1

Introducción

Generalidades

La información en esta publicación permite evaluar los efectos que producen los sismos sobre los proveedores de agua. Debido a que uno de los elementos cruciales de las evaluaciones de la vulnerabilidad sísmica de los sistemas de agua es la licuefacción y la deformación permanente del suelo (DPS), el principal objetivo de este documento es permitir a los lectores comprender los efectos de esta amenaza.

En este documento se discuten aquellos puntos que generalmente se incluyen en una evaluación de la vulnerabilidad sísmica de un sistema de agua. En primer lugar, se define la vulnerabilidad sísmica de los sistemas de agua y los objetivos del comportamiento de dichos sistemas. Seguidamente, se describe la sismicidad y las amenazas sísmicas, se establece la vulnerabilidad de los componentes de los sistemas y se discute el comportamiento global del sistema. Finalmente, se describen los principios básicos que los proveedores de agua deben tener en cuenta durante la planificación de emergencias, y se presenta un ejemplo de una evaluación de la vulnerabilidad.

A continuación se enumeran los pasos a seguir en una evaluación de la vulnerabilidad:

1. Definir los objetivos del comportamiento del sistema
2. Evaluar las amenazas
3. Realizar un inventario del sistema
4. Visitar los lugares involucrados en el sistema
5. Evaluar la vulnerabilidad de los componentes
6. Evaluar la vulnerabilidad del sistema
7. Desarrollar alternativas de mitigación
8. Clasificar las alternativas de mitigación en orden de prioridad
9. Implementar un programa de mitigación.

Definición de los sistemas de líneas vitales y razones para la mitigación sísmica

Las líneas vitales son sistemas que difieren de las estructuras que generalmente se estudian en ingeniería sísmica y pueden incluir agua, alcantarillado, energía eléctrica, comunicaciones, gas natural, combustibles líquidos y sistemas de transporte. Estos sistemas se caracterizan porque:

- la sociedad depende del comportamiento del sistema tanto durante su operación normal como durante situaciones de recuperación y respuesta frente a emergencias
- el funcionamiento del sistema depende de la interacción de sus componentes
- el sistema se distribuye a lo largo de un área extensa y requiere información sobre amenazas para muchas ubicaciones.

Existen tres razones principales para que los proveedores de agua implementen medidas de mitigación sísmica:

- responsabilidad ante la comunidad
- necesidad de minimizar los impactos económicos
- necesidad de minimizar otros impactos negativos.

Los efectos financieros asociados con la interrupción de las líneas vitales generalmente son mayores que los costos de reparación ocasionados directamente por los daños. En otras palabras, los efectos económicos de la interrupción de una actividad productiva o los daños ocasionados por un incendio debido a que un sistema de agua no se encontraba operativo, generalmente son mayores que el costo que implica reparar tuberías, tanques o plantas de tratamiento dañados en un sismo. Los efectos económicos de la interrupción de un sistema de agua son asumidos por la sociedad (es decir, el público, las empresas locales, los propietarios de negocios y los recaudadores de impuestos), mientras que el costo de reparación puede ser asumido directamente por el proveedor [quien puede ser elegible para un subsidio para reparación de la Federal Emergency Management Agency (FEMA)].

El costo de la mitigación sísmica se debe comparar con los potenciales efectos económicos (el riesgo sísmico se discutirá más adelante en esta sección) y se deben definir las alternativas menos costosas.

Los proveedores de agua pueden ser responsables de los efectos económicos asociados con la interrupción de un sistema de agua, aunque éste no ha sido el caso en terremotos pasados.

Riesgo sísmico

Las medidas de mitigación sísmica se deben implementar según el nivel del riesgo sísmico, el cual está en función del tamaño del sismo a ocurrir, su probabilidad de ocurrencia, y las consecuencias de dicha ocurrencia.

El tamaño de un sismo y su probabilidad de ocurrencia se combinan para crear mapas de zonificación sísmica para los Estados Unidos, como los que se incluyen en el UBC.

Los mapas de zonificación del UBC se dividen en cinco zonas (de 0 a 4). Para cada zona se proporcionan coeficientes de diseño para las fuerzas laterales que difieren según el área. La selección de dichos coeficientes se basa en los siguientes tipos de sismos:

- Terremoto moderado o de base operativa (TBO). La estructura puede experimentar daños menores que se pueden reparar, pero permanecerá en operación. Un terremoto de base operativa tiene 50 por ciento de probabilidad de ocurrir en 50

años (vida útil de una estructura); ello representa un periodo de retorno de cerca de 72 años.

- Terremoto severo o de diseño (TDD). La estructura puede estar gravemente dañada y ser declarada ruinosa, pero sigue en pie para permitir la salida de los ocupantes del inmueble. Un terremoto de diseño tiene un 10 por ciento de probabilidad de ocurrir en 50 años; ello representa un periodo de retorno de 475 años.

Los sistemas de agua requieren un mayor nivel de desempeño durante los sismos; por ende, los coeficientes de diseño deben ser más conservadores que aquellos exigidos por el UBC. Para el caso de instalaciones grandes, el UBC incrementa los coeficientes de diseño al incorporar un factor de importancia, I, de 1,25 que debe ser multiplicado por otros factores de carga sísmica.

Para algunas instalaciones, como represas y plantas de energía nuclear, se consideran los terremotos máximos esperados (TME) ya que las consecuencias de los daños podrían ser catastróficas.

Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 1-1 Cilindros de cloro que fueron reemplazados luego de volcarse en una planta de tratamiento de agua en Limón, Costa Rica, lo cual ocasionó la ruptura de la tubería de conexión y el escape de vapores de cloro. Una persona terminó en el hospital.

Objetivos del comportamiento de un sistema después de un sismo

Objetivos prioritarios

Esta sección define y discute las categorías de servicios y las prioridades asociadas con la mitigación de daños sísmicos y la provisión del suministro de agua. Para mitigar los daños a los sistemas de agua causados por un sismo se deben definir las siguientes prioridades a fin de mantener un sistema en operación:

Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 1-2 Camión cisterna que distribuye agua de bebida en Erzincan, Turquía. El sistema de agua aún continuaba en reparación una semana después de ocurrido el sismo.

1. *Protección de la vida humana*. Se deben prevenir accidentes causados directamente por fallas en la instalación; por ejemplo, escape de vapores de cloro y colapso de un edificio ocupado (figura 1-1)
2. *Extinción de incendios*. Se requiere inmediatamente después de ocurrido un terremoto.

3. *Servicios críticos.* Luego de un terremoto, se requiere con urgencia servicios para hospitales, enfriamiento de los equipos de comunicación críticos y pacientes con diálisis renal.
4. *Agua de bebida y salud pública*. Se requiere agua para beber hasta tres días después de ocurrido un sismo. Puede ser suministrada a través de un camión cisterna o en forma de agua embotellada (ver figura 1-2).
5. *Agua para uso comercial, industrial y doméstico*. Se necesita agua para restaurar el funcionamiento normal de aquellos insumos básicos para la sociedad como extinción de incendios, agua de enfriamiento para el sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), computadoras (por ejemplo, banca y comunicaciones), agua de procesos industriales, y en la vivienda para ducharse y lavar la ropa (ver figuras 1-3A y 1-3B).
6. *Daños a la propiedad*. Daño directo a los componentes del sistema de agua o efectos secundarios de las inundaciones debido a rupturas en los reservorios o tuberías.
7. *Irrigación*.

Es importante clasificar las medidas de mitigación en orden de prioridad a fin de eliminar cualquier riesgo para la seguridad humana y reducir los potenciales riesgos económicos. El agua para beber puede ser provista a corto plazo adoptando medidas de respuesta frente a emergencias, tales como transporte y distribución de agua en camiones cisterna, y distribución de agua embotellada suministrada por plantas embotelladoras regionales. No existe evidencia de muertes de personas en países civilizados como resultado de la deshidratación luego de un terremoto. La propagación de enfermedades debido a la interrupción de los sistemas de saneamiento (agua y desagüe) ha sido un problema después de algunos sismos. A largo plazo, una vez que se reanude el servicio de la planta de tratamiento y el sistema de conducción-distribución se encuentre intacto, se debe reestablecer el nivel calidad del agua de bebida en el sistema de distribución.

Figura 1-3A

La interrupción de las líneas vitales puede producir grandes pérdidas económicas secundarias como resultado de la interrupción de la actividad empresarial, ya que muchas empresas no pueden funcionar sin agua o alguna otra línea vital como la electricidad, los sistemas de comunicación y transporte, y el combustible gaseoso o líquido. Si se decide establecer un nivel de provisión de servicios después de ocurrido un sismo, se debe considerar el impacto que tendría en el funcionamiento de la empresa la duración de la

Fuente: D.B. Ballantyne

Figura 1-3B Camión cisterna y ducha portátil que abastecen a un área cercana al epicentro de Loma Prieta (California) seis semanas después de haber ocurrido el terremoto.

interrupción o corte de una línea vital. La pérdida directa de propiedad, como los daños a las tuberías o a la estación de bombeo, será pequeña para la sociedad en comparación con las pérdidas ocasionadas por la interrupción de la actividad empresarial y productiva.

Las diferentes categorías de servicios requieren el funcionamiento adecuado de las diversas combinaciones de los componentes de un sistema. Los componentes usados para producir agua para la extinción de incendios generalmente incluyen reservorios y el sistema de distribución que conecta el reservorio con los lugares donde se ha producido el incendio. No necesariamente incluirían el sistema de conducción que conecta las represas y los reservorios.

Para restaurar el uso doméstico, comercial e industrial del agua, se requerirían todos los componentes del sistema necesarios para que el sistema continúe operando después de un sismo. Se podría restaurar el servicio a todos los clientes aún si el caudal fuese reducido y algunos componentes del sistema no estuviesen funcionando.

Una línea vital depende del funcionamiento de los componentes del sistema y de la interrelación de esos componentes cuando operan como un sistema. Un ejemplo simple es un reservorio, una tubería de conducción y una estación de bombeo configurados en serie. Todos los componentes deben estar operativos para que el sistema pueda suministrar agua. Los sistemas en paralelo o interconectados son más complejos, pero el daño a los componentes individuales no necesariamente interrumpe el suministro de agua.

Para poder comprender cómo se comportará un sistema, es importante definir la interrelación de sus componentes.

Posibles objetivos de las políticas de comportamiento sísmico en sistemas de agua y saneamiento

Basados en las prioridades de los componentes del sistema, en el cuadro 1-1 se presentan los objetivos de las políticas de comportamiento del sistema. Se sugieren políticas para terremotos moderados o de base operativa (TBO) que tienen una mayor probabilidad de ocurrencia y para terremotos severos (TDD) que tienen una menor probabilidad de ocurrencia. Ambos comportamientos son comunes en ingeniería sísmica.

Cuadro 1-1 Objetivos de comportamiento sísmico de un sistema

Categoría de servicio y orden de prioridad	Terremoto de base operativa (50 por ciento de probabilidad de ocurrir en 50 años; periodo de retorno: 72 años)	Terremoto de diseño (10 por ciento de probabilidad de ocurrir en 50 años; periodo de retorno: 475 años)
	Objetivos del comportamiento	
Tuberías	Fallas incidentales que afectan a <1% del sistema se deben reparar en 24 horas.	Fallas que producen la pérdida del servicio en hasta 30% del área se deben reparar en 7 días.
Instalaciones	Servicio de energía debe ser ininterrumpido. Se pueden producir daños menores a estaciones de bombeo y reservorios que se pueden reparar fácilmente.	Corte de energía por 72 horas. Se pueden producir daños menores a 70% de las estaciones de bombeo, tanques, reservorios y represas; sin embargo, todos deben continuar en operación. Daños significativos al 30% restante lo cual los pone fuera de servicio.
	Objetivos priorizados	
Protección de la vida humana	Riesgo para la seguridad humana es mínimo	Riesgo para la seguridad humana debe ser mínimo
Extinción de incendios	Debe estar disponible en todas las áreas	Disponible de 70% de las fuentes o reservorios después de aislar las áreas dañadas.
Servicio crítico Agua de bebida y salud pública Abastecimiento doméstico, comercial e industrial Daños a la propiedad	Servicio completo ininterrumpido a todas las áreas a los niveles de demanda de invierno. Se debe mantener la calidad adecuada del agua.	Servicio a 70% del área de servicio a un 70% del nivel de demanda de invierno; agua potable debe estar disponible en ubicaciones centralizadas, todo en menos de 72 horas. Se puede requerir una orden de “hervir el agua”. No hay agua para consumo humano, higiene ni alimentación. Servicio completo a todas menos unas cuantas áreas en menos de siete días al nivel de demanda de invierno. Servicio completo a todas las áreas en menos de un mes al nivel de demanda de invierno.
Irrigación	Servicio completo a todas las áreas en menos de siete días al nivel de demanda de verano.	Servicio completo a todas las áreas en menos de seis meses al nivel de demanda de verano.

Ejercicio que permitirá definir responsabilidades en caso se produzcan fallas en el sistema

Este ejercicio ayudará a definir las responsabilidades que la comunidad debe asumir en caso se produzcan fallas potenciales en el sistema y se deban implementar programas de mitigación sísmica. Se presenta el siguiente escenario en la Ciudad Sísmica:

- La ciudad tiene una población aproximada de 30.000 personas y se ubica a una distancia considerable de una gran ciudad.
- Es una comunidad residencial con algunas industrias ligeras.
- La ciudad creció rápidamente en la década de los setenta y ochenta ya que era considerada el lugar ideal para formar una familia.
- La zona industrial data de la década de los treinta.
- En años recientes, se han construido muchos centros comerciales en las afueras de la ciudad.

Pregunta 1 – Basado en la información recibida, ¿cómo calificaría la calidad de vida en la Ciudad Sísmica?

Mala Buena
1 2 3 4 5

El suministro de agua de la Ciudad Sísmica proviene de un río que fluye a través del centro de la ciudad y es alimentado por diversos pozos. Los suelos a lo largo del río se pueden licuar a consecuencia de un terremoto. Las tuberías de los sistemas de distribución están hechas de hierro fundido y de hierro dúctil, dependiendo de cuando fueron instaladas.

El área sufrió un terremoto moderado hace 40 años lo cual dejó algunos daños, pero no heridos. Los rastros geológicos sugieren que el último terremoto severo fue hace 215 años, pero el área no se encontraba poblada en ese entonces.

Muchos de los habitantes de la ciudad son conscientes de la potencial ocurrencia del terremoto de diseño. Los departamentos de policía y de bomberos han incorporado medidas de preparación sísmica en algunos de sus documentos de planificación de emergencias. El departamento de obras públicas/empresa de agua continúa operando con un presupuesto ajustado.

Con la nueva Ley de Agua Potable Segura de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), la ciudad deberá implementar medidas rigurosas que representarán el desembolso de un gasto significativo para su cumplimiento.

Pregunta 2 – ¿Qué tan preocupados deberían estar los residentes locales por su seguridad y por la obtención de servicios luego de un terremoto de diseño?

No preocupados Muy preocupados
1 2 3 4 5

Pregunta 3 – ¿Qué tan preocupados deberían estar los funcionarios públicos por la provisión de servicios después de un terremoto?

No preocupados				Muy preocupados
1	2	3	4	5

Pregunta 4 – Como alguien que entiende de sistemas de agua, ¿cree que es importante evaluar la vulnerabilidad sísmica del sistema de agua de la Ciudad Sísmica y adecuar el sistema según se requiera?

No es importante				Muy importante
1	2	3	4	5

Pregunta 5 – Si la vulnerabilidad sísmica y la adecuación de sus instalaciones son importantes, ¿quién es responsable de tomar acción?

	No es responsable				Es responsable
Gobierno federal/central	1	2	3	4	5
Gobierno estatal/regional/departamental	1	2	3	4	5
Gobierno local/municipio – proveedor de agua	1	2	3	4	5
Residentes – contribuidores municipales	1	2	3	4	5
Ingenieros	1	2	3	4	5
Empresarios locales	1	2	3	4	5

Pregunta 6 – Como alguien que entiende de sistemas de agua, ¿considera que es importante que la instalación tenga un seguro contra sismos?

No es importante				Muy importante
1	2	3	4	5

Pregunta 7 – Si el seguro contra sismos es importante, ¿quién es responsable de obtenerlo?

	No es responsable				Es responsable
Gobierno federal/central	1	2	3	4	5
Gobierno estatal/regional/departamental	1	2	3	4	5
Gobierno local/municipio – proveedor de agua	1	2	3	4	5
Residentes – contribuidores municipales	1	2	3	4	5
Ingenieros	1	2	3	4	5
Empresarios locales	1	2	3	4	5

En septiembre, cuando la vegetación está seca, se produce un terremoto de magnitud 6,5 con un epicentro aproximadamente a 16 kilómetros de la Ciudad Sísmica, causando los siguientes efectos:

- Se produce una fuerte vibración del terreno durante cerca de 10 segundos.

- Los suelos a lo largo del río se licuan y se desplazan hacia la orilla del río.
- Diversas construcciones de mampostería no reforzada que se encontraban en el centro colapsaron y dos personas murieron
- La planta de tratamiento de agua es afectada, principalmente como resultado de la licuefacción de suelos
- Se producen más de 50 rupturas en la tubería de hierro fundido lo cual inhabilita los sistemas de extinción de incendios. Los incendios en las dos localizaciones se extienden a las construcciones aledañas, una de las cuales alberga a un empleador local importante
- En menos de 72 horas, los proveedores locales y estatales de agua ponen a disposición agua de bebida en camiones cisterna
- El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (*US Army Corps of Engineers*) monta una planta de tratamiento de agua portátil para suministrar agua de bebida para su distribución en camiones
- El sistema de agua, incluidas las plantas de tratamiento y las tuberías, reanuda su servicio en menos de un mes, y en menos de tres meses, restablece su servicio completo
- La industria con mayor número de empleados queda en la bancarrota; tienen seguro contra incendios, pero no para casos de interrupción de la actividad empresarial
- Muchos de los minoristas locales no pueden abrir sus negocios hasta que se reestablezca el servicio de agua, lo cual hace que pierdan ingresos significativos
- Muchas empresas periféricas terminan en la bancarrota a pesar de que recibieron préstamos de FEMA.

Los funcionarios locales estiman que tomará una década para que la comunidad se recupere.

Pregunta 8 - ¿Quién es responsable de los problemas financieros de la comunidad?

	No es responsable				**Es responsable**
Gobierno federal/central	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Gobierno estatal/regional/departamental	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Gobierno local/municipio – proveedor de agua	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Residentes – contribuidores municipales	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Ingenieros	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Empresarios locales	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**