Grava-finos
Terrazas y planos marinos	Dispersos	-	Baja	Muy baja	Muy baja	Gravilla-limo
Delta y abanico-delta	Dispersos	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	Arena, limo y arcilla
Lacustre y playa	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	Arenas de gruesa a fina dependiendo de la edad
Bases de laderas	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	Gravas-limos
Talud	Dispersos	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja	Arenas gruesas-finas, bien graduado
Dunas	Dispersos	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	Arenas de tamaño medio y uniforme
Loess (depósito eólico)	Variable	Alta	Alta	Alta	Muy baja	Arenas de tamaño medio y uniforme
Depósitos glaciares	Variable	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja	Grava-finos
Tuff (Roca compuesta de cenizas y polvo volcánico endurecido)	Raro	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja	Toba formada desde ceniza (<2 mm) a otros (<64 mm)
Tefra (material volcánico de precipitación)	Dispersos	Alta	Alta	?	?	2 mm o menos (ceniza) a más de 64 mm (tobas)
Residuos sólidos	Raro	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja	
Sebka	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	Arenas-limos
AMBIENTES COSTEROS						
Delta	Dispersos	Muy alta	Alta	Baja	Muy baja	Arena, limo y arcilla
Estuario	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	Arcillas
Playa alta energía	Dispersos	Moderada	Baja	Muy baja	Muy baja	Arenas gruesas-finas
Playa baja energía	Dispersos	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	Arenas finas
Laguna	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	
Orilla de costa	Localmente variable	Alta	Moderada	Baja	Muy baja	Arenas gruesas-finas
AMBIENTES ARTIFICIALES						
Sedimentos no compactados	Variable	Muy alta	-	-	-	
Sedimentos compactados	Variable	Baja	-	-	-	

Tabla 4.3. Contenido de finos y composición de rocas de las que se tiene registro en la base de datos empleada.

ROCA	CONTENIDO DE FINOS O COMPOSICIÓN
Lutita-arenosa	>50%
Arenisca-lutítica	<50%
Arenisca-limosa	<50%
Limo-arenisca	>50%
Travertino	Composición yeso-calcita
Caliche	Costra formada por gravas, halita y sulfatos

Tabla 4.4. Clasificación de arenas de acuerdo al tamaño de partícula y condiciones necesarias para que ocurra el fenómeno de licuación de arenas

CLASIFICACIÓN DE ARENAS DE ACUERDO AL TAMAÑO DE PARTICULA			CONDICIONES ESPECIALES	
Arenas	Gruesas		Depósitos del Holoceno Cf < 5% Cr < 60% Cu < 15 .05 <dm <1,5mm	
	Grano medio			
	Finas	Finas uniformes		
		Arenas limosas		
		Limos arenosos		
	Lutita arenisca			

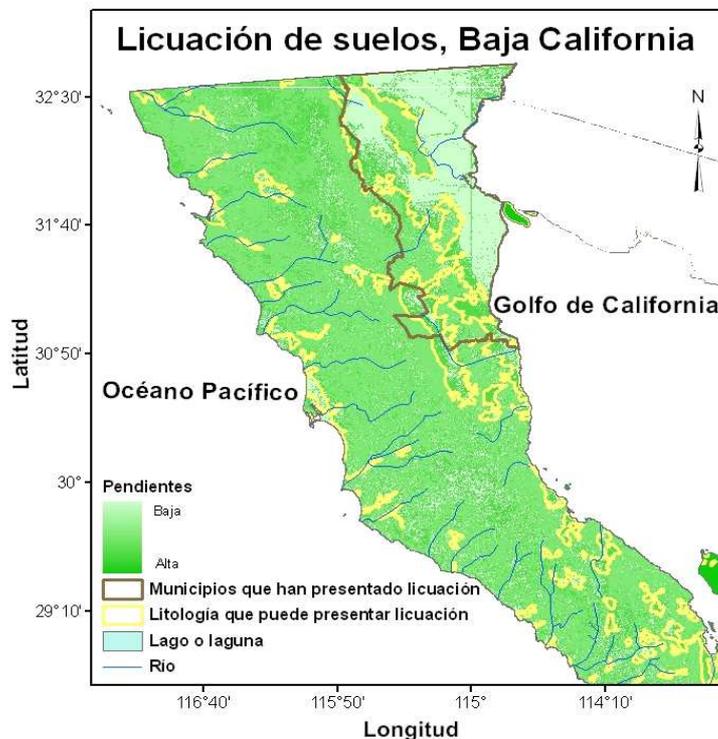
Tabla 4.5. Litología referida en la base de datos e ID que indica la susceptibilidad a que ocurra licuación del suelo.

ID	GEOLOGÍA SEÑALADA EN LA BASE DE DATOS
1	Areniscas
1	Vulcano sedimentarias
1	Areniscas conglomeráticas
1	Brecha sedimentaria
2	Limolita arenisca
2	Lutita arenisca

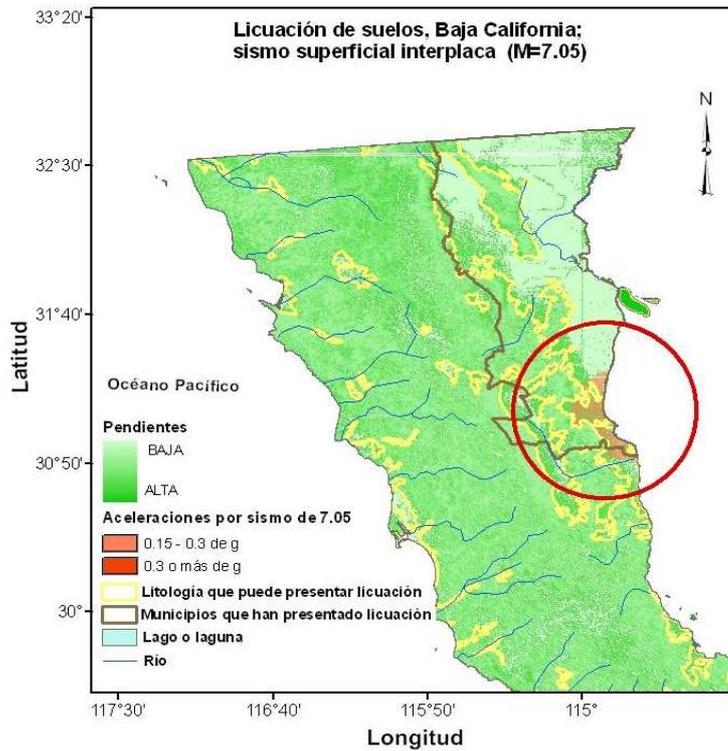
Como se puede observar en las figuras 4.4 a 4.10, los municipios que han presentado licuación del suelo durante sismos tienden a coincidir con cierto tipo de litologías sedimentarias, más específicamente con depósitos aluviales. Ahora bien, comparando las imágenes hechas a partir de datos bibliográficos y de litología con las correspondientes obtenidas para pendientes es evidente que algunas de las zonas marcadas con verde claro (correspondientes a zonas planas) de estas concuerdan con los sectores de interés en donde podría presentarse licuación del suelo. Sin embargo, al unir estos datos con los de aceleraciones del suelo para diferentes eventos, se observa que las zonas que podrían presentar licuación disminuyen.

Para el caso de Baja California, es evidente que los sectores marcados con pendientes favorables para que se presente licuación del suelo (figura 4.4a, en verde claro) abarcan un área mayor a aquella correspondiente a la litología (figura 4.4a, zona en enmarcada en amarillo) que se supone susceptible a éste fenómeno. Aunado a ello, si se toma en cuenta que el fenómeno de licuación se vuelve a presentar en lugares donde ya lo hizo antes, dichas áreas de estudio se pueden reducir aún más a los municipios en donde se ha documentado éste fenómeno (figura 4.4a, sector delimitado en café), aunque ello no implica que el fenómeno no se va a presentar en otros sectores. Correlacionando la información de la litología, la aceleración y las pendientes (figura 4.4b) se puede hacer una delimitación de las áreas en las que se debería hacer estudios de campo para calcular el índice de licuación.

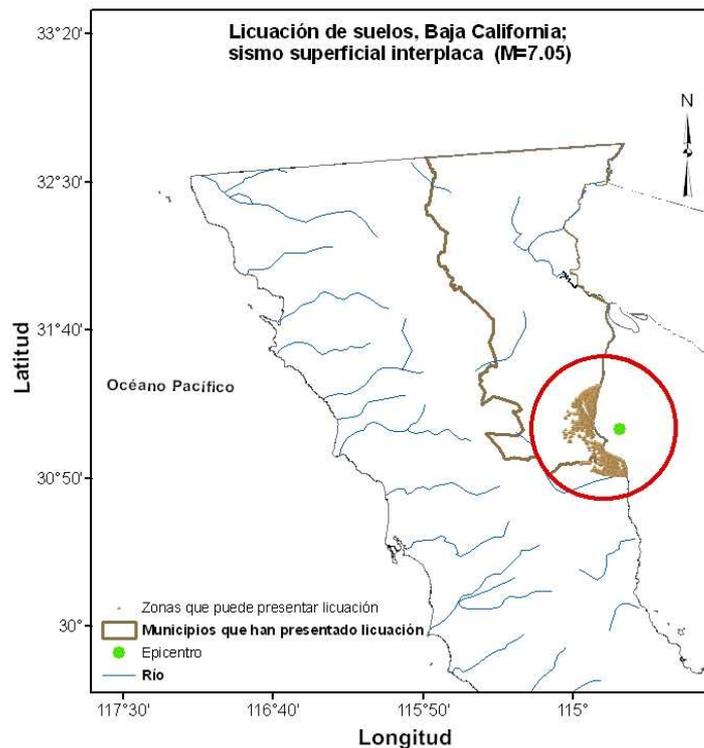
En las figuras 4.4b y 4.5a se hace un análisis para eventos de $M=7.05$ y $M=6.01$, respectivamente, se tomó en cuenta aceleraciones, litología (en un radio de 80 km del epicentro) y pendientes. En las figuras 4.4c y 4.5b se observa el resultado de dichas correlaciones, el área más afectada se encuentra en la parte sur del municipio de Mexicali, sin importar que la magnitud de los eventos sea diferente. Esto implica que en caso de planear asentamientos humanos en dicha área, deberían hacerse estudios de campo para realizar trabajos de mejoramiento del suelo.



a

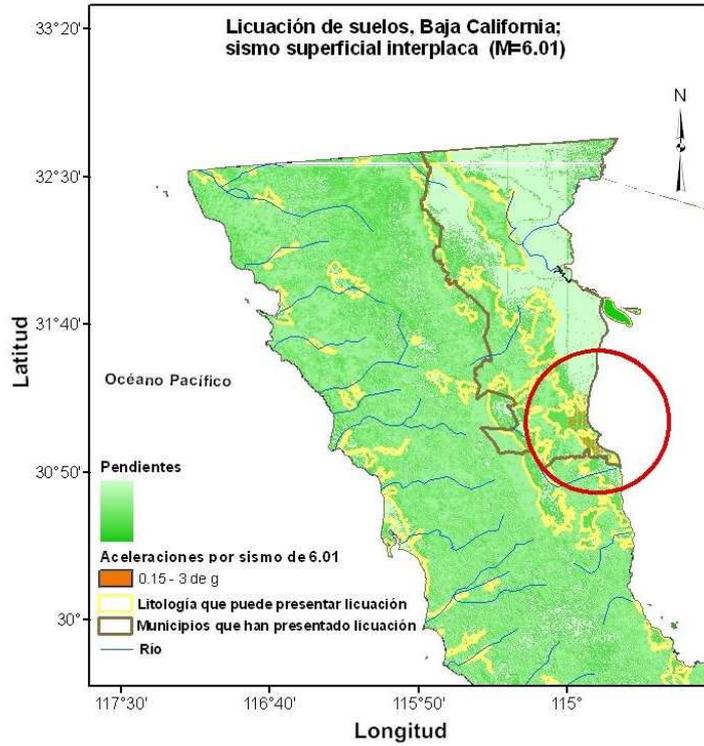


b

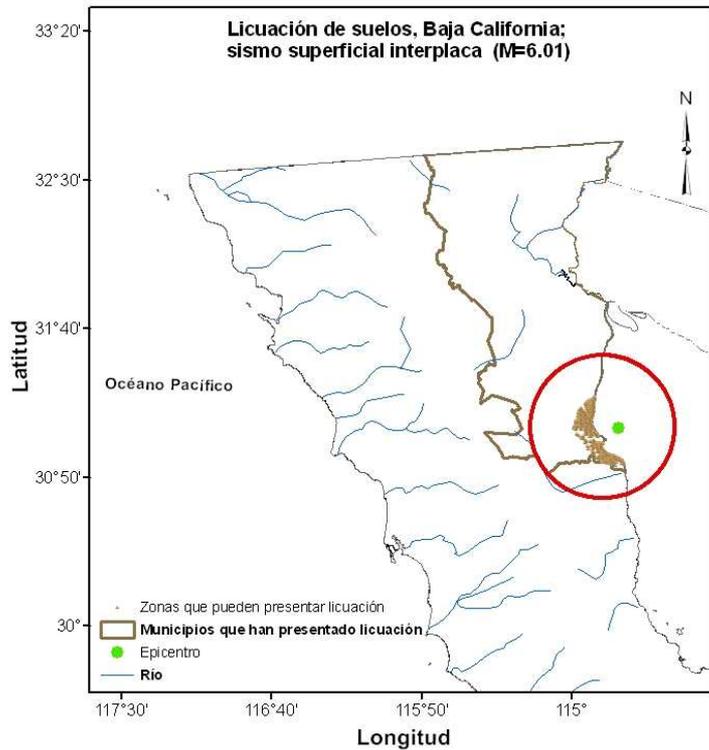


c

Figura 4.4 a) Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes del municipio de Mexicali .b) Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M= 7.05, estas últimas se presentan en el área delimitada por el círculo rojo. c) Zonas susceptibles a licuación en el estado de Baja California, datos obtenidos de la intersección de litologías, aceleraciones mayores a 0.15 de g (por un evento de M=7.05) y pendientes.



a

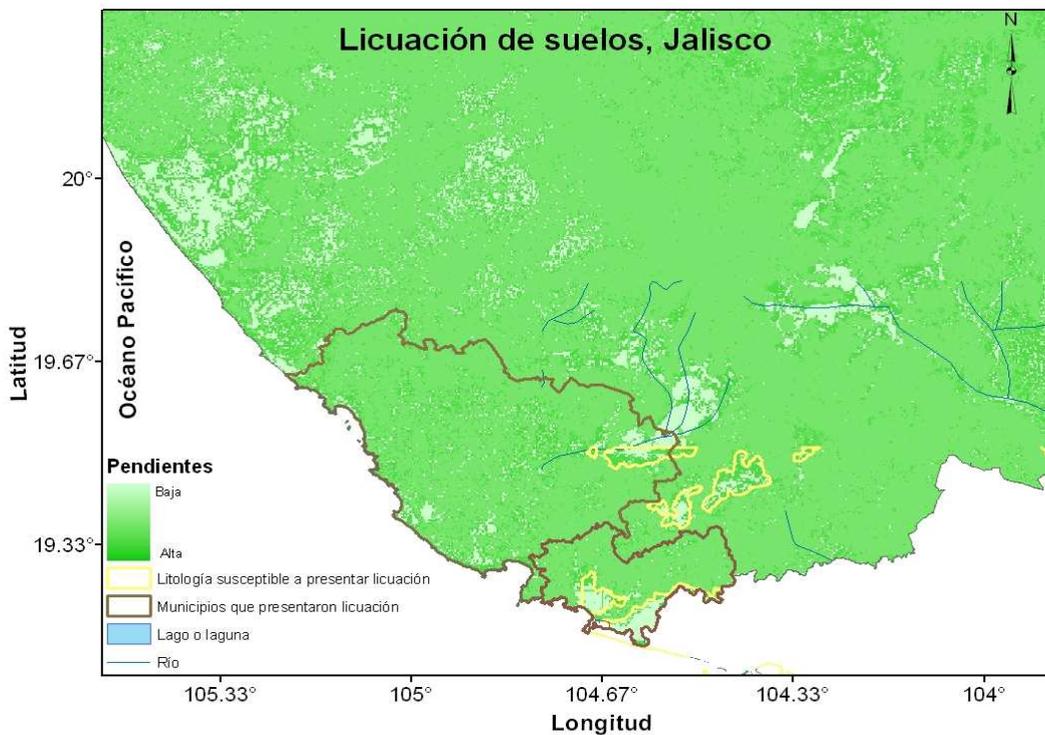


b

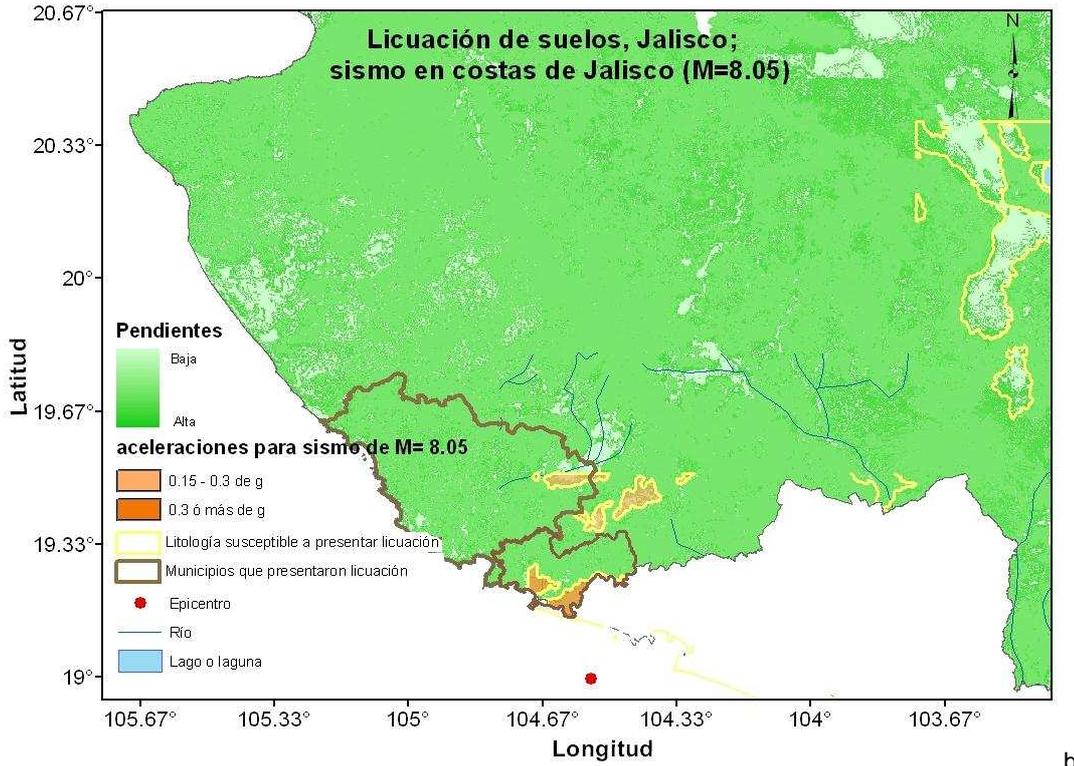
Figura 4.5 a) Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de $M=6.01$, estas últimas se presentan en el área delimitada por el círculo rojo. b) Zonas susceptibles a licuación en el estado de Baja California, datos obtenidos de la intersección de litologías, aceleraciones mayores a 0.15 de g (por un evento de $M=6.01$) y pendientes.

Para Colima y Jalisco, se tiene bien documentado el fenómeno de licuación del suelo, principalmente para la zona de Manzanillo, como se podrá apreciar en el capítulo 5 de éste mismo trabajo. Sin embargo, en otros municipios como Colima y Villa de Álvarez, Colima o La Huerta, Jalisco (figura 4.6a), al observar que durante los sismos de Manzanillo (1995) y Tecomán (2003) se presentaron problemas por licuación del suelo se vuelve necesario el análisis detallado de zonas con depósitos sedimentarios recientes. Como se puede observar en las figuras 4.6b y 4.7b, las pendientes favorables para que se presente el fenómeno de licuación se aprecian por toda la zona de la costa y parte del centro y noreste del estado de Colima y gran parte del sector centro de Jalisco, lo que vuelve complicado el análisis. Sin embargo, al conjuntar estos datos con los referentes a litología se encuentra que a pesar de que la zona de Colima sigue siendo un problema de análisis, el caso de Jalisco es diferente, las coincidencias de litología y pendientes necesarias para que se dé licuación del suelo solo se aprecian en la parte sur del estado.

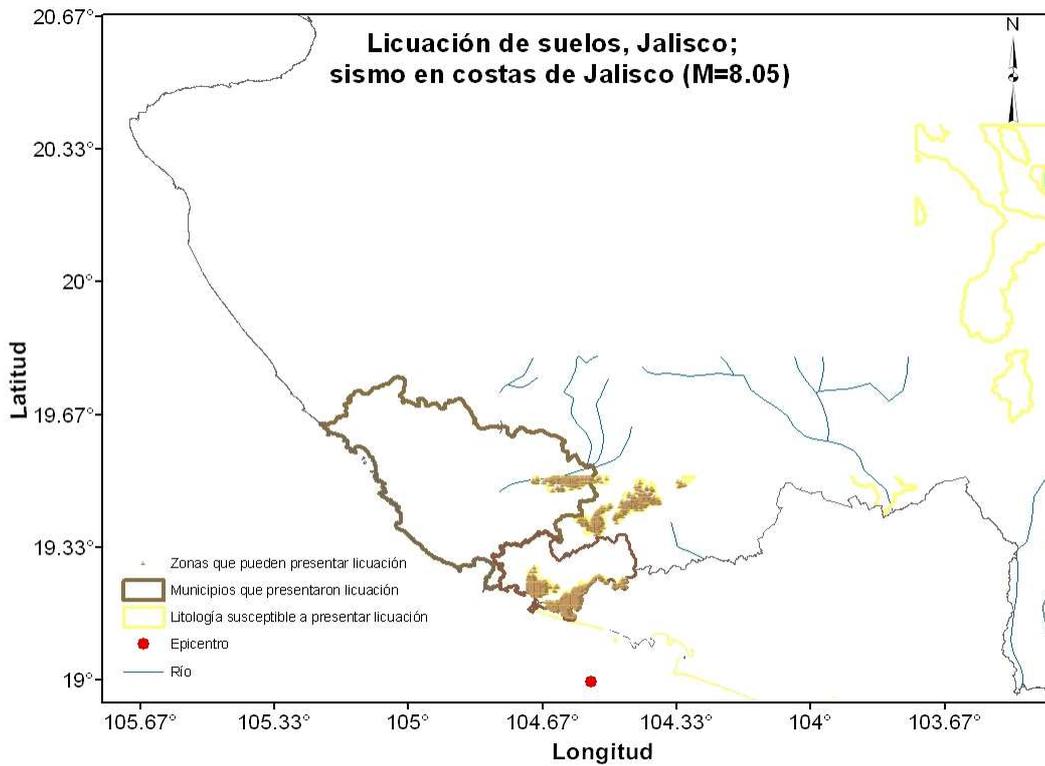
Suponiendo eventos de magnitud 7.5 o mayores y con epicentro entre los dos estados, se advierte que la zona más afectada será la del municipio de Manzanillo y sólo en cierta medida se podrían presentar daños en la parte sur del estado de Jalisco (figuras 4.6c y 4.7c).



a

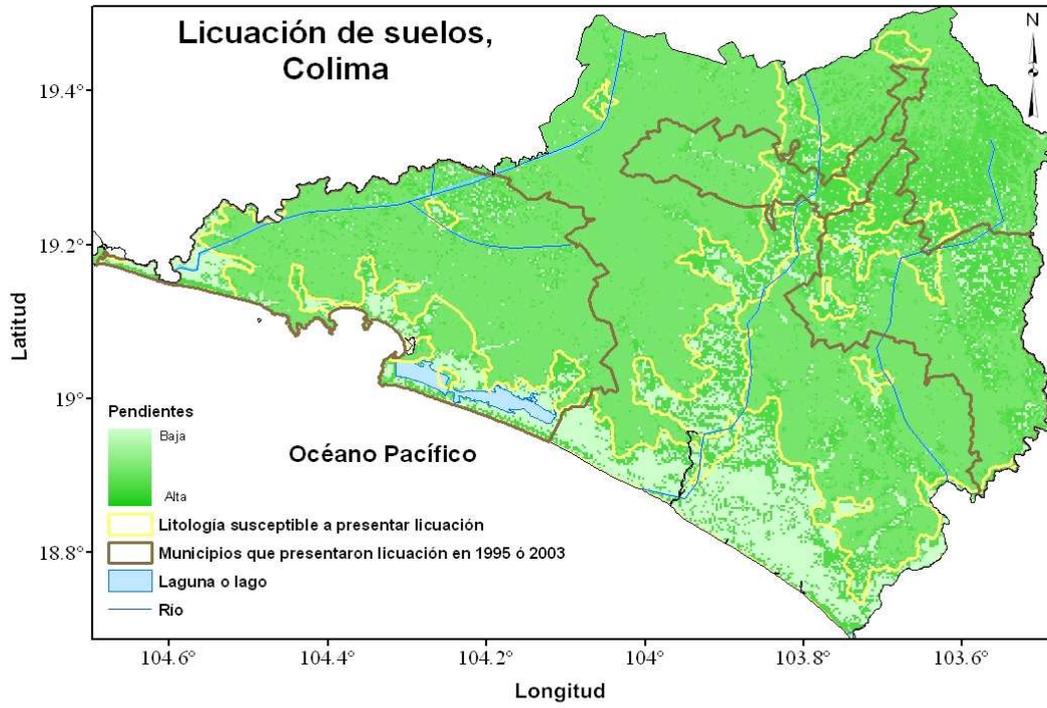


b

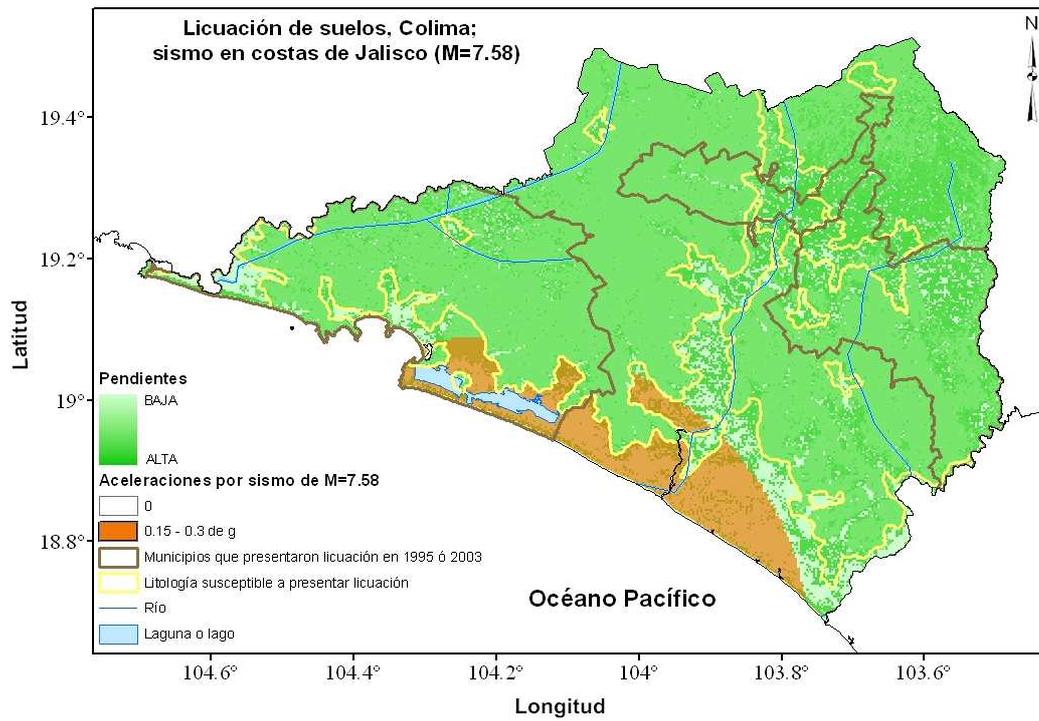


c

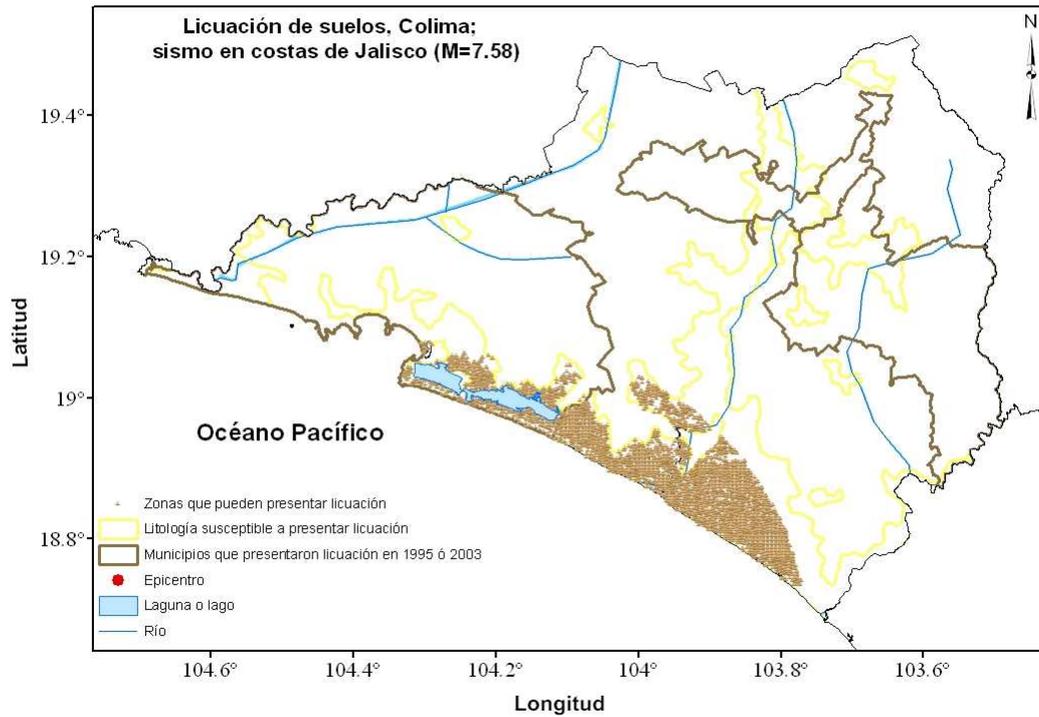
Figura 4.6 a) Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona sur de Jalisco .b) Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M= 8.05. c) Zonas susceptibles a licuación obtenidos de la intersección de litologías, aceleraciones mayores a 0.15 de g (por un evento de M=8.05) y pendientes.



a



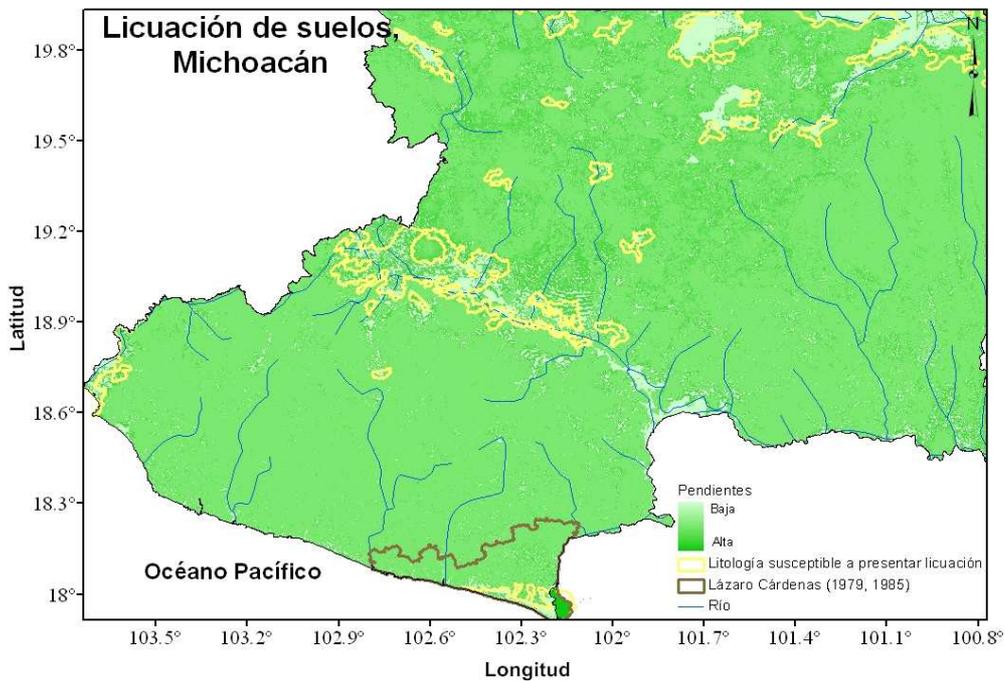
b



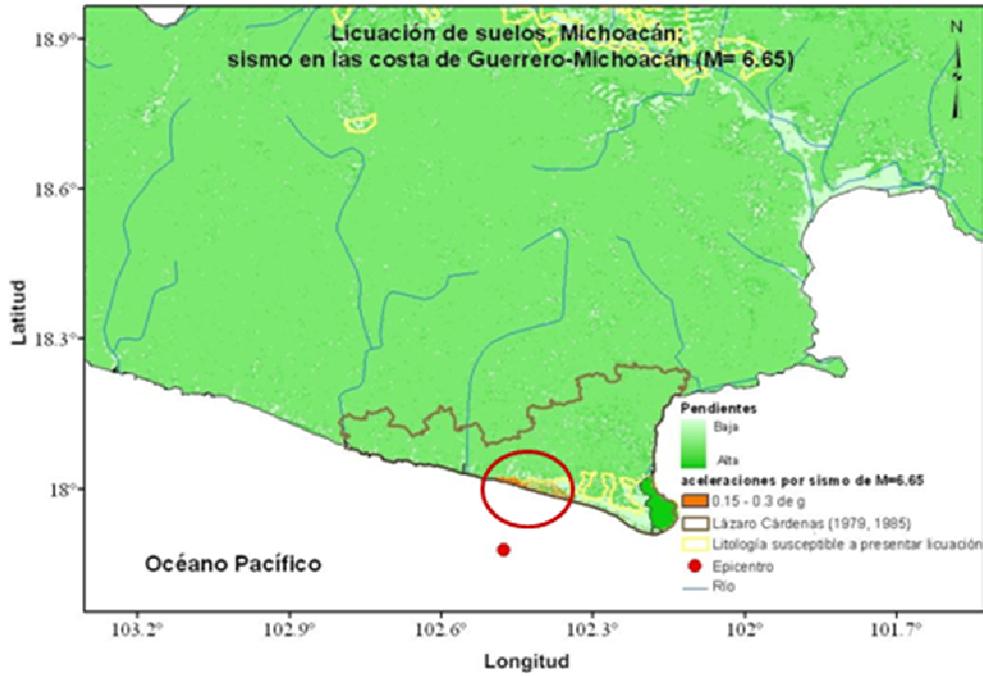
C

Figura 4.7 a) Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona de Colima. b) Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de $M=7.58$. c) Zonas susceptibles a licuación obtenidos de la intersección de litologías, aceleraciones mayores a 0.15 de g (por un evento de $M=7.58$) y pendientes.

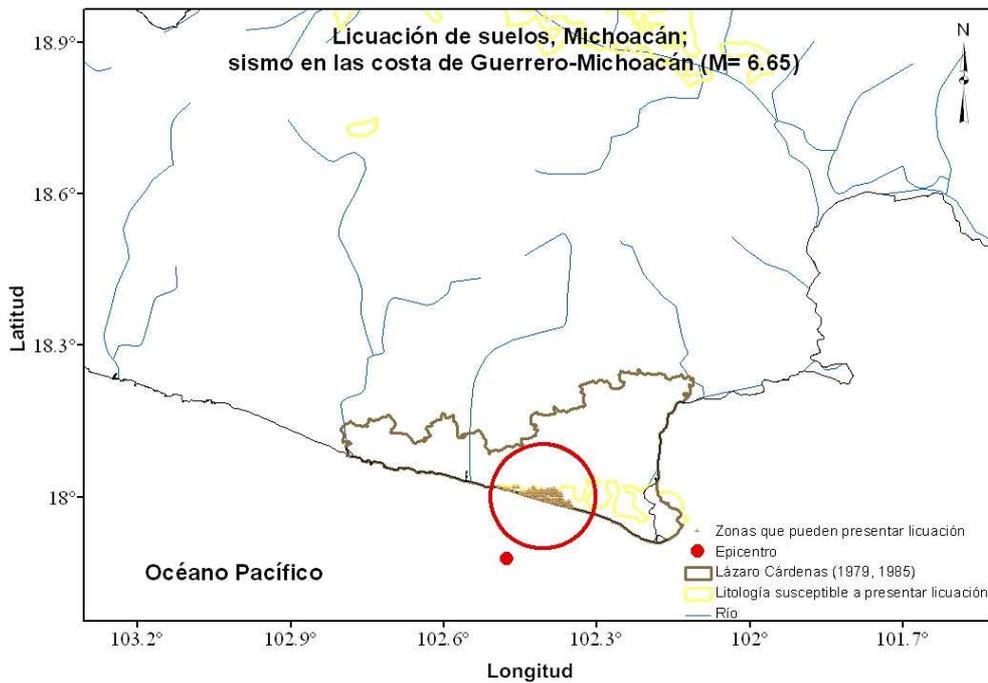
Observando la figura 4.8a correspondiente a eventos documentados, litología y pendientes del estado de Michoacán, es evidente que la única zona en la que se reúnen las condiciones necesarias para presentar licuación del suelo se dan en el extremo suroeste del estado. Éste territorio es geográficamente coincidente con el municipio de Lázaro Cárdenas, en donde se tienen registros de licuación del suelo en el puerto en los años de 1979 y 1985, véase el capítulo 2. El fenómeno se presenta principalmente como consecuencia de una alta aceleración del suelo durante sismos (figura 4.7b), por un lado, debido a la cercanía con la zona de subducción de la Placa de Cocos bajo la Norteamericana y por otro, por la gran actividad tectónica que se da en la intersección de las Placas de Cocos, Norteamericana y de Rivera en el vecino estado de Colima. La figura 4.8c muestra las zonas que podrían verse afectadas durante un sismo con magnitud de 6.65 con epicentro a distancias no mayores de 80 km. En esta figura, nuevamente se advierte que la mayor coincidencia espacial de las características necesarias para que se presente licuación, se encuentra en el Puerto de Lázaro Cárdenas.



a



b



c

Figura 4.8 a) Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona de Michoacán. b) Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de $M=6.65$, estas últimas se presentan en el área delimitada por el círculo rojo. c) Zonas susceptibles a licuación (enmarcadas por círculo rojo), datos obtenidos de la intersección de litologías, aceleraciones mayores a 0.15 de g (por un evento de $M=6.65$) y pendientes.

Tlaxcala, siendo una zona catalogada de baja sismicidad, es un caso particular para analizar. Hipotéticamente, no debería presentarse el fenómeno de licuación del suelo, dado que la zona no presenta una aceleración de 0.15 g o más, como se aprecia en la figura 2.11, sin embargo, al presentarse una vez no puede asegurarse que no sucederá nuevamente. Por ello, se ha hecho una conjunción de los mapas de bibliografía, litología y pendientes (figura 4.9), pero las zonas de interés sólo son sugerencias para realizar estudios más detallados, en ningún caso se puede asegurar que sean lugares susceptibles a presentar éste tipo de fallamiento del suelo durante un sismo, a menos claro, que el epicentro sea tan cercano o la magnitud tan grande que provoque aceleraciones mayores a las esperadas para un sismo en la zona tectónicamente activa del país. Después de hacer simulaciones para cerca de 200 eventos con epicentros cercanos a los límites del estado, no se encontraron puntos que presentaran las aceleraciones necesarias para provocar licuación.

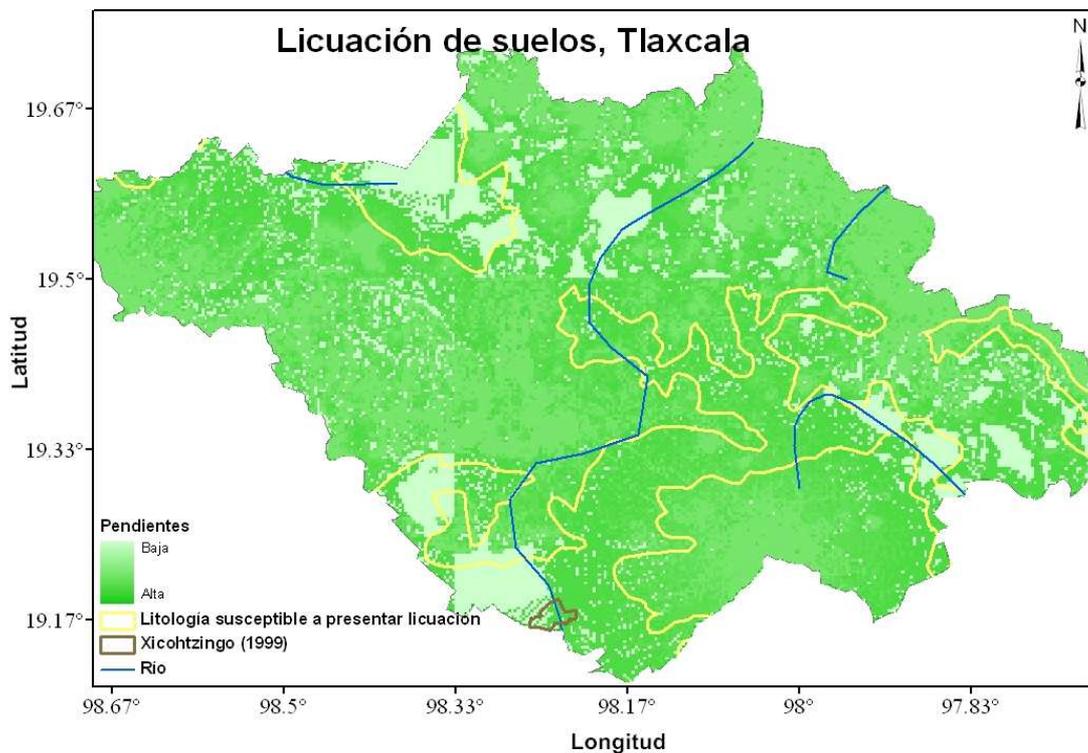


Figura 4.9 Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona de Tlaxcala

Analizando la zona de Chiapas (figura 4.10), se observan pendientes favorables para la licuación del suelo, pero al mirar detenidamente, las zonas coincidentes con la litología que permitiría éste tipo de fenómenos son mínimas. Se aprecia que dichas coincidencias se dan en la parte de la costa, pero cuando se agregan estas imágenes a la de posibles aceleraciones del suelo durante un sismo, la aceleración precisa para que se facilite la licuación del suelo (aprox. 0.3 g) teóricamente se presentaría en la parte sur y centro del estado, pasando el límite justamente sobre el municipio de Chiapa de Corzo, que es el caso que se tiene documentado, sin embargo, al hacer las simulaciones de varios eventos esto no sucede.



Figura 4.10 Mapa de datos bibliográficos, litología y pendientes de la zona centro de Chiapas.

Capítulo 5

El caso particular de Manzanillo, Colima

5.1 Ubicación del municipio de Manzanillo en el estado de Colima

El estado de Colima se localiza en la parte noroccidental del país, entre las coordenadas 18°41' y 19°31' latitud norte y 103°29' y 104°41' longitud oeste. Colinda al norte, este y oeste con Jalisco, al sureste con Michoacán y al sur con el Océano Pacífico.

En la costa suroeste del estado se encuentra la Bahía de Manzanillo, entre los 103°59' y 104°44' de longitud oeste y los 18°53' y 19°18' latitud norte, con altura sobre el nivel del mar de 4 m. De acuerdo a información del gobierno municipal, la superficie del municipio es de 1,578.4 km², por lo que Manzanillo constituye aproximadamente una cuarta parte del territorio del estado de Colima. Manzanillo colinda al norte con el municipio de Minatitlán, al este con los municipios de Coquimatlán y Armería, al sur con el Océano Pacífico y al oeste y noroeste con el Estado de Jalisco, como se observa en la figura 5.1.

Se puede llegar al municipio por las carreteras federales ruta México 110, Colima – Río Naranjo, entronque Colima – Tecomán, entronque Tecomán – Cerro de Ortega, ruta México 200 Costera del Pacífico, ruta México 054, Colima – Tonilla y Manzanillo - Minatitlán. Además se puede arribar por mar o por aire, ya que el municipio cuenta con un puerto y con el aeropuerto internacional 'Playa de Oro'.



Figura 5.1 Localización geográfica de Manzanillo, Colima.

5.2 Geología y Geotecnia

De acuerdo a la Carta Geológica de la República Mexicana, publicada por el *Servicio Geológico Mexicano (2007)*, Manzanillo se encuentra en la Provincia Geológica del Complejo Orogénico de Guerrero – Colima. Parte del municipio es atravesado por la Sierra Madre Sur.

El relieve está formado por sistemas de topoformas. Las principales minas explotadas son productoras de hierro y cobre, aunque también puede decirse que el municipio es prospecto en la extracción de mármol. Por otra parte, el suelo es en general de la era terciaria (50 a 60 millones de años), de acuerdo al *Ayuntamiento de Manzanillo en su Estudio Integral del Atlas de Riesgos para Manzanillo (2004)*.

Dentro del municipio de Manzanillo se encuentra la Bahía de Santiago, colindante con la Bahía de Manzanillo y en donde también se presentaron casos de licuación del suelo, principalmente en el evento de 1995.

Debido a la falta de datos precisos de la Bahía de Manzanillo, se tomaron en cuenta un estudio geomorfológico de la Bahía de Santiago que incluye algunas características del suelo, realizado por *Lancin y Carranza (1976)* para el Instituto de Geología de la UNAM y un estudio realizado por la empresa *ERN (2009)* previo a la posible construcción de una Planta Regasificadora y Terminal de Gas Natural Licuado (TGNL) en las inmediaciones de la C.T. Gral. Manuel Álvarez M, en Manzanillo, Colima.

De acuerdo a *Lancin y Carranza (1976)*, la pendiente de 3° del margen continental frente al puerto de Manzanillo se debe básicamente a la Trinchera Mesoamericana que forma una fosa marina con profundidad de cerca de 4762 m a solamente 70 km de distancia de Manzanillo, además de la ausencia de una verdadera plataforma continental.

La influencia de factores dinámicos en las características del suelo es importante, así por ejemplo, en toda la zona de Manzanillo se tiene un régimen de olas largas y altas que se amortiguan con la profundidad. Debido a la ubicación de la Bahía de Manzanillo, estos autores suponen que la dirección de las olas que entran en la bahía va de NW a W. Lo que implica influencia en las características geomorfológicas de la zona y por lo tanto en el tipo de suelo predominante.

De acuerdo a un mapa presentado por *Lancin y Carranza (1976)*, gran parte de la Bahía de Manzanillo presenta playas compuestas por guijarros, sin embargo igual se observan depósitos de estuario, de delta, lacustre, aluviales y zonas de pantano, estos últimos al oeste, colindantes con la Bahía de Santiago. Lo cual es relevante, ya que si se observa la tabla realizada por *Youd y Perkins (1978)* de suelos susceptibles a la licuación se puede observar que éste tipo de depósitos tiene susceptibilidad moderada o alta.

Por otra parte, *ERN (2009)* menciona la presencia de materiales arenosos en el lugar de estudio (parte oeste de la laguna de Cuyutlán). Aunque este tipo de suelos es potencialmente licuable, después de hacer estudios geofísicos (sísmicos y eléctricos) la misma empresa sugiere que dado que las aceleraciones promedio son menores a 6 gales, la zona es de bajo riesgo para obras civiles. Recordando que dicho estudio no es representativo de todo el municipio, se tomará en cuenta para cotejar con los resultados finales de este trabajo.

5.3 Características sismo-tectónicas

El marco tectónico del estado de Colima es complejo. Si se observa un mapa con las placas tectónicas de todo el mundo se encontrara la intersección de las placas de Cocos, Rivera y Norteamérica en el área del estado de Colima. En la trinchera Mesoamericana subducen las placas de Rivera y Cocos bajo la de Norteamérica (Suárez *et al.*, 1991). Una consecuencia del fenómeno de subducción es que en las zonas donde se presenta dicho fenómeno posiblemente ocurren los sismos más destructivos (Stern, 2002).

La placa de Rivera se genera en uno de los segmentos de la dorsal del Pacífico Oriental y subduce en su porción sureste en la trinchera Mesoamericana, bajo el Bloque de Jalisco que incluye parte de los territorios de los estados de Colima, Jalisco, Michoacán y Nayarit (Pardo y Suárez, 1993).

Los límites de la placa de Rivera son marcados al sur por la zona de fracturas de Rivera y la placa de Cocos, al oeste por la dorsal del Pacífico que la separa de la placa del Pacífico, al norte por la placa Norteamericana y finalmente, al este por la Trinchera Mesoamericana.

De acuerdo a Pardo y Suárez (1995) la Placa de Rivera subduce bajo la de Norteamérica en un ángulo semejante al que se presenta en la subducción de la Placa de Cocos bajo la del Caribe, con una velocidad anormal, incluso podría pensarse que es la de menor velocidad de convergencia en el mundo (hablando de placas con movimientos de subducción).

La placa de Cocos se genera también en la dorsal del Pacífico Oriental y subduce en la trinchera Mesoamericana desde Manzanillo hasta Centroamérica (Pardo y Suárez, 1993). Los límites de dicha placa están marcados al noreste por la trinchera Mesoamericana, al este por la zona de fractura de Panamá, al sur por la zona de rift de Galápagos y al oeste por la dorsal del Pacífico este (figura 5.2).

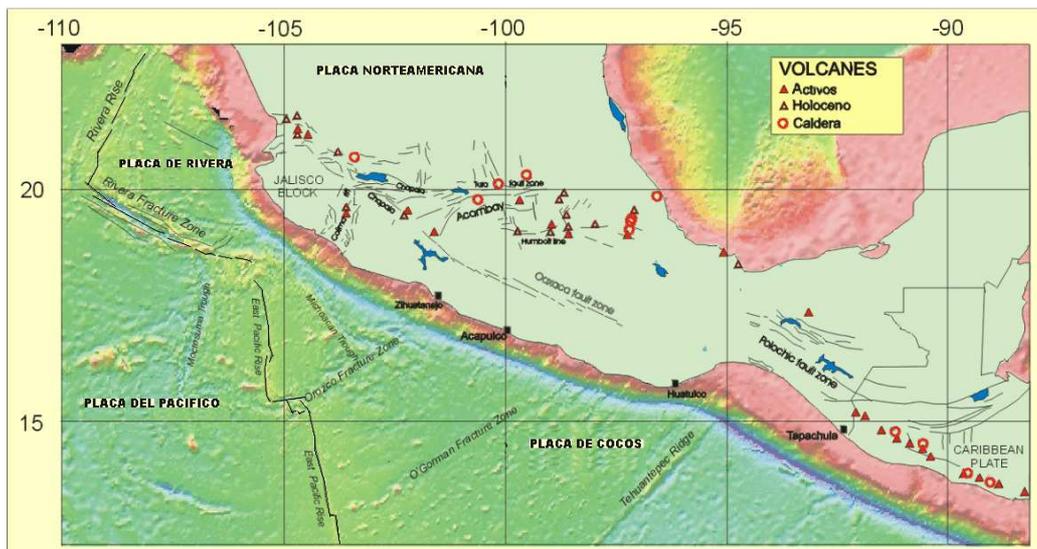


Figura 5.2 Se muestran los límites de la placa de Cocos obtenidos a partir de batimetría. Modificada de lacaeelel.igeofcu.unam.mx/.../mextec.html

La placa de Cocos subduce de manera progresiva hacia el sureste en la parte de Michoacán como se puede ver en la figura 5.3, en la parte de Guerrero - Oaxaca subduce casi horizontalmente, de acuerdo a *Pardo y Suárez (1995)*, y finalmente hacia la parte sur de Oaxaca y Chiapas la placa subduce de manera gradual hasta ser abrupta en Centroamérica. Cabe aclarar que aunque está no es la zona de estudio de éste Capítulo, la subducción de la placa de Cocos bajo la de Norteamérica rige un alto porcentaje de la sismicidad del país. En el caso de Colima la zona de Beniof se puede seguir hasta 150 km de profundidad (*SSN, 2003*).

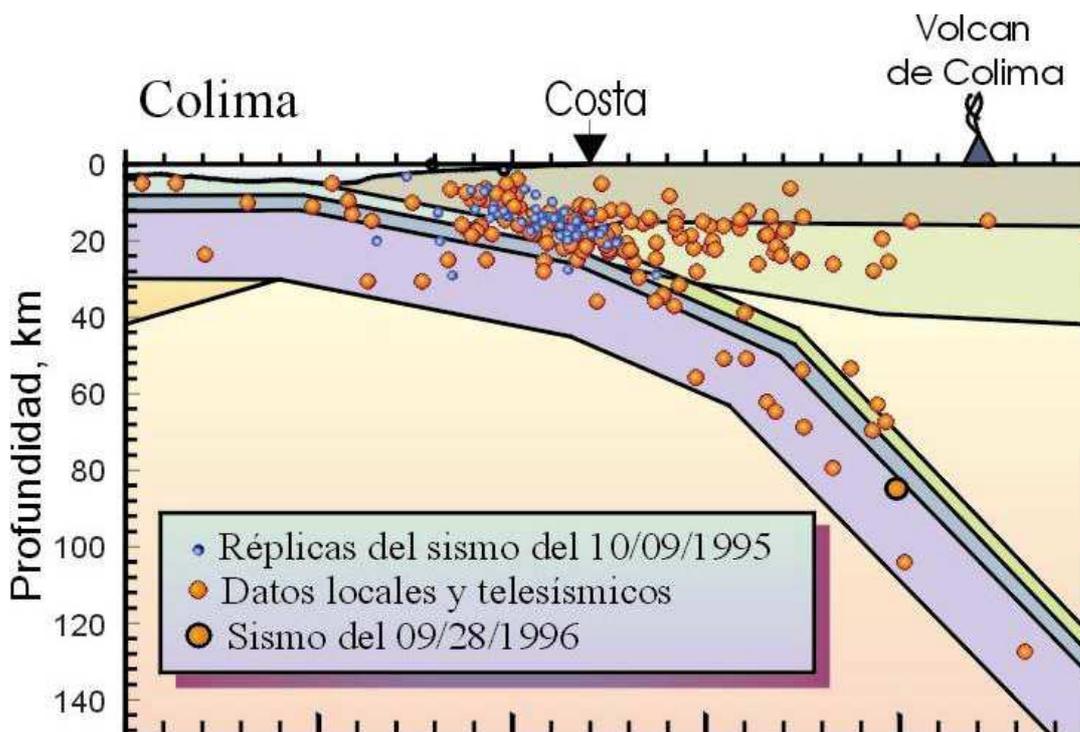


Figura 5.3 Se observa un modelo de la placa de Cocos subduciendo bajo la Norteamericana frente a las costas del estado de Colima, creado a partir de datos sísmicos de diferentes eventos. *SSN (2003)*

'El bloque de Jalisco está delimitado por la Trinchera Mesoamericana hacia el occidente, el graben de Colima en la parte meridional y el graben de Tepic – Zocoalco en la parte oriental, mientras el borde septentrional no ha sido delimitado con precisión' (*Rutz, --*). El graben de Colima continúa aparentemente, ya en la zona marítima, en las estructuras del graben de Manzanillo y El Gordo (*Bourgeois et al., 1989*), como se aprecia en la figura 5.4. De acuerdo a *Rutz (--)*, su anchura varía entre 20 y 60 km, el graben de Colima se divide en los siguientes sectores:

GraBen norte y central, con dirección norte-sur
 Sur del graben con orientación noreste-suroeste

Los graben parecen ser zonas de debilidad de la corteza terrestre, por lo que en ellos se genera actividad de tipo volcánica. En el graben de Colima ocurre el alineamiento volcánico de Volcán de Fuego – Nevado de Colima – Cántaro.

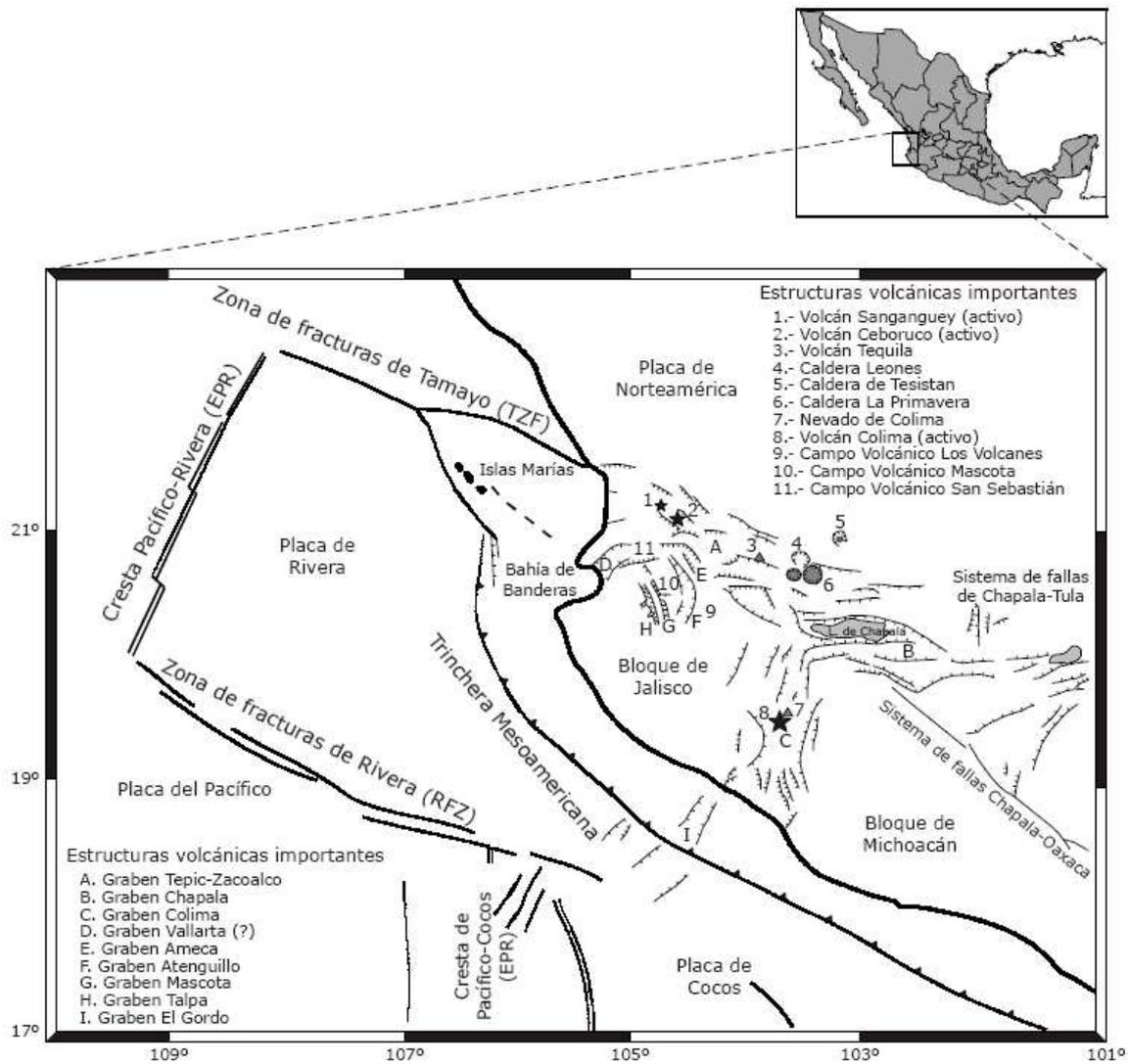


Figura 5.4 Límites del bloque de Jalisco donde se observan el graben de Colima y el graben El Gordo. Se aprecian también las principales estructuras volcánicas de la zona. (Rutz et al, 2004)

De acuerdo a estudios geofísicos realizados por *Bourgeois et al., 1989*, el graben de Manzanillo corresponde a la continuación marítima del graben de Colima. Además, el graben de Manzanillo continua por otro graben cortado por la Trinchera de Acapulco y la placa de Cocos (goben El Gordo), éste último limitado por la Falla Barra de Navidad.

Como se puede deducir a partir de estos datos, el estado de Colima y en particular el municipio de Manzanillo se encuentra en una zona tectónicamente activa. Lo que lo ha llevado a sufrir las consecuencias de su ubicación.

5.4 Licuación del suelo en Manzanillo

5.4.1 1995

Se conoce como efectos de sitio a la respuesta característica de un sitio ante un sismo, ya sea una variabilidad en la amplitud, contenido de frecuencias o duración de movimiento, que no se observa en la mayoría de las áreas circundantes. La licuación del suelo puede considerarse uno entre muchos de los efectos de sitio que se pueden presentar.

El 9 de octubre de 1995, se produjo una ruptura de placas (19.15° , -104.22°), propagándose dicha ruptura unidireccionalmente hacia $N70^{\circ}W$ por aproximadamente 150 km, acorde con *Courbulex et al.*, (1997). Éste sismo causó daños de gran magnitud, quizá los más severos fueron aquellos consecuentes de la licuación del suelo. Según datos del Global CMT de Harvard, la duración del evento fue de 19.4 s y su magnitud de M_s 7.3.

Dicho sismo puede considerarse tectónico debido al movimiento de las tres placas que se encuentran frente a las costas de Colima, anteriormente se habían registrado dos sismos de magnitud 8.2 y 7.8 en la escala de Richter en junio de 1932 (*Courbulex et al.*, 1997).

A consecuencia del evento de 1995, uno de los efectos de sitio fue la licuación del suelo, fenómeno que se presentó también en municipios circundantes a Manzanillo. En este trabajo se tratarán solo los daños relacionados con la licuación del suelo, dejando para otros estudios todos aquellos relacionados a otro tipo de fallas del suelo o estructuras.

De acuerdo a *EERI (2003)*, entre los casos reportados en el municipio se encuentran aquellos dentro del puerto Interior de San Pedrito. Sin embargo, *Carrillo (1997)* menciona que entre los efectos visibles de la licuación del suelo, se encuentran aquellos que se presentaron en la calle de Aldama; volcanes de arena, lodo y gas de unos 3 m de diámetro y 40 cm de altura con chorrillos de agua turbia de hasta 1 m de altura. Agregado a estos volcanes de arena, se observaron desplazamientos predominantemente de tipo normal y algunos pequeños flujos de terreno.

Teniendo en cuenta el reporte de isosistas escrito por *Carrillo (1997)*, otro municipio afectado fue el de Minatitlán, Colima. En él se registraron conos de 2 m de diámetro y 40 cm de altura con cráteres y grietas radiales en los jales de la mina de hierro, estos últimos se terminaron derrumbando. En Miguel Hidalgo y Rebalsillo, Jalisco, se documentaron grietas de las que salían chorros de arena, agua, lodo y humo.

5.4.2 2003

El 20 de Enero de 2003 a las 20:06:31 hrs., tiempo local, diferentes agencias registraron un sismo con epicentro a cerca de 30 km de las costas de Tecomán, Colima, México. El SGUS y el SSN, reportan una magnitud de M_w 7.6.

Los depósitos del Holoceno que se encuentran en la zona hacen de las costas de Colima un lugar propenso a sufrir licuación del suelo (principalmente los depósitos aluviales). Después del sismo de Tecomán, en la costera del puerto de Manzanillo, *Wartman, et al. (2003)*, reportan que se vieron desplazamientos laterales de entre 1 y 3 m, además de una inclinación del terreno de aproximadamente un 3%.

La *EERI (2003)*, menciona que los casos de licuación del suelo por el sismo de Tecomán no fueron tan severos como en 1995, debido quizá a los trabajos de remediación del suelo que se habían hecho después de éste y a la distancia epicentral. De acuerdo a *Wartman, et al. (2003)*, estos trabajos hechos en su mayoría en 1998 consistieron en vibro-compactación, columnas de roca y refuerzos del terreno.

Sin embargo, el mismo documento de la *EERI (2003)*, explica que se presentaron casos en el viejo puerto de Manzanillo, en el muelle de la marina y en las colonias Burócratas y Libertad (eyecciones de material y agua). *Wartman, et al (2003)*, hablan de asentamientos debidos a licuación en una calle importante cercana a la laguna, estos empezaron a ocurrir cuando se construyó la carretera que pasa junto al lugar. Después del sismo, los ingenieros reportaron que dichos asentamientos aumentaron. En el boulevard de la laguna Valle las Garzas, *Wartman et al. (2003)*, habla de movimientos laterales, lo cual puede considerarse normal debido al tipo de depósito.

La *EERI (2003)*, da a conocer que el desplazamiento del suelo en el muelle fiscal del viejo puerto de Manzanillo fue de entre 3 y 5 cm, comportamiento que podría atribuirse a las aceleraciones máximas del terreno durante el sismo, además de que el nivel freático es de entre 2 y 3 m en las zonas donde sucedió licuación. Las aceleraciones máximas fueron de 0.27 g, 0.38 g y 0.19 g en direcciones este – oeste, norte- sur y vertical, respectivamente, de acuerdo a lo reportado por *Wartman, et al (2003)*, datos importantes si consideramos, que como ya se mencionó en el Capítulo 1, la aceleración promedio para que se presente la licuación del suelo es de cerca de 0.3 g. De acuerdo con éste mismo autor, el contenido de frecuencias pico de los eventos de 1995 y 2003, es de 0.67 y 1.25 Hz.

Dentro del estado de Colima, otros municipios que reportaron licuación fueron Tecomán, Villa de Álvarez y la misma capital, Colima.

5.5 Análisis de mapas generados

Para hacer un análisis de las zonas susceptibles a presentar licuación del suelo en el municipio de Manzanillo, se generaron mapas de la litología y pendientes del terreno, empleando como herramienta un SIG.

Como en el Capítulo 4, se supone que de acuerdo al tipo de materiales los depósitos tendrán ciertas características topográficas y que, por lo tanto, si se conocen las pendientes de la zona se pueden conocer (no con exactitud) los materiales que las generan.

A continuación se mostraran dos imágenes (figuras 5.5 y 5.6) en las que se aprecian la litología y las pendientes de la zona de Manzanillo y se dará una breve explicación de lo que implica la superposición de estas.

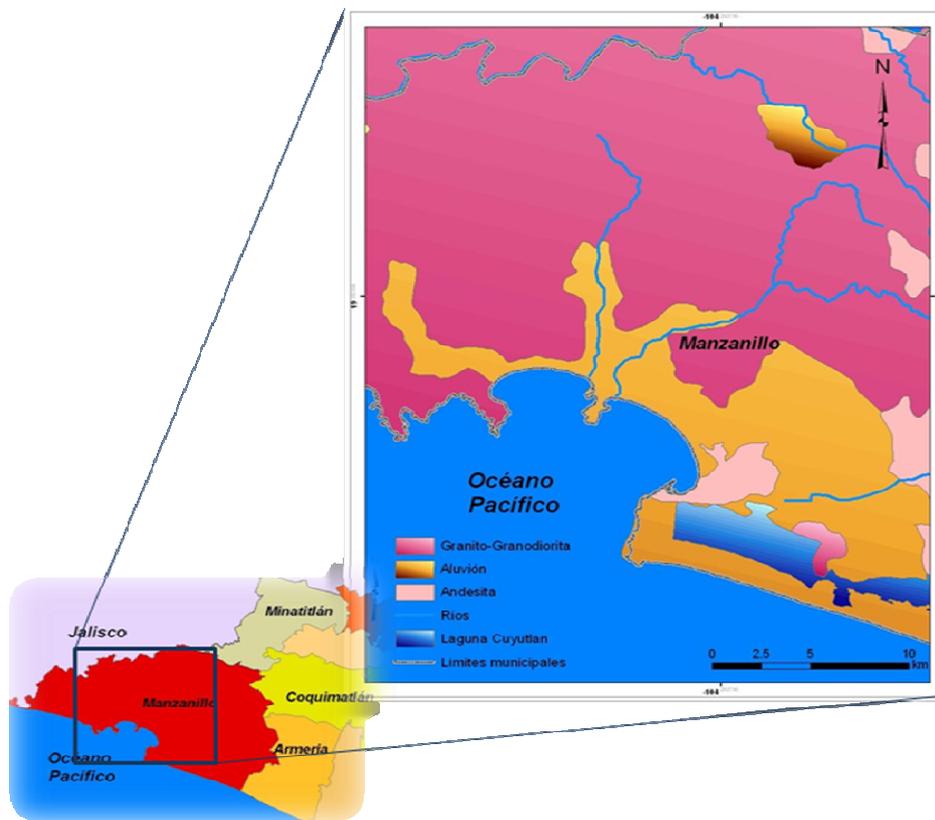
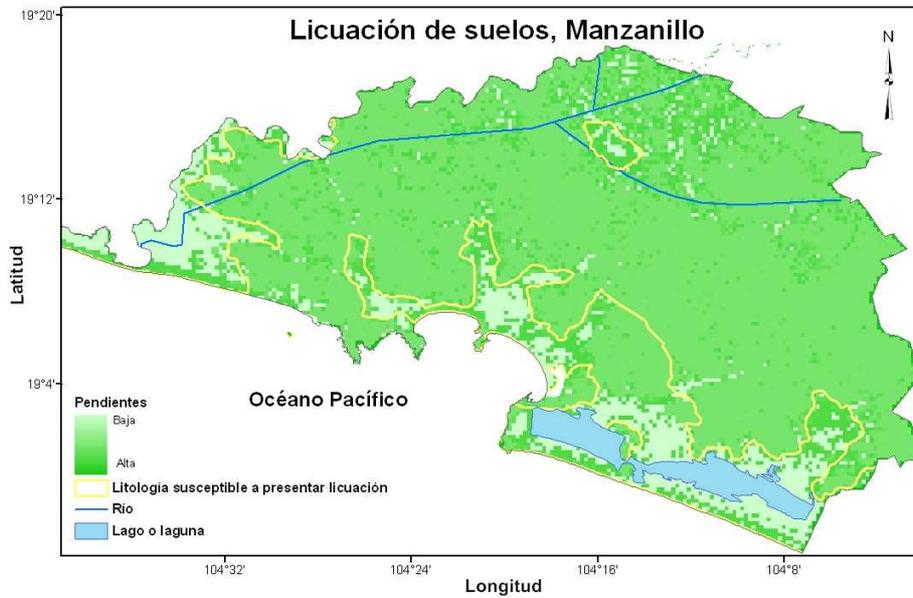


Figura 5.5 Litología del área de la Bahía de Manzanillo. En la parte sur-este predominan los depósitos aluviales.

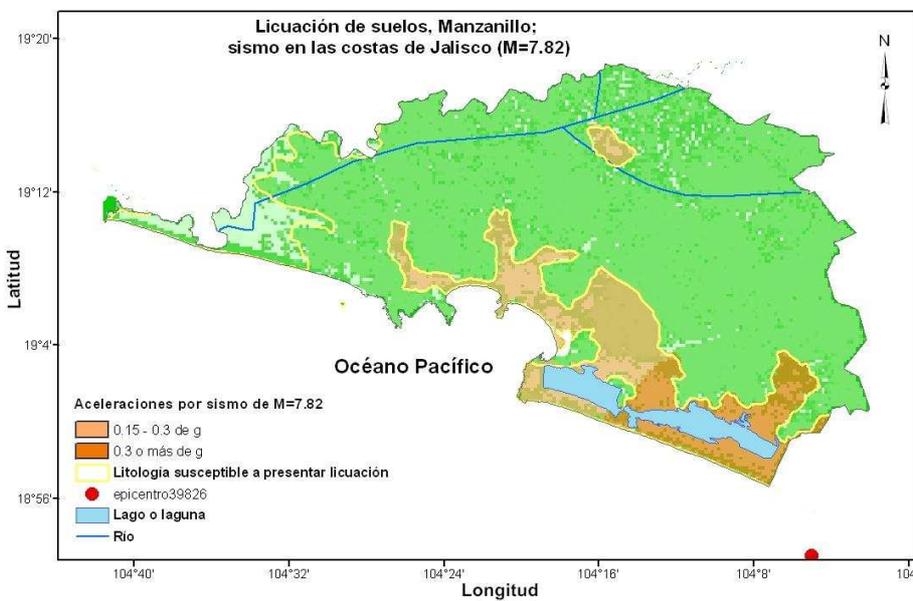
Comparando las figuras 2.11, 5.5 y 5.6a, podemos observar que las zonas planas de depósitos aluviales presentaron licuación del suelo tanto para el evento de 1995 como para el de 2003, *Wartman, et al. (2003)* muestran un mapa en el que se relacionan los sitios afectados por los dos eventos. Las coincidencias espaciales son notables, el área más afectada es aquella cercana a la laguna de Cuyutlán en su parte sureste. De manera más específica, si se observa la figura 5.6a, la licuación del suelo se presentó en su mayoría en las áreas de color verde claro (pendientes bajas o zonas planas), mientras que para las áreas verde oscuro de la misma figura no se encontró mención de algún caso en la literatura.

La relación de estas figuras hace suponer que haciendo un análisis de pendientes y relacionándola correctamente con la litología se pueden prever áreas susceptibles a sufrir licuación del suelo. Si se asocia esto a mapas de aceleraciones como los de las figuras 5.6b y 5.7a (en las que la magnitud es la misma, pero el epicentro se localiza en diferentes puntos) se tendrá una mayor certidumbre de la localización de áreas susceptibles a éste tipo de fenómenos. El resultado de considerar las aceleraciones del suelo se puede ver en las figuras 5.6c y 5.7b, en donde las zonas en las que se puede presentar licuación se reducen de manera considerable. Además, tratando de

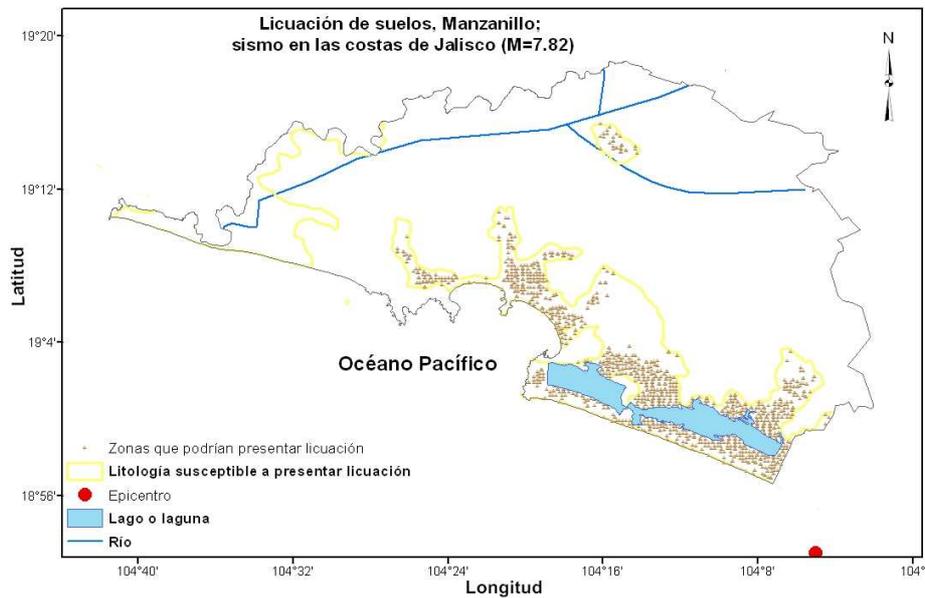
tener resultados apegados a la realidad, se debe tener en cuenta el sismo máximo creíble, para la zona de Manzanillo es de $M_s=8.4$, ERN (2009).



a

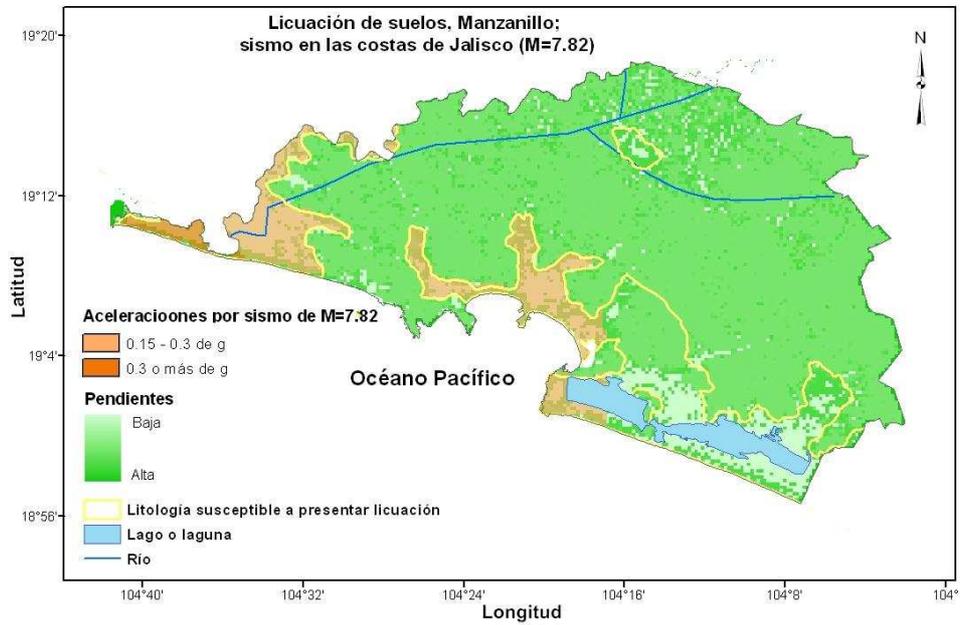


b

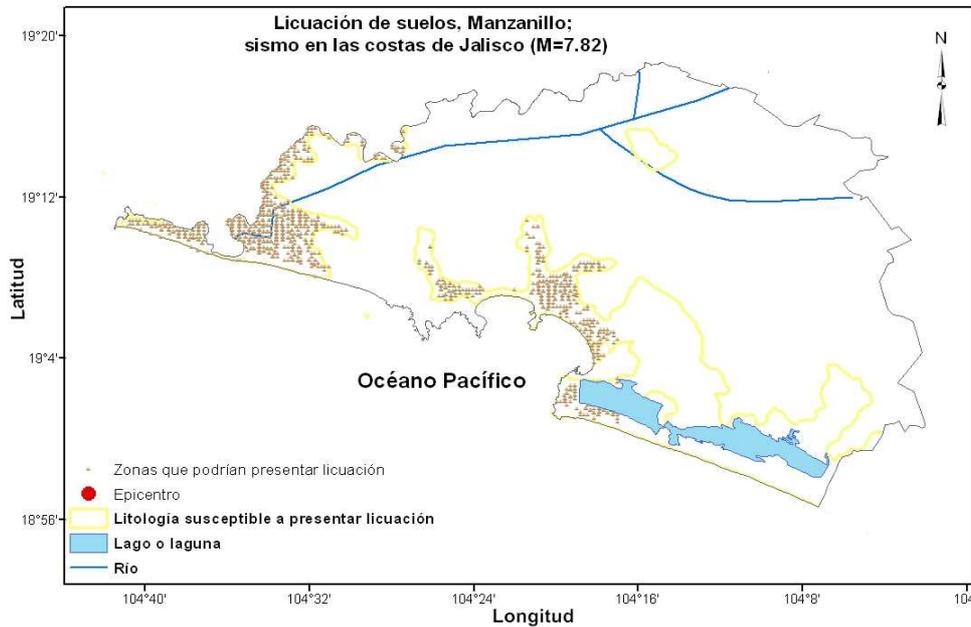


C

Figura 5.6 a) Mapa de pendientes y litología susceptible a licuación en el área de la Bahía de Manzanillo. Se observan sitios en color verde claro en donde si se relaciona ésta figura con la 5.5 se observan zonas planas de depósitos aluviales. b) Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de $M=7.82$. c) Zonas susceptibles a licuación, datos obtenidos de la intersección de litologías, aceleraciones mayores a 0.15 de g (por un evento de $M=7.82$) y pendientes.



a



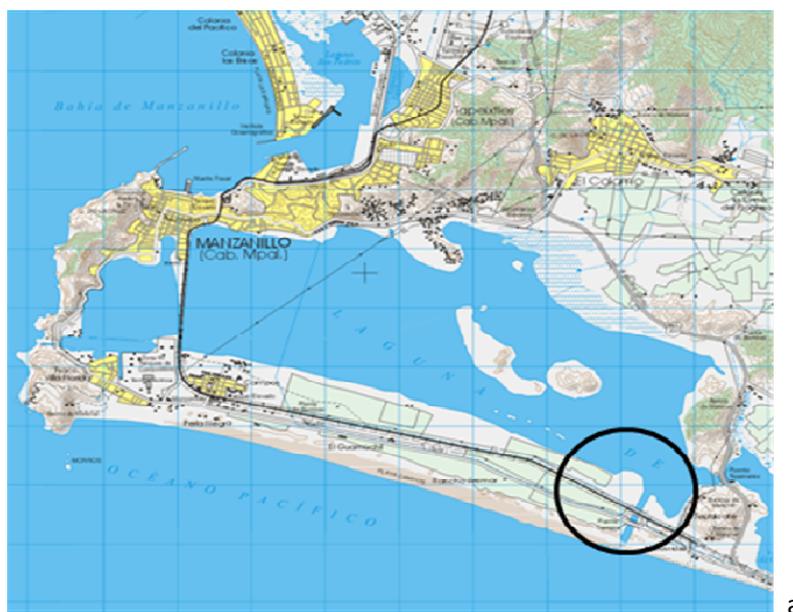
b

Figura 5.7 a) Mapa de datos bibliográficos, litología, pendientes y aceleraciones mayores a 0.15 de g para un evento de M= 7.82. b) Zonas susceptibles a licuación, datos obtenidos de la intersección de litologías, aceleraciones mayores a 0.15 de g (por un evento de M=7.82) y pendientes.

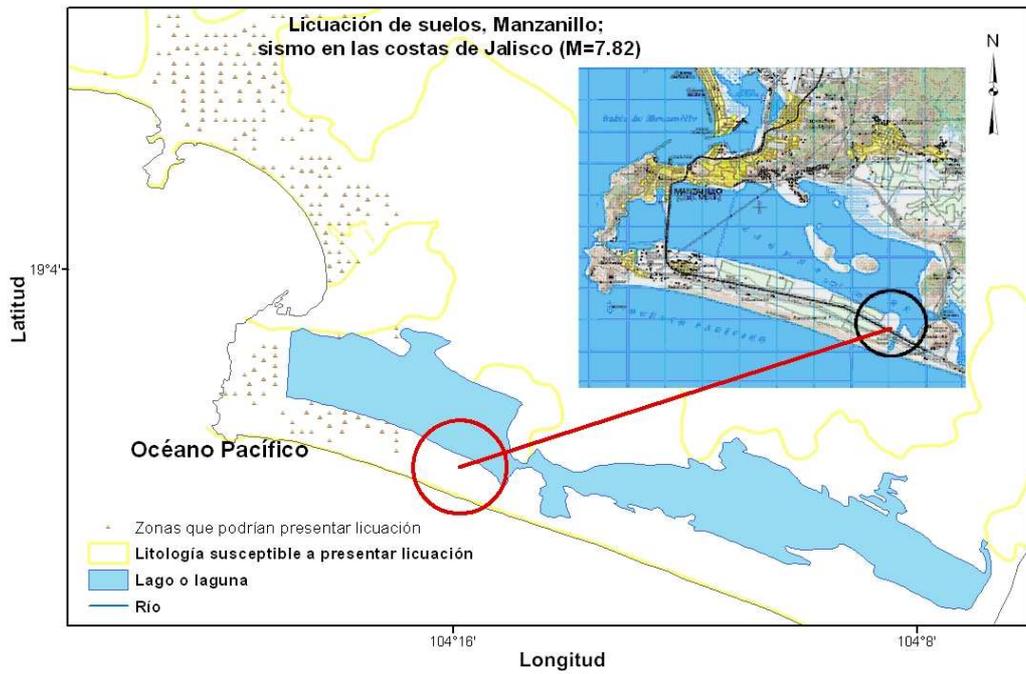
En el caso de Manzanillo es importante contemplar cuáles son estas áreas porque gran parte de la zona urbana se encuentra asentada en depósitos aluviales, lo que implica el riesgo de presentar una re-licuación del suelo un número indeterminado de veces, es decir, cada que el epicentro y magnitud de un sismo sean las apropiadas para generar aceleraciones mayores en la zona. Sería de gran importancia que estudios a detalle se hicieran en las áreas que han presentado licuación o fallas del suelo anteriormente, como en el caso de la central termoeléctrica, el puerto de San Pedrito o las colonias Burócratas y Libertad. Esto, para planificar métodos de mejoramiento del suelo que eviten pérdidas mayores en un futuro cercano.

Para la Bahía Manzanillo, al hacer estudios del suelo se tienen registros de licuación con los que se pueden comparar los resultados de los mapas generados. Tomando en cuenta un reporte hecho por la empresa *ERN (2009)* para la parte oeste de la laguna de Cuyutlán (figura 5.8a), se puede observar que en la zona en que la empresa reporta no encontrar peligro por licuación es coincidente con sectores que no se ven afectados según los mapas finales desarrollados en este trabajo (figura 5.8b).

Sin embargo, es necesario recordar que los datos empleados para hacer los mapas no son lo suficientemente detallados para poder decir que el margen de error es pequeño.



a



b

Figura 5.8 a) Localización de la zona de estudio mencionada en reporte de ERN (2009). Tomada de ERN (2009). b) Comparación con los resultados obtenidos en la figura 5.7b.

Conclusiones

La metodología propuesta en este trabajo para evaluar el peligro por licuación del suelo puede emplearse por dependencias oficiales como una herramienta para el cálculo de posibles pérdidas en infraestructura (hospitales, carreteras, escuelas, etc.) debidas a licuación durante un sismo. Sin embargo, no se debe tomar como un criterio definitivo, ya que la precisión de los mapas finales es de 300 m, es decir, no se trata de resultados locales sino zonales.

Uno de los puntos más cuestionables de esta metodología es el hecho de no contar con características geotécnicas específicas, sí en un futuro se tuvieran disponibles este tipo de datos se podría mejorar la calidad de los resultados. En la parte referente a Geofísica, sería conveniente hacer estudios de la velocidad de onda corte en aquellos lugares que se creen propensos a presentar licuación del suelo, siempre y cuando se quiera un estudio detallado de una zona pequeña.

A pesar de lo expuesto anteriormente, los mapas resultantes para estados de la República como Baja California, Michoacán y Chiapas, donde ha ocurrido licuación, en general presentan similitudes espaciales con los datos bibliográficos. Destaca el caso de Baja California, en donde se hicieron simulaciones con diferentes escenarios de sismos interplaca, dos de los mapas finales de estas simulaciones se pueden observar en las figuras 4.4 y 4.5. Para magnitudes iguales o mayores a 6, los resultados de estos escenarios coinciden en que el área del estado más susceptible a licuación se encuentra en la parte sur - este del municipio de Mexicali (municipio que presentó licuación en 1980).

El análisis correspondiente al área de Manzanillo, Colima, la más estudiada en este trabajo, muestra coincidencias espaciales con lo reportado por diferentes autores acerca de zonas afectadas a consecuencia de los sismos de 1995 y 2003. Suponiendo una variedad de escenarios, se pudo observar que para este lugar en específico, sismos a distancias de no más de 80 km y magnitudes superiores a 7.3 producen efectos similares en los depósitos sedimentarios de bajas pendientes. En trabajos posteriores hay que considerar que los resultados de esta tesis suponen 80 km como la distancia máxima a la que se podría presentar licuación del suelo, sin embargo en el caso de Colima, para el sismo de Tecoman (2003), los casos de licuación se observaron a distancias superiores (100 km o más).

Por otra parte, se realizó una simulación con un escenario que podría presentarse en las costas de Guerrero – Michoacán. Los mapas finales muestran que el área más afectada se encuentra en el puerto de Lázaro Cárdenas, Michoacán, esto principalmente para un sismo con magnitudes iguales o superiores a 7. En ese mismo sitio ya se había presentado licuación, como se mencionó en el capítulo 4, reforzando los resultados del trabajo.

Finalmente se puede decir que para las zonas estudiadas del Norte y Centro de la República los mapas obtenidos se asemejan a lo reportado por otros autores respecto a sectores en los que se ha presentado licuación. Sin embargo, la zona sur requiere de un análisis más detallado para poder asegurar que los resultados son correctos.

Recomendaciones para futuras investigaciones

Este trabajo ofrece una metodología para evaluar el peligro por licuación del suelo. En futuras investigaciones deberían tenerse en cuenta las propiedades geotécnicas a mayor detalle del sitio de estudio. Si se quisieran resultados más precisos debería considerarse un mapa de las pendientes del terreno con mayor resolución.

El método propuesto podría emplearse como base para estudios en municipios que presentan una conjunción de características geotécnicas, geomorfológicas y tectónicas favorables para que se presente la licuación del suelo, como es el caso de Manzanillo, Colima o Lázaro Cárdenas, Michoacán.

En el caso de Manzanillo, Colima, es necesario hacer un estudio a mayor detalle de las características geotécnicas para hacer una zonificación del municipio. Para el estudio de este municipio, los datos empleados permitieron alcanzar resultados cercanos a lo obtenido por otros estudios y a lo reportado por otros autores. Sin embargo, si se quiere obtener un error mínimo sería conveniente tener una base de datos más precisa.

A la metodología empleada sería conveniente agregarle un apartado en el que se consideren factores como la profundidad del nivel freático y/o las velocidades de onda de corte, ello contribuiría a delimitar zonas de peligro por el fenómeno de licuación. Los resultados obtenidos serían de apoyo en la toma de decisiones de los encargados de desarrollo urbano o incluso de las aseguradoras.

Una contribución trascendental sería localizar zonas urbanas importantes dentro de los mapas generados, quizá ciudades con más de 100 000 habitantes. Dentro de estas, podrían ubicarse los depósitos sedimentarios susceptibles a licuación y correlacionarlos con estudios de microzonificación para obtener mapas más precisos de peligro por licuación y con ello tomar medidas de protección civil o de desarrollo urbano. Además de prever pérdidas en infraestructura gubernamental o privada.

Referencias

Aguirre, J., Lermo, J., Mijares, H., Ordaz, M., Alcántara, L., Almora, D., Macías, M.A., Nájera, B., Ortega, M., Quaas, R., Pacheco, J., Singh, S.K., González Pomposo, G., y Reinoso, E. (1999), Reporte Preliminar Del Temblor De Tehuacan, Puebla, del 15 de Junio de 1999 (M=6.7). Aspectos Sismológicos y de Movimientos Fuertes. p.1-5

Aki, K. (1966) Generation and propagation of G waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964. Bulletin of the Earthquake Research Institute, vol. 44. p. 23 - 72

Alarcón, E. (1989) Respuesta dinámica de suelos. Universidad Politécnica, Madrid, Madrid. p.1 - 8

Alberro, J. y Hernández, R. (2002) Comportamiento post – sismo de estratos granulares sueltos y saturados. Proyecto 1549. Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.

Alcocer, S., Aguilar G., Flores, L., Durán, R., López-Bátiz, O., Pacheco, M., Uribe, C. y Mendoza, M. (1999), El Sismo de Tehuacan del 15 de Junio de 1999. Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Ciudad de México, México. p. 17-19

Allen, T. y Wald D. (2007) Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No.5 p. 1379 - 1395

Ambraseys, N. y Sarma, S. (1969) Liquefaction of soils induced by earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, No. 59. p. 651 - 664

Ambraseys, N.N., y Boomer, J.J. (1991) The attenuation of ground acceleration in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 20, No. 12. p. 1179–1202.

Ángel, L. (2000), Comportamiento Sísmico de Arenas, México, tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, ENEP Acatlán.

Arenas, A., (1980), Licuación de arenas en Chiapa de Corzo, Chiapas. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Memorias de la X reunión nacional de mecánica de suelos, México. p. 170-181

Aydan, E. Ulusay, R. y Atak, V. (2008) Evaluation of ground deformations induced by the 1999 Kocaeli earthquake (Turkey) at selected sites on shorelines. Environ Geol. Vol. 54. p. 165 - 182

Ayuntamiento de Manzanillo, (2004) Estudio Integral del Atlas de Riesgos para Manzanillo

Benito, B. y Jiménez, E. (1999). Peligrosidad sísmica. Física de la Tierra, No. 11, Universidad Complutense de Madrid, Madrid. p. 13-47

Bird, J. y Bommer, J. (2004), Earthquake Losses Due to Ground Failure, Engineering Geology, Elsevier. p. 147-179

Bitrán, D., Colorado, J., García, N., Pacheco, M., y Reyes, C. (2003), Impacto Socioeconómico del Sismo Ocurrido el 21 de Enero de 2003 en el Estado de Colima, México, Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Ciudad de México, México.

Bourgeois, J., Renard, V., Aubouin, J., Bandy, W., Barrier, E., Calmus, T., Carfantan, J. C., Guerrero, J., Mammereckx, J., Mercier, B., Michaud, F. y Sosson, M. (1989). Fragmentación actual del borde

oeste de continente Norte – Americano: las fronteras submarinas del bloque Jalisco (México). Boletín de la Universidad de Sonora Vol.6, No. 1 y 2. p. 1- 9

Cardona, O.D., Ordaz, M.G., Yamín, L.E., Arámbula, S., Marulanda M.C. y Barbat, A.H. (2008). Probabilistic seismic risk assessment for comprehensive risk management: modeling for innovative risk transfer and loss financing mechanisms. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, China.

Carrillo, M. (1997) Isosistas locales del sismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995, 9:36 am., estados de Colima y Jalisco, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 14, No. 1. p. 110 - 113

Cetin, O., Youd, T., Seed, R., Stewart, J., Durgunoglu, T., Lettis, W. y Yilmaz, T. (2004). Liquefaction induced lateral spreading at Izmit Bay during the Kocaeli (Izmit) – Turkey earthquake. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering No.130 vol. 12. p. 1300 - 1313

Chu, D. B., Stewart, J. P., Lee, S., Tsai, J. S., Lin, P. S., Chu, B. L., Seed, R. B., HSu, S. C., Yu, M.S. y Wang, M. C. H. (2004), Documentation of soil conditions at liquefaction and non-liquefaction sites from 1999 Chi – Chi (Taiwan) earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24. p. 647-657

Courboux, F., Singh, S. y Pacheco J. (1997) The 1995 Colima – Jalisco, México, earthquake (Mw 8); a study of the rupture process. Geophysical research letters, Vol.24, No. 9. P. 1019 - 1022

Dewey, J. W., y Suárez, G. (1991). Seismotectonics of Middle America, in Neotectonics of North America, editado por D.B. Slemmons, E. R. Engahl, M. D. Zovak y D. Blackwell, Geological Society of America. p. 309-321

Díaz, A., Cervantes, R. y Porras, V. (1980). Modelos numéricos de la dinámica de suelos – comportamiento sísmico de depósitos de arena. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Memorias de la X reunión nacional de mecánica de suelos, México. p. 59-91

EERI (1994). Earthquake basics; liquefaction, What it is and what to do about it?. EERRI, Earthquake Basics Brief No. 1. p.p. 8

EERI (2003), El sismo de Tecmán, México del 21 de enero de 2003; informe de la SMIS y el EERI. Serie 'Aprendiendo de los sismos'. México. p.291

EERI (2003), Preliminary Observations on the Tecmán, Colima, México, Earthquake of January 21, 2003. EERI, Special Earthquake Report. p. 2-5

Einsele, G (2000), Sedimentary Basins. Springer, 2nd Edition, Alemania. p. 792

El Colef, IRD. Aportes para un Escenario Sísmico en Tijuana, Baja California, México. El Colef, IRD.

Enomoto, T., Lermo, J., Navarro, M., Abeki, N. y Masaki, K. (2004) Site effect characteristics of damage concentrated area due to the 2003 Colima earthquake (M7.6), México

Erdik, M. () August 17, 1999 Kocaeli and November 12, 1999 Düzce (Turkey) earthquakes. Bogazici University, Estambul. p.p. 3

ERN (2009) Estudios de Ingeniería Generales y Particulares para la TGNL – Pacífico Central, Sitio Tepalcates en Manzanillo Colima. p. 105 - 140

González, L, Ferrer, M, Ortuño, L y Oteo, C, (2002). Ingeniería Geológica, Prentice Hall, España.

p. 114, 636, 674.

Gutiérrez Martínez Carlos (2003). Integración de Información para la Estimación de Peligro Sísmico. p.78-79

Gutiérrez, M., Mazaki, K., Lermo, J. y Cuenca, J. (1996) Microzonificación sísmica de la ciudad de Colima. CENAPRED, México.

Hays, W. (1989). Aspectos fundamentales de la microzonación sísmica. Física de la Tierra, No. 1 Universidad Complutense de Madrid. Madrid. p. 217-250

Izquierdo, F. (2001) Cuestiones de geotecnia y cimentaciones. Universidad Politécnica de Valencia. p. 93 - 106

Jaime, A., (1980). Comportamiento del suelo y estructuras térreas del Valle de Mexicali. Sismo de junio de 1980. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Memorias de la X reunión nacional de mecánica de suelos, México. p. 147-169

Jaime, A., (1980). Comportamiento dinámico de suelos. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. Memorias de la X reunión nacional de mecánica de suelos, México. p. 92-99

Jiunn, S., Chen, C. y Ueng, T. (2006). Evaluation of dynamic properties of large saturated sand specimen in the shear box. 4th International Conference on Earthquake Engineering, paper No. 041

Kanamori, H., 1977. The energy release in great earthquakes: Journal of Geophysical Research, v. 82, p. 2981-2987.

Kayabali, K. (1996). Soil liquefaction evaluation using shear wave velocity. Engineering Geology No. 44 p.121-127

Kuribayashi, E. y Tatsuoka, F. (1975) Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Soils and Foundations Vol. 15, No.4 . p. 81 - 93

Lancin y Carranza (1976) Estudio geomorfológico de la Bahía de Santiago en Manzanillo, Colima. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, No.2. p. 43 – 66

Legget R. (1964). Geología para ingenieros. Gustavo Gili, S.A., Barcelona. p.100 – 104, 431 - 434

Lermo, J. y Bernal, I. (2006), Zonificación sísmica del Estado de Tlaxcala, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVIII, No. 2. p. 215-221

Lermo, J. y Ovando, E. () Efectos de sitio y microzonificación sísmica en la ciudad de Colima- Villa de Álvarez, México. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. p.p.31

Lin, C. P., Chang, C. C. y Chang, T. S. (2004), The use of MASW method in the assesment of soil liquefaction potential. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24. p. 689-698

Lomnitz C, (1997). Mexico, San Francisco, Los Angeles and Kobe: What Next? Kluwer Academic Publishers, Netherlands. Natural Hazards 16. p. 287–296.

Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D. y Rhind, D. (2005) Geographic Information Systems and Science. Second edition, ESRI Press, Jhon Wiley & sons Ltd. San Frcisco, Cal.

- Masias, J.C. (--). Kobe – Japón, sismo del 17 de enero de 1995. Universidad Privada San Pedro, Facultad de Ingeniería. p. p. 8
- Mendoza, M.J. y Domínguez L. (2002). Primer caso documentado de licuación en el altiplano central de México. Memorias de la XXI reunion nacional de mecánica de suelos, snatiago de Querétaro, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México. p. 161- 171
- Muñoz, D. (1989). Conceptos básicos en riesgo sísmico. Física de la tierra, No. 1, Universida Complutense de Madrid, Madrid. p. 199-215
- Ovando, E. (1986). Stress-strain behaviour of granular soils tested in the triaxial cell. Tesis para obtener el grado de doctor, London University .p. 1 - 25
- Ovando, E. y Segovia, J. (2002). Licuación de arenas. Primera reimpresión, TGC, México. p.55
- Pardo, M. y Suárez, G. (1993). Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in western Mexico. Geophysical Research Letters, Vol. 20, No. 21. p. 2391 - 2394
- Pardo, M. y Suárez, G. (1995) Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. Journal of Geophysical Research Vol.100 No.87. p. 12357 - 12373
- Pérez, L.E. y Ordaz, M.G. (2008). Maxima earthquakes for seismic design of estructuras. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, China. p. 8
- Peña Llopis, J. (2006) Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio. Editorial Club Universitario.Alicante, España.
- Pestana, J., Sancio, R., Bray, J., Romo, M., Mendoza, M., Moss, R., Mayoral, J. y Seed, R. (2002), Geotechnical Engineering Aspects of the June 1999 Central Mexico Earthquakes. EERI, Earthquake Spectra, vol. 18, No. 3. p. 481-499.
- Power, M. y Holzer, T. (1996) Liquefaction maps.USGS, ATC TechBrief. p.p.12
- Ramírez, A. y Taboada, V.M. (1980). Casos historia de licuación en México. Memorias de la XX Reunión nacional de mecánica de suelos, Oaxaca, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. p. 353 - 357
- Ramírez, G. (2008), Impacto Socioeconómico del Sismo Ocurrido el 21 de Enero .de 2003 en el Estado de Colima, México, tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias (Sismología), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Ramírez, T. y Lugo, J. (2000), Efectos del Sismo (7.0=Mw) del 15 de junio de 1999 en Puebla y Estados Vecinos. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, No. 43. p. 32-41
- Rutz López, M. (sin fecha) Microsismicidad del noroeste del bloque de Jalisco (México); aplicación a la sismotectónica y peligrosidad sísmica de la zona. Universidad de Granada, Universidad de Guadalajara. Tesis de licenciatura.
- Rutz, M. y Nuñez, F. (2004) Sismotectónica del norte y oeste del bloque de Jalisco usando datos sísmicos regionales. Geos, vol. 24, No. 1, México. p. 2 - 13
- Seed H. e idriss, I. (1971) Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 97 No. 9. p.1249 - 1273

- SGM (2007) Texto explicativo de la 6ª edición de la Carta Geológica de la República Mexicana, escala 1:2'000,000.
- SGM, (2008), Carta Geológico-Minera, estados de Colima y Jalisco.
- SGM, (2008), Carta Geológico-Minera, estados de Puebla y Tlaxcala.
- SGM, (2008), Carta Geológica- Minera, Mexicali, I11-12 Baja California y Sonora
- SGM, (2008), Carta Geológica- Minera, Lázaro Cárdenas E13-6-9, Michoacán.
- Singh, S. y Ordaz, M. (-). Sismicidad y movimientos fuertes en México: una visión actual.
- Shimazaki, K., (1976). Intra-plate seismicity and inter-plate earthquakes: historical activity in Southwest Japan. *Tectonophysics*, 33. p. 33-42.
- SSN (2003) Reporte de sismos; Sismo de Colima de Enero de 2003. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Stern, R. (2002). Subduction zones. *Geophysics*, vol. 40. No. 4. p.1012-1028
- Suzuki, Y, Tokimatsu,K, Moss, R.E.S., Seed, R.B. and Kayen, R.E. (2003). CPT-Based Liquefaction Field Case Histories from the 1995 Hyogoken-Nambu (Kobe) Earthquake, Japan. Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GE-2003/03
- Tabushi, S., y Dixon, L. (2003), Catastrophe Report; Colima Earthquake, Mexico: 22 January 2003, Catastrophe Management Services.
- Technical Comitee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, (1993),Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards. The Japanese Society of Mechanics and Foundation Engineering, Japón. p. 71-101
- Terzaghi K. (1950) Mechanism of landslides. *Application of Geology to Engineering Practice*, Geological Society of America pp. 83–123.
- Tokimatsu, K. y Uchida, A. (1990), Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity. *Soils and Foundations*, vol. 30, No. 2. p. 33-42
- Trifunac M.D., Todorovska M.I. e Ivanovic S.S (1994). A note on distribution of uncorrected peak ground accelerations during the Northridge, California, earthquake of 17 January 1994. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 13. p. 187-196
- Trifunac M.D. y Todorovska M.I. (1997). Northridge, California, earthquake of 1994: density of red-tagged buildings versus peak horizontal velocity and intensity of shaking. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 16. p. 209-222
- Trifunac M.D. y Todorovska M.I. (1998). Nonlinear soil response as a natural passive isolation mechanism the 1994 Northridge, California, earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 17. p. 41-51
- UNESCO & UNDRO (1982). Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region, Vulnerability and seismic hazard, Final report. UNESCO
- Wartman, J., Rodríguez, A., Macari, E., Deaton, S., Ramírez, M., Navarro, C., Callan, S., Keefer, D., Repetto, P. y Ovando, E., (2003), Geotechnical Aspects of the January 2003 Tecomán México, Earthquake. EERI.

- Yilmaz, Z. y Cetin, O. (2004) GIS – Based seismic soil liquefaction assesment for Sakarya City after 1999 Kocaeli – Turkey earthquake. 11th ICSDEE. p.p. 8
- Yoshida, N., Tokimatsu, K., Yasuda, S., Kokusho, T. y Okimura T. (2001). Geotechnical aspects of damage in Adapazari City during 1999 Kocaeli, Turkey earthquake. Japanese Geotechnical Society, Soils and foundations Vol. 41, No. 4. p.p. 25 - 45
- Youd, T. L., y Perkins, D. M., (1978), Mapping Liquefaction-Induced Ground Failure Potential. Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 104, No. 4. p. 443-446.
- Youd, T. L. (1984), Recurrence of liquefaction at the same sites, Proc. Eighth World Conf. Earthquake Engineering, San Francisco, CA, Vol. 3, p. 231-238
- Youd, T. L. (1987), Mapping of Liquefaction Severity Index. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 113, No. 11. p.p. 1374 - 1392
- Yunmin, C., Han, K. y Ren-peng, C. (2005), Correlation of shear wave velocity with liquefaction resistance based on laboratory test. Soil Dynamics and Earthquake Engineering Vol. 25. p. 461-469
- Wang, C. Y., Dreger, D., Wang, C.H., Mayeri, D., y Berryman, J.G. (2003), Field relations among coseismic ground motion, water level change and liquefaction for the 1999 Chi-Chi ($M_w=7.5$) earthquake, Taiwan. Geophysical Research Letters, Vol. 30, No. 17.
- Wartman, J., Rodríguez-Marek, A., Keefer, D., Deaton, S., Repetto, P., Macari, E., Navarro, C., Tejeda, J., Silva, C. y Téllez, J. (2003) Preliminary Reconnaissance Report on the Geotechnical Engineering Aspects of the January 21, 2003 Tecoman (Colima), Mexico Earthquake. Report of the National Science Foundation-Sponsored Geotechnical Reconnaissance Team.
- Wartman, J., Rodríguez-Marek, A., Macari, E., Deaton, S., Ramírez-Reynaga, M., Navarro, C., Callan, S., Keefer, D., Repetto, P. y Ovando-Shelley, E. (2005) Geotechnical Aspects of the January 2003 Tecmán, Mexico, Earthquake. Earthquake Spectra Vol. 21, Issue 2, p. 493-538

Links en internet

<http://angora.depem.gov.tr/indexen.htm>
http://cee.engr.ucdavis.edu/faculty/boulanger/geo_photo_album/
<http://tlacaelel.igeofcu.unam.mx/.../mextec.html>
<http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/main.html>
<http://www.coremisgm.gob.mx/>
<http://earthquake.usgs.gov/research/hazmaps/haz101/faq/parm04.php>
<http://www.ecapra.org/wiki/images/f/fb/Licuefacci%C3%B3n.jpeg>
<http://www.explorandomexico.com.mx/state/8/Colima/geography/>
<http://geot.civil.metro-u.ac.jp/archives/eq/99taiwan/index.html>
http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/col/ubic_geo.cfm?c=1203&e=06&CFID=221142&CFTOKEN=79928688
<http://www.ssn.unam.mx/>
<http://www.stormloader.com/rman/c1b2b.htm>
<http://ryokoo.files.wordpress.com/2008/02/image42.jpg>
<http://www.esri.com>