

**"Documento original en mal estado"**

## Capítulo 2

### Fundamentos para el análisis

#### Introducción

Todas las infraestructuras deben ser proyectadas tomando en consideración las amenazas naturales y características del área en la cual se encuentra ubicado el sistema. Muchos de los problemas que se han presentado en los sistemas a causa de fenómenos naturales son debidos a que dichos fenómenos no se consideraron en la etapa de concepción, diseño, construcción y operación del sistema. Por esta razón, el análisis de vulnerabilidad que se describe en este documento, es de gran importancia para evaluar la vulnerabilidad de los sistemas existentes y por construir.



La extensión y ubicación de los sistemas de agua potable y alcantarillado los hacen susceptibles a diferentes tipos de desastres.

José Castro. 1987

Los planes de mitigación y emergencia se fundamentan en el mejor conocimiento posible de la vulnerabilidad del sistema, en cuanto a: (i) deficiencias en su capacidad de prestación de servicios u operatividad; (ii) debilidades físicas de los componentes ante las sollicitaciones externas; (iii) debilidades de organización ante las eventuales emergencias que se puedan ocasionar. De una manera general, a la identificación y cuantificación de estas debilidades se le denomina Análisis de Vulnerabilidad, y es el proceso mediante el cual se determina el comportamiento esperado del sistema y sus componentes, para resistir en forma adecuada los efectos debidos a un desastre. Se identifican también las fortalezas del sistema y de su organización, por ejemplo: el personal con experiencia en operación, mantenimiento, diseño y construcción, para atender emergencias.

El análisis de la vulnerabilidad, en los términos anteriores, cumple cinco objetivos básicos:

- a) Identificar y cuantificar las amenazas que puedan afectar el sistema: tanto las naturales, como las provocadas por el hombre.
- b) Estimar la susceptibilidad de daño de aquellos componentes del sistema valorados como fundamentales para asegurar el suministro de agua en caso de desastres.



### Naturaleza del problema

De lo antes dicho queda claro que, en la estrategia de prevención y mitigación de los efectos esperados ante posibles eventos, tan importante es subsanar las debilidades de las obras existentes o por construirse, como definir del modo más confiable posible la frecuencia y la intensidad de los fenómenos esperados.

Como ilustración de lo anterior, en la Figura 2.1 se reproducen los rangos aproximados de frecuencias y áreas de impacto esperadas de un conjunto de amenazas que concurren a lo largo del trazado de un sistema de producción y transporte de agua potable, ubicado en la región norte-central de Venezuela. Con este ejemplo se destaca la incertidumbre asociada tanto a los valores de la frecuencia de los fenómenos allí presentados, como al área de impacto esperada. Se puede observar que los fenómenos con menor frecuencia de ocurrencia, tienen un área de impacto mayor que aquellos fenómenos más recurrentes, por ejemplo, los "máximos sismos de una región" tienen una frecuencia muy pequeña, pero un área de impacto muy grande.

### Comportamiento esperado de los componentes físicos de los sistemas de saneamiento

El desarrollo de algoritmos automatizados de análisis y el frecuente intercambio de información a escala mundial, han facilitado la posibilidad de evaluar el comportamiento esperado de las construcciones e instalaciones sometidas a sollicitaciones externas. Con ello, el análisis e identificación de las debilidades de las obras hechas por el hombre es una tarea cuyo rango de incertidumbre se ha reducido substancialmente.

En la cuantificación del comportamiento esperado de obras existentes la mayor incertidumbre proviene de los datos que las caracterizan: resistencia de los materiales, estado de las fundaciones, carbonatación del concreto, material y estado de tuberías, etc. Esta es la razón por la cual en la cuantificación de la vulnerabilidad bajo una cierta amenaza ( $A_i$ ), debe reconocerse la naturaleza incierta del comportamiento o estado final de la obra analizada.

### Cuantificación de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad de un determinado componente o sistema, se expresa como probabilidad de alcanzar un determinado estado  $E_j$  dado que ocurra  $A_i$ ; se expresa como:

$$P(E_j/A_i)$$

Los estados  $E_j$  son previamente definidos a conveniencia y descritos en forma sucinta. En lo que se refiere a daños y operatividad de equipos es frecuente adoptar los cuatro estados de daño siguientes:

- E1 = no daños
- E2 = daños leves; equipo operativo
- E3 = daños reparables; equipo no operativo
- E4 = daños graves o ruina; equipo fuera de servicio

Obsérvese que ocurrido un determinado fenómeno natural (sismo, huracán, inundación u otro), el componente o sistema ha de quedar en uno, y sólo uno de los cuatro estados adoptados. En la Tabla 2.1., se presenta un ejemplo en donde se muestran las probabilidades correspondientes a estados de daños severos y/o ruina, para diferentes grados de intensidad de Mercalli de ocho elementos que forman parte de un sistema de producción y transporte de agua potable; es decir en esa tabla se dan los

valores de  $P (E_r/U)$ , donde  $E_r$  es el estado de ruina, e  $U$  los cinco grados de Mercalli anotados. Esta tabla es resultado de un conjunto de análisis hechos sobre la respuesta esperada de los componentes del sistema, tomando en consideración los criterios de diseño y construcción existentes para el momento de su ejecución.

### Cuándo debe hacerse un análisis de vulnerabilidad

Debe realizarse un estudio de análisis de vulnerabilidad en aquellas instalaciones y obras de infraestructura, cuyo eventual mal funcionamiento o ruina (debido a los efectos esperados de los desastres considerados) pueda generar situaciones de emergencia o demandas que excedan la capacidad de atención.

Por ejemplo, las empresas que producen o comercian petróleo y sus derivados, han establecido criterios de tolerancia de riesgo social (véase la Figura 2.3) y cuando el riesgo no es tolerable, es obligatoria la adopción de medidas de ingeniería para reducirlo. Los criterios anteriores deben ser complementados para aplicarlos a los sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado.

### Cálculo de la vulnerabilidad física

#### Esquema general

El esquema general para la evaluación de la vulnerabilidad y medidas de mitigación se da en la Figura 2.2.

El denominado "walkdown" o evaluación preliminar, basada en inspecciones en sitio y cálculos sencillos corresponden al Nivel 1 de análisis; el Nivel 2 es aquel para el cual se requiere un análisis más riguroso. En cualquiera de los dos casos, el resultado debe expresarse en la forma cuantitativa para facilitar la toma de decisiones por parte de las autoridades correspondientes.

Sea en el Nivel 1 ó el Nivel 2, con frecuencia algunos pronunciamientos pueden fundamentarse en estadísticas previas. Por ejemplo, el procedimiento para cuantificar el número de roturas por unidad de longitud de tuberías de distribución, puede fundamentarse en estadísticas previas (Anexo 3).

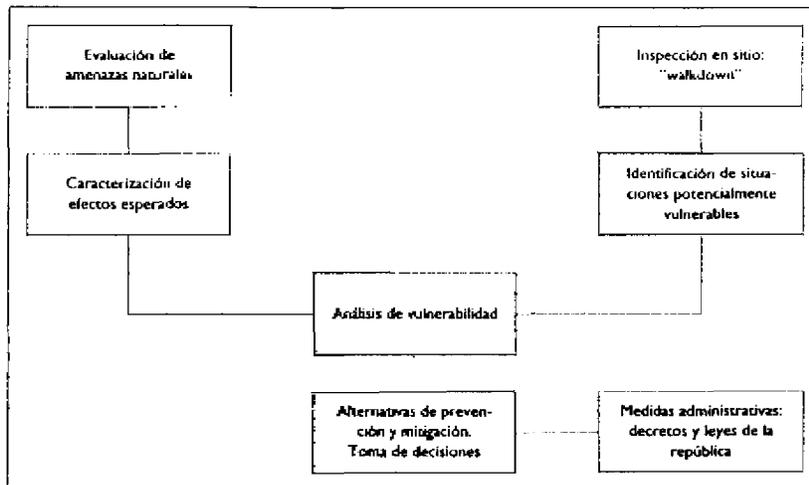
Tabla 2.1  
Sistema de producción y transporte de agua potable  
Probabilidad correspondiente a los estados de daño severos  
y/o ruina (sismo en época de estiaje)

Intensidad de Mercalli	Chimenea equilibrio	Represa de tierra	Tuberías gran diámetro		Estación de bombeo y S/E	Puente	Túneles	Planta de tratamiento
			Plano	Ladera				
VI	--	--	--	0.02	0.02	--	--	--
VII	0.05	0.10	--	0.15	0.10	0.05	0.01	--
IX	0.4	0.50	0.05	0.40	0.30	0.15	0.10	0.15
X	0.70	0.80	0.20	0.80	0.60	0.30	0.30	0.40
PH	$2.2 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	$0.4 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$0.7 \times 10^{-3}$	$0.9 \times 10^{-3}$

Fuente: OPS/OMS, Caso Estudio: Vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y alcantarillado frente a deslizamientos, sismos y otras amenazas naturales. Caracas, 1997

(\*) Probabilidad anual de alcanzar estados de daños severos y/o ruina en áreas hasta unos 15 km al sur del Valle de Caracas.

Figura 2.2  
Diagrama para la evaluación de la vulnerabilidad y medidas de mitigación



En otros componentes, tal tipo de estadística no existe, como por ejemplo en chimeneas de equilibrio o torres de disipación de gran altura, en tanques de succión de pared delgada, u otros componentes. Para resolver tales casos, se recomienda emplear metodologías elaboradas para cuantificar la vulnerabilidad.

**Matrices de probabilidad de daños y/o de falla**

Es necesario exigir que los resultados del análisis de vulnerabilidad física sean presentados en forma cuantitativa para facilitar la toma de decisiones; es decir, por medio de las matrices de probabilidad de daños. Siguiendo con la nomenclatura adoptada, si E<sub>j</sub> es un determinado grado de daño, los resultados del análisis de vulnerabilidad suelen venir expresados de acuerdo al formato de la Tabla 2.2.

Obsérvese que, por ejemplo, (p42) expresa la probabilidad de que si se presenta el fenómeno A2 el componente descrito por esa matriz alcance el grado de daño E4. Es evidente que para cualquier fenómeno i, se debe cumplir: (p1i + p2i + p3i + p4i) = 100%.

Figura 2.3  
Criterio de tolerancia de riesgo social

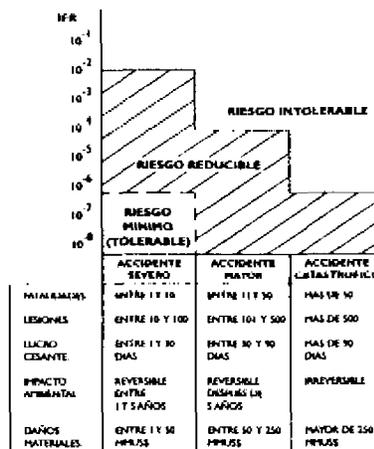


Tabla 2.2  
Formato de la Matriz de Vulnerabilidad Física o de Probabilidad de Daños

Grado de daño	P(Ej/Ai) = Probabilidad de que se de Ej dado Ai			
	A1	A2	Ai .....	An
E1	p11	p12	pi1 .....	pn1
E2	p21	p22	pi2 .....	pn2
E3	p31	p32	pi3 .....	pn3
E4	p41	p42	pi4 .....	pn4

### Vulnerabilidad de los sistemas

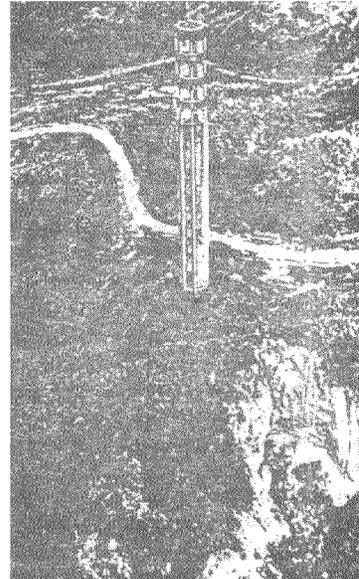
El análisis de vulnerabilidad debe ser realizado por un grupo de profesionales que tenga amplia experiencia en el diseño, operación, mantenimiento y reparación de los componentes del sistema.

Las vulnerabilidades detectadas en el sistema, tanto en los aspectos físicos, operativos, como en los referentes a la administración, se sintetizarán en matrices de análisis que recogen la información básica para la elaboración de los planes de mitigación y atención de emergencia y desastres. Las matrices de análisis que se utilizarán para la identificación de las debilidades y fortalezas del sistema serán las siguientes:

- **Matriz 1:** Aspectos operativos (Matriz 1A para agua potable y Matriz 1B para alcantarillado sanitario).
- **Matriz 2:** Aspectos administrativos y capacidad de respuesta.
- **Matriz 3:** Aspectos físicos e impacto en el servicio.
- **Matriz 4:** Medidas de mitigación y emergencia (Matriz 4A para los aspectos administrativos y operativos y Matriz 4B para los aspectos físicos)

Sin embargo, también es necesario describir en forma detallada los aspectos organizativos y legales, la disponibilidad de recursos para la atención de emergencias, la caracterización de la zona donde se encuentran ubicados los diferentes componentes del sistema de abastecimiento de agua potable y alcantarillado sanitario, y la vulnerabilidad de los componentes físicos y la capacidad de respuesta de los servicios.

Por último, se debe contar con los planos de dichos sistemas y con información referente a los



La selección de la ubicación de los diferentes componentes de un sistema puede ser la principal causante del aumento de vulnerabilidad.

materiales, diámetros, volúmenes y toda aquella otra información que permita caracterizar de la mejor forma posible el sistema a evaluar.

### Matrices 1A y 1B: Aspectos operativos

Hacen referencia a los aspectos relacionados con el funcionamiento del sistema, para lo cual es necesario contar con datos relevantes de cada componente: flujos, niveles, presiones y calidad del servicio. Para el caso de agua potable interesa conocer la capacidad del sistema, cantidad suministrada y dotación, así como la continuidad del servicio y la calidad del agua. Para el caso de alcantarillado sanitario es necesario conocer la cobertura, capacidad de evacuación y calidad de efluentes.

La descripción del sistema debe estar acompañada de esquemas que faciliten el entendimiento del funcionamiento del mismo. Deberán considerarse además las variaciones de las épocas de verano e invierno que pudieran presentar diferentes modalidades de operación y de condición de los servicios. Esta información servirá para el llenado de las Matrices 1A - Aspectos Operativos (Sistemas de Agua Potable) y Matriz 1B - Aspectos Operativos (Sistemas de Alcantarillado Sanitario)

Para el caso de sistemas de agua potable, dentro de los aspectos operativos a considerar se deberá analizar la capacidad y condiciones de continuidad de los componentes del sistema tales como: captación, líneas de conducción, planta de tratamiento, tanques de almacenamiento y zona de abastecimiento, entre otros. Esta información permitirá determinar como se verá afectada la operación y el abastecimiento de agua potable frente a la posibilidad de que falle alguno de los componentes del sistema. Para sistemas de alcantarillado sanitario, la información a considerar es similar a la de los sistemas de abastecimiento de agua potable, pero los componentes a considerar serán la conducción, planta de tratamiento y disposición final.

Por otra parte y con el fin de entregar una respuesta eficaz en caso de que algún desastre afecte al sistema o algún componente de éste, es necesario conocer si la empresa cuenta con los medios de comunicación e información que permitan alertar sobre la ocurrencia de un determinado fenómeno, el funcionamiento defectuoso de alguno de los componentes del sistema o informar a los usuarios sobre las restricciones en el servicio. Dentro de los sistemas de información que debería contar la empresa se pueden destacar:

- *Sistemas de información y de alerta interinstitucional*, por ejemplo la existencia de sistemas de comunicación entre la empresa con defensa civil, institutos meteorológicos, institutos geofísicos, entre otros, que permitan alertar a la empresa sobre la proximidad y/o acontecimiento de un determinado fenómeno natural, y facilitar la toma de decisiones por parte de la empresa.
- *Sistemas de información y alerta en la empresa*, que permitan identificar el comportamiento defectuoso de alguno de los componentes del sistema por el impacto de un fenómeno natural, mediante mecanismos de comunicación remota, y que permitan instruir al personal sobre las acciones a seguir para atender la emergencia.
- *Sistemas de información a los usuarios*, que faciliten la comunicación, mediante medios de comunicación masiva o boletines, para dar a conocer las condiciones y restricciones de los servicios de agua potable y alcantarillado con posterioridad a un desastre.

### Matriz 2: Aspectos administrativos

Para evaluar las debilidades y limitaciones de los sistemas analizados es preciso conocer sus normas de funcionamiento y los recursos disponibles que pudieran ser usados para el abastecimiento de agua y

evacuación de aguas residuales en situaciones de emergencia, así como en la fase de rehabilitación. Esta información será recopilada en la Matriz 2 - Aspectos administrativos y capacidad de respuesta.

La capacidad de respuesta de la empresa para atender los efectos de un determinado desastre, quedará establecida por la consideración de aspectos de prevención, mitigación y preparativos frente a desastres en la organización institucional, en la operación y mantenimiento del sistema y el apoyo administrativo de la empresa.

Dentro de los aspectos administrativos y capacidad de respuesta se deben documentar aspectos relativos a la organización institucional tales como:

- (i) Existencia de planes de mitigación y de emergencia.
- (ii) Constitución y funcionamiento del comité de emergencia.
- (iii) Existencia de una comisión encargada de la formulación del plan de mitigación.
- (iv) Evaluación del sistema de información y alerta.
- (v) Coordinación interinstitucional con empresas tales como de energía, comunicación, municipales, defensa civil y otras instituciones.

Los aspectos de operación y mantenimiento del sistema también inciden directamente en la vulnerabilidad del sistema y sus componentes, y deben ser considerados:

- (i) Existencia de programas idóneos de planificación, operación y mantenimiento que incorporen los conceptos de prevención y mitigación de desastres.
- (ii) Existencia de personal capacitado en prevención y atención de desastres.
- (iii) Disponibilidad de equipo, repuestos y maquinarias.

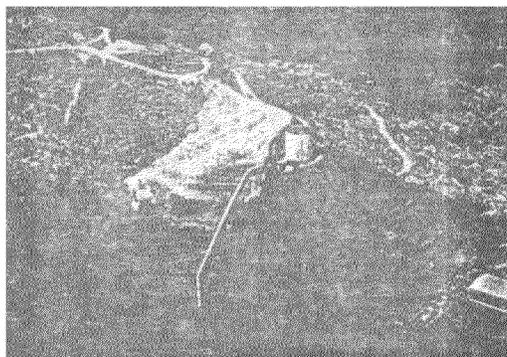
Las facilidades existentes en el apoyo administrativo de las empresas permitirán dar una pronta y eficaz respuesta en la rehabilitación de los posibles daños que puedan sufrirse en un desastre. La empresa debiera contar con mecanismos en su administración que permitan contar con:

- (i) Disponibilidad y manejo de dinero en situaciones de emergencia, insumos y/o stock de emergencia.
- (ii) Apoyo logístico de personal, almacenes y transportes.
- (iii) Disponibilidad de contratación de empresas privadas para apoyar medidas de rehabilitación y mitigación.

### Matriz 3: Aspectos físicos

La mayoría de las veces la vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario frente a desastres se relaciona estrechamente con las debilidades en sus componentes físicos. Es por ello fundamental, identificar el tipo de amenazas que pueden producirse, y estimar los daños posibles.

Hay varios factores que deben considerarse. Por un lado, la infraestructura de los sistemas de



La incorrecta selección del terreno o del diseño son las principales causas de la vulnerabilidad de los sistemas

agua potable y alcantarillado sanitario se encuentra dispersa en grandes áreas de terreno, y por tanto expuesta a diferentes tipos de amenazas. En su construcción se utilizan una gran variedad de materiales que hace más complejo el problema. Deben por tanto, considerarse diferentes tipos de amenazas para cada componente, dependiendo de su ubicación dentro del sistema, y de los riesgos presentes en la zona.

Este tipo de consideraciones, junto a las relacionadas con los tiempos de rehabilitación, daños estimados y su impacto en el servicio se recopilarán en la Matriz 3 dedicada a aspectos físicos e impacto en el servicio.

Así mismo, se debe priorizar cada amenaza de acuerdo al posible impacto en el sistema, por ejemplo, las áreas de captación ubicadas en zonas altas pueden ser más susceptibles a ser afectadas por la acción de fuertes lluvias y/o desahucios, y menos a los efectos de sismos. Para este fin y el de identificar las áreas de impacto en el sistema, se recomienda superponer los planos de los sistemas con los mapas de las amenazas presentes.

Como el fin de las empresas prestadoras de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario es entregar un servicio de calidad a sus usuarios, es de gran importancia el conocer el tiempo que tomará reparar los posibles daños sufridos a causa de un desastre, cual será la capacidad remanente del sistema con posterioridad al desastre y como se verá afectado el servicio en lo que se refiere a la calidad, continuidad y cantidad de agua suministrada. Con la información anterior se podrá establecer el nivel de servicio que está en condiciones de prestar la empresa mientras dure la emergencia.

#### **Matriz 4A y 4B: Medidas de mitigación y emergencia**

El complemento lógico y deseable de un estudio de análisis de vulnerabilidad debe ser la ejecución de las necesarias medidas de prevención y mitigación para corregir las debilidades encontradas. Por ello, es muy importante que la formulación de recomendaciones técnicas y la estimación de los costos de las medidas de mitigación, formen parte del propio estudio de vulnerabilidad. Algunas de esas medidas de mitigación serán complejas técnicamente y requerirán estudios adicionales sobre diseños de ingeniería y estimación de costos.

Las medidas de mitigación afectarán lógicamente a los elementos identificados como más vulnerables, ya sean aspectos operativos, administrativos o físicos. Tendrán relación con el reforzamiento del sistema para reducir el impacto de los fenómenos naturales, o con las provisiones necesarias que el sistema deba realizar para reaccionar adecuadamente a una emergencia. La información referente a estas medidas se presentará en las matrices 4A y 4B.