
Sismicidad y amenazas sísmicas

La probabilidad de que ocurran terremotos está determinada por la sismicidad en la región. Las amenazas sísmicas locales o propias de un sitio dependen de la estructura geotécnica del área. Existen cinco amenazas sísmicas que pueden poner en peligro los sistemas de abastecimiento de agua:

- vibración del terreno
- licuefacción
- asentamiento – densificación y agrietamiento
- deslizamientos
- ruptura de falla.

Los tsunamis (maremotos) y rebalses (oscilación de la superficie de un lago o mar sin litoral) pueden representar una amenaza en las regiones costeras bajas.

La vibración del terreno puede causar daños significativos a las plantas de tratamiento, estaciones de bombeo y tanques, y daños menores a las tuberías enterradas, particularmente en áreas de suelos muy flexibles. El fallamiento puede producir un daño significativo a las tuberías enterradas a pocos cientos de pies de la ruptura; sin embargo, cuando ocurre la licuefacción, generalmente los daños se extenderán a tuberías enterradas y a otras instalaciones.

Debido a que estas amenazas sísmicas locales afectan directamente la propagación del daño por el sismo, el mapeo de amenazas sísmicas es una herramienta crucial para minimizar los efectos de la actividad sísmica. Por lo tanto, este capítulo presta especial atención al mapeo de amenazas sísmicas.

La colocación de líneas vitales representa una amenaza en sí misma por la posible interacción de ellas ya que generalmente las líneas se colocan una cerca de la otra y si una falla, podría dañar la otra línea vital.

Sismicidad

Los terremotos se generan por el movimiento entre y dentro de las placas tectónicas. Las placas tectónicas de interés en los Estados Unidos continental incluyen la Placa de Norteamérica, la Placa del Pacífico, la Placa de Juan de Fuca y la Placa Gorda. Toda la masa terrestre de los Estados Unidos continental se ubica en la Placa de Norteamérica, excepto el borde occidental de California, al sur de San Francisco y al oeste de la falla de San Andrés, que yace en la Placa del Pacífico. La Placa del Pacífico colinda con la Placa de Norteamérica a lo largo de la falla de San Andrés. La Placa del Pacífico se mueve hacia el

noroeste en relación con la Placa de Norteamérica, lo cual produce actividad sísmica en California. Los terremotos en California generalmente tienen un epicentro de 6 a 9 millas (10 a 15 km) de profundidad, y por lo general, producen fallamiento superficial.

Desde el Cabo Mendocino, yendo en dirección norte hacia el norte de California, Oregon y Washington, se encuentran dos pequeñas placas: la Placa Gorda hacia el sur y la Placa Juan de Fuca hacia el norte, en la interfase con la Placa del Pacífico, moviéndose en dirección este e introduciéndose por debajo de la Placa de Norte América. Esto genera sismos de subducción entre la Placa de Norteamérica y las placas que se subducen. Los terremotos producidos dentro de las placas que se subducen se denominan sismos intraplacas. Los sismos de 1949 y 1965 en Washington fueron sismos intraplacas. Se cree que estos terremotos pueden producir eventos de una magnitud tan grande como 7,5. El terremoto de Mendocino de 1992 fue un sismo de subducción. Se considera que estos terremotos pueden producir eventos de una magnitud tan grande como 8,5 ó 9,0. Los sismos intraplacas son de aproximadamente 40 a 60 km de profundidad mientras que los sismos de subducción son de aproximadamente 20 km de profundidad. En ninguno de los dos casos se espera que se produzca fallamiento superficial.

Toda la Placa de Norteamérica está bajo compresión generalmente en la dirección noroeste-sudeste. Esta fuerza de compresión algunas veces causa fallas superficiales en las secciones más débiles de la Placa de Norteamérica. Estos eventos, que se espera que sean de 6 a 9 millas (10 a 15 km) de profundidad, a menudo se conocen como sismos corticales. La falla de Seattle es probablemente lo que queda de un sismo cortical, como es el caso de muchas de las fallas en la región de Portland.

La sismicidad de cualquier área en particular está dada por su proximidad a las estructuras tectónicas descritas y a otras estructuras que se encuentran en diferentes partes del mundo (ver figura 2-1). El UBC y el *National Earthquake Hazard Reduction Program* (Programa nacional de reducción de amenazas sísmicas) han elaborado un mapa de los Estados Unidos que se basa en el tamaño y en la probabilidad de ocurrencia de un sismo.

Parámetros sísmicos

Los terremotos y sus efectos se miden de diferentes maneras. La magnitud describe el tamaño de un sismo y expresa la cantidad de energía liberada. La magnitud de Richter es una escala logarítmica: por cada incremento en la magnitud de Richter de 1, se libera 33 veces más de energía. La liberación de energía depende de la ruptura de falla y de la distancia de desplazamiento.

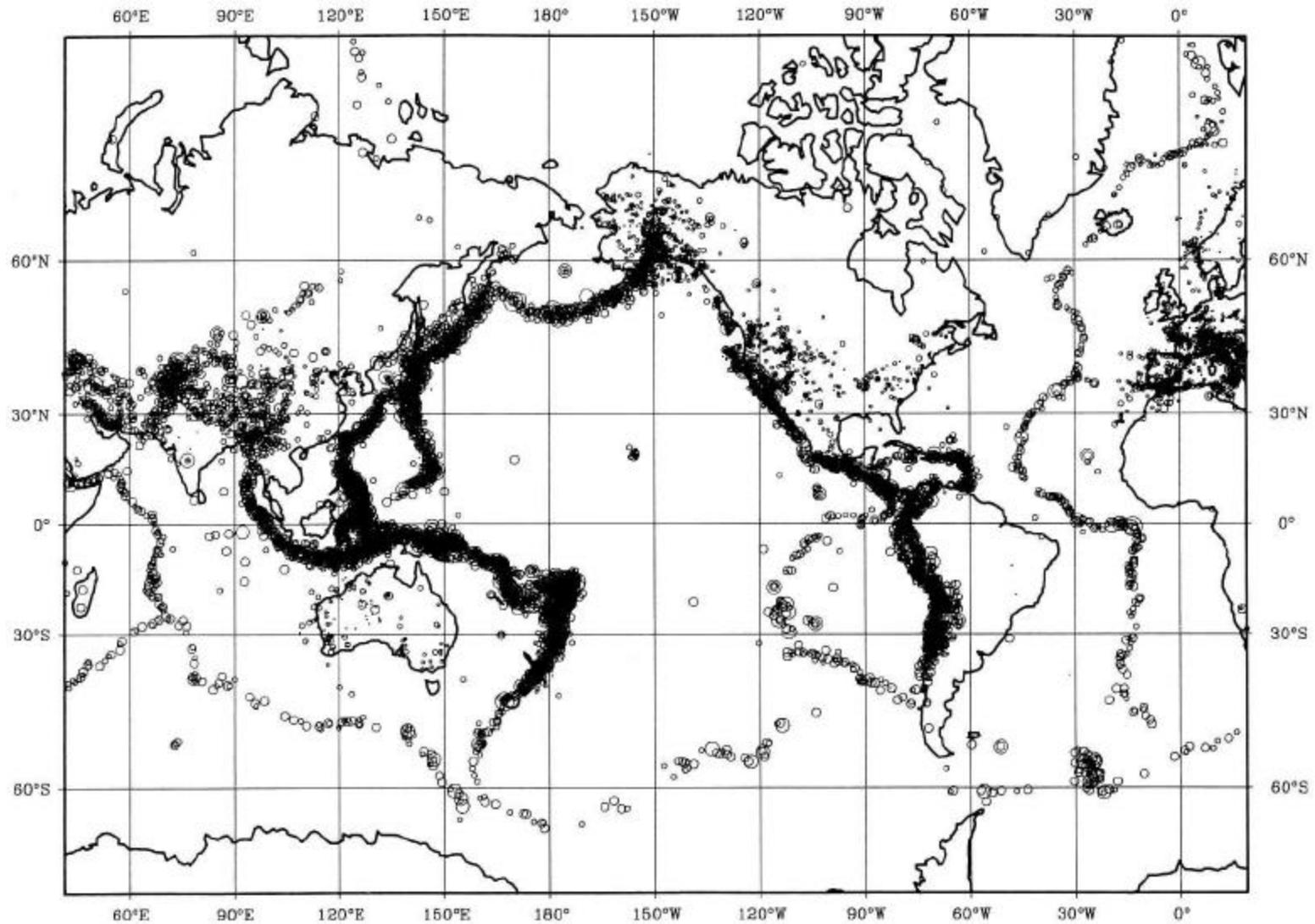
La intensidad describe los efectos de la vibración o la extensión de los daños en un lugar o sitio específico. La intensidad en un sitio está determinada por la magnitud de un sismo, la duración de la vibración, la distancia desde el sitio hasta el epicentro del sismo o la superficie de ruptura, y las condiciones geológicas locales. La duración del sismo depende de la longitud de la falla y, por tanto, de la cantidad de energía liberada.

La escala de la Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) comúnmente se usa para medir la intensidad y se compone de 12 categorías de intensidad del movimiento del terreno: desde I (no se siente, excepto por algunas personas) hasta XII (daño total). Generalmente, el daño estructural se inicia para intensidades de IMM VII para estructuras mal construidas. Las intensidades IMM XI y XII son extremadamente raras. La escala de la Intensidad de Mercalli Modificada es subjetiva; es decir, depende de la interpretación

personal y está determinada, en cierto grado, por la calidad de la construcción en el área afectada. La Intensidad de Mercalli Modificada también depende de si el suelo se licua y causa daños a las estructuras.

Otros parámetros sísmicos relacionados con la vibración son la aceleración máxima del suelo (PGA) y la velocidad máxima del suelo (PGV). Ambas pueden usarse para describir la amplitud de la vibración. La respuesta y el daño a estructuras rígidas y pequeñas está directamente relacionado con la PGA, mientras que el comportamiento de edificaciones más flexibles está directamente asociado a la PGV.

El movimiento lateral/vertical actual o esperado causado por la licuefacción, el asentamiento o los deslizamientos, se conoce como deformación permanente del suelo (DPS).



Fuente: National Earthquake Information Center.

Los tamaños de los símbolos han sido dibujados a escala de acuerdo a su magnitud:.

◄ < 3,0 ◯ 3,0-3,9 ◯ 4,0-4,9 ◯ 5,0-5,9 ◯ 6,0-6,9 ◯ ≥ 7,0

Figura 2-1 Este mapa que muestra la actividad sísmica entre 1990 y 1993 confirma que los riesgos sísmicos se correlacionan en gran medida con las placas de subducción.

Vibración del terreno

La vibración del terreno es la amenaza sísmica más común y puede causar un daño aislado pero extendido (ver figura 2-2). La vibración del terreno incluye movimientos horizontales y verticales que pueden durar desde varios segundos hasta varios minutos en caso de terremotos severos, y pueden ser destructivos a varios cientos de kilómetros de distancia, dependiendo de las condiciones locales del suelo.

Para mitigar los efectos de la vibración del terreno se deben diseñar instalaciones que resistan las fuerzas laterales y verticales producto de la vibración, o aislar la instalación de la vibración utilizando aisladores base. Esto se considera ingeniería sísmica tradicional.

Licuefacción

La licuefacción es un fenómeno en el que suelos saturados, no consolidados y no cohesivos pierden su resistencia al corte debido a vibraciones del terreno y son temporalmente transformados a un estado licuado. En el proceso, el suelo experimenta una pérdida pasajera de resistencia que comúnmente hace que se produzca un desplazamiento o falla del terreno (ver figura 2-3).

Existen cuatro tipos básicos de fallas del terreno asociadas con la licuefacción:

- **Flujos de tierra.**



Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 2-2 Colapso del Hotel Hyatt en Baguio, Filipinas



Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 2-3 Flujo lateral en una carretera en Costa Rica



Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 2-4 Buzón flotante como resultado de la licuefacción después del terremoto en Niigata, Japón

Materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado.

- **Flujo lateral**. Movimiento limitado de las capas superficiales del suelo por pendientes suaves o hacia superficies libres, como márgenes del río
- **Flotación**. Objetos enterrados menos pesados que el suelo licuado desplazado, como tanques, buzones o tuberías de gravedad, flotan a la superficie (ver figura 2-4)
- **Pérdida de resistencia de soporte**. Reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o adyacente que puede hacer que las estructuras se hundan (ver figura 2-5).

La licuefacción a menudo ocurre en las capas subsuperficiales revestidas de suelos superficiales adecuados. Cuando estas capas más profundas se licuan, las capas superficiales del suelo a menudo se mueven lateralmente en bloques sólidos.



Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 2-5 Vivienda asentada como resultado de la licuefacción en Dagupan, Filipinas.

Uno de los factores perjudiciales del flujo lateral es la deformación

permanente del suelo (distancia a la cual un punto se mueve permanentemente durante y después de un sismo) que se produce. También se consideran los movimientos horizontales y verticales. Youd y Perkins han desarrollado una metodología para estimar las deformaciones máximas en un lugar específico (Youd and Perkins, 1987). El índice de intensidad de la licuefacción (LSI) de Youd y Perkins algunas veces se usa para estimar el daño esperado a las tuberías y sirve de orientación para el diseño de nuevas instalaciones.

Factores de la licuefacción

La experiencia ha demostrado que existen cinco factores importantes para determinar el potencial de un suelo para licuarse:

- distribución del tamaño de los granos
- profundidad a las aguas subterráneas
- densidad
- peso del recubrimiento y profundidad del suelo
- amplitud y duración de la vibración del terreno.

Distribución del tamaño de los granos. La arena uniformemente graduada, con pocos finos o granos muy gruesos (es decir, arena limpia) tiene mayor probabilidad de licuarse y es posible que se vuelva más densa. Las arenas limosas y gravas también son susceptibles a la licuefacción bajo cargas cíclicas muy severas.

Profundidad a las aguas subterráneas. Si existe agua subterránea en el punto de la columna del suelo donde se está produciendo la densificación, puede ocurrir licuefacción. Mientras menor sea la profundidad, menor será el peso del recubrimiento del suelo y el potencial de que ocurra densificación. Por tanto, mientras menor sea el nivel de aguas subterráneas, mayor probabilidad habrá de que ocurra licuefacción.

Densidad. La licuefacción ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no cohesivos. Este suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica. Esta tendencia a densificarse reduce el volumen de suelo/agua e incrementa la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando la presión intersticial se vuelve igual a la tensión media total, el suelo pierde su resistencia y se licua. Si el suelo es denso, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuefacción.

Peso del recubrimiento y profundidad del suelo. Las tensiones entre partículas aumentan a medida que se incrementa la presión del recubrimiento. Mientras mayor sean las tensiones entre partículas, menor será la probabilidad de que ocurra la licuefacción. Por lo general, la licuefacción ocurre a profundidades menores a 30 pies (9 metros); rara vez ocurre a profundidades mayores a 50 pies (15 metros).

Amplitud y duración de la vibración del terreno. La capacidad de un suelo para resistir una vibración del terreno provocada por un sismo sin causar fallas depende de la intensidad del movimiento del terreno, incluida tanto su amplitud como su duración. Los movimientos más fuertes tienen mayor probabilidad de causar fallas del terreno. La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea cerca del epicentro de terremotos pequeños o moderados, o a cierta distancia de terremotos moderados a severos.

Edad del depósito. Los suelos débiles y no cohesivos por lo general son jóvenes. Con el tiempo, dos factores actúan para incrementar la resistencia de un suelo típico: la compactación (que cambia la relación de vacíos) y varios procesos químicos (que actúan para cementar los granos del suelo). Una regla general es que los depósitos anteriores al Pleistoceno Tardío (más de 500.000 años de antigüedad) tienen poca probabilidad de licuarse excepto si sufren una vibración del terreno bastante fuerte, mientras que los depósitos del Holoceno Tardío (menos de 3000 años de antigüedad) tienen mayor probabilidad de licuarse.

Origen del suelo. El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse. De manera similar, los rellenos sintéticos no compactados, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares. Una práctica común en décadas pasadas era colocar los rellenos hidráulicamente. Todos estos tipos se licuarán con facilidad. Por otro lado, los sedimentos depositados glacialmente, particularmente aquellos sobre los cuales ha pasado un glaciar, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

Medidas para mitigar la licuefacción

Las posibles medidas de mitigación de la licuefacción incluyen:

Evitar áreas donde pueda ocurrir la licuefacción y el flujo lateral.

- Cambiar el trazado horizontal de las tuberías.
- Cambiar el trazado vertical de las tuberías mediante el uso de la perforación direccional para que crucen los ríos por debajo de los materiales licuables.

Estabilizar el material licuable.

- Reemplazar el material con relleno compactado. Observe que el ancho debe ser adecuado para que resista el movimiento de los suelos licuables contiguos.
- Usar muros de contención.
- Compactación dinámica. Dejar caer pesos de 2 a 200 toneladas (1800 a 180.000 kg) de alturas de hasta 120 pies (36 m).
- Vibroflotación. Usar un vibrador para realizar agujeros en el terreno con la ayuda de un chorro de agua a presión con espaciamientos entre 5 a 10 pies (1,5 a 3 m) y volver a llenar con arena luego de la extracción.
- Columnas de piedra. Usar un vibrador para realizar agujeros en el terreno con la ayuda de un chorro de agua a presión con espaciamientos entre 5 a 10 pies (1,5 a 3 m) y llenar con grava luego de la extracción. Las columnas de piedra proporcionan resistencia y drenaje.
- Inyección para impermeabilización. Penetrar los huecos con una lechada de cemento utilizando silicatos, cemento o productos químicos.
- Inyección para compactación. Expandir la cavidad en huecos pre-perforados y bombear concreto líquido (aplicable a cimientos de construcciones *in situ*).
- Pilotes de compactación. El terreno se consolida durante la instalación de tuberías.
- Mezcla de suelo profundo. Aplicar a diámetros mayores en donde se bombea una mezcla de suelo y concreto líquido.
- Drenaje: por gravedad o bombeo.

Colocar los cimientos por debajo del material licuable

- Pilotes.
- Excavar hasta el material adecuado.

Agregar peso a la estructura para lograr una flotabilidad neutral

- Agregar concreto masivamente.

Brindar flexibilidad para moverse con el material

- Losa pesada, conexiones flexibles de tuberías.
- Tubería con uniones fijas, dúctiles y flexibles.

Aceptar el daño

- Proporcionar válvulas de corte.

Asentamiento, densificación y agrietamiento

El asentamiento, compactación o densificación son similares a los fenómenos que ocurren en la licuefacción, pero sin la presencia de aguas subterráneas. Esto produce un asentamiento que generalmente es mínimo si se compara con la deformación permanente del suelo provocada por la licuefacción o el flujo lateral. El agrietamiento o fracturación es el desplazamiento lateral de los suelos hacia superficies libres lo cual produce la formación

de grietas. Puede ocurrir en áreas donde se produciría el flujo lateral, excepto que no hay agua subterránea presente.

Las medidas de mitigación para prevenir el asentamiento o densificación son similares a algunas medidas empleadas en la licuefacción para incrementar la densidad o resistencia del suelo.

Deslizamientos

Los deslizamientos pueden ser causados por sismos (ver figura 2-6) y se pueden categorizar en cuatro grupos:

- desprendimientos – movimientos repentinos de material geológico causado por socavación
- volcamiento – rocas que caen hacia adelante, separándose de la masa principal
- derrumbes – movimientos a lo largo de una superficie de ruptura definida; incluyen derrumbes rotacionales, traslacionales y laterales.
- flujos laterales – desplazamiento casi horizontal del material licuado (ver licuefacción)
- flujos – incluidos repteo, flujo de escombros, aluviones, desprendimiento de tierras, flujos de lodo o deslaves, lahares (escombros de un deslizamiento volcánico y agua) y deslizamiento subácneo.



Figura 2-6 Deslizamiento en Tacoma Narrows, Wash., después del terremoto de 1949.

Los mapas de deslizamientos se pueden preparar en los siguientes tres niveles: (1) inventario de los deslizamientos, (2) vulnerabilidad de los deslizamientos, y (3) mapas de las amenazas de deslizamientos.

Los inventarios se basan en la observación y reconocimiento de los lugares donde han ocurrido deslizamientos en el pasado. Los mapas de vulnerabilidad consideran áreas que tienen el potencial de deslizarse, correlacionando criterios tales como pendientes empinadas, unidades geológicas débiles, suelo mal drenado o rocas con antecedentes de deslizamiento. Los mapas de amenazas muestran el tamaño del área y la probabilidad de que ocurran deslizamientos, y se pueden preparar en un nivel regional, comunitario o local.

Mitigación de los deslizamientos

Los deslizamientos y derrumbes se pueden mitigar de la siguiente forma:

- drenaje
- re-nivelación de la pendiente
- construcción de estructuras de contención
- vegetación
- endurecimiento del suelo.

Los flujos de escombros y avalanchas se pueden mitigar mediante la estabilización de la fuente o disipación de la energía. El daño producido por la caída de rocas se puede reducir mediante la estabilización de la ladera o protección de las instalaciones que pudieran resultar afectadas.

Para más información, consulte la serie 52 de la FEMA* Earthquake Hazard Reduction, *Landslide Loss Reduction: A Guide for State and Local Government Planning*.



Figura 2-7 A



Fuente: M. J. O'Rourke

Figura 2-7B El movimiento a lo largo de esta falla en el terremoto de Landers (California) (foto superior) produjo la compresión telescópica de las tuberías de asbesto-cemento (foto inferior)

Ruptura de falla

El fallamiento puede producir daños localizados a los componentes y estructuras del sistema de abastecimiento de agua que se encuentran cerca o que atraviesan las extensiones superficiales de una falla. Los desplazamientos horizontales de las fallas superficiales de hasta 24 pies (7 m) fueron producto del terremoto de Landers de 1992. Para un sistema de abastecimiento de agua, las tuberías enterradas son los componentes con mayor probabilidad de resultar afectados por el cruce de fallas. Las relaciones empíricas entre la magnitud del sismo y el desplazamiento horizontal de las fallas, como aquella propuesta por Slemmons (1977), se pueden usar para cuantificar la ruptura de fallas.

Los desplazamientos horizontales permanentes de varios pies de longitud pueden cortar todas las tuberías excepto las tuberías enterradas o aquellas que van por encima del terreno que estén mejor diseñadas (ver figuras 2-7A y 2-7B).

* Federal Emergency Management Agency (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias), 500 C St. S. W., Washington, DC 20472

Para mitigar este riesgo, se deben evitar los cruces de fallas siempre que sea posible. Cuando las tuberías tienen que cruzar fallas conocidas, pueden emplear diseños especiales en el lugar donde se encuentran las rupturas de fallas históricas. Como mínimo, se deben brindar válvulas de corte a cada lado de la falla. El fallamiento en dichas ubicaciones no siempre debe ocurrir exactamente en el mismo lugar de la falla; sin embargo, dichas tuberías pueden aún estar amenazadas si el lugar de la ruptura y el desplazamiento exceden la longitud de la conexión flexible.

Ubicación de las líneas vitales

Las líneas vitales pueden tener los siguientes efectos una sobre otra:

- explosión de tuberías de gas natural o combustible líquido
- inundación o socavación debido a tuberías rotas que transportan líquidos
- falla o ruptura de una estructura destinada a un propósito primario, pero que también sirve de apoyo a otra línea vital, como el puente de una autopista que soporta una tubería
- colapso de una estructura sobre una línea vital, como un edificio que cae encima de un hidrante
- daño ambiental debido a derrames asociados con tuberías rotas.

Información sobre amenazas sísmicas

La información sobre amenazas sísmicas ha sido preparada por organismos federales, estatales, provinciales y locales, y estará disponible según la ubicación. La información más útil se encuentra en la forma de mapas sísmicos elaborados por la US Geological Survey (USGS), los cuales se pueden adquirir en la siguiente dirección:

US Geological Survey
Map Distribution
Federal Centre, Box 25286
Denver, CO 80225

Puede encontrarse mapas que muestren la amenaza de licuefacción, el flujo lateral, la inestabilidad de laderas, la probabilidad de que ocurran deslizamientos, la amplificación sísmica y las ubicaciones de las fallas. En áreas donde no se ha recopilado información específica sobre amenazas sísmicas, se pueden usar mapas de suelos agrícolas federales o estatales, y mapas geológicos para identificar áreas vulnerables a la licuefacción. Para obtener más información sobre amenazas locales y sismología local, póngase en contacto con su oficina estatal.