

CAPÍTULO 4

VULNERABILIDAD DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

MATRIZ DE VULNERABILIDAD

Se denomina matriz de vulnerabilidad al conjunto de vectores organizados para eventos (E_i) de intensidad creciente, cuyas probabilidades de ocurrencia (P_i) en un determinado horizonte de tiempo dependen de la amenaza o peligrosidad en la región estudiada.

Como ejemplo nos referiremos al cuadro 4.1 que reproduce la matriz de vulnerabilidad basada en la estadística de daños por sismos de 456 represas de tierra. Los autores de ese trabajo caracterizaron cuatro grados de daño (no daños, daños menores, moderado y severo) y cuatro grados de intensidad sísmica basados en los grados de Mercalli (VI, VII, VIII y IX).

VULNERABILIDAD DE LOS COMPONENTES

A continuación se caracteriza la vulnerabilidad sísmica de algunos de los componentes propios de los sistemas de abastecimiento de agua potable y de alcantarillado.

Represas

La estadística sobre el comportamiento de represas de tierra reporta más casos de daños por sismos; en parte esto se debe a que son más numerosas que las de concreto (Chang 1992). De modo ilustrativo y con las reservas que se especifican a continuación, el desempeño esperado puede sintetizarse en el cuadro 4.2. En ese cuadro se toma como referencia las zonas sísmicas de Venezuela según el mapa vigente de la norma COVENIN 1756. En Venezuela, de un total de 49 embalses ubicados en zonas sísmicas, 33 son de tierra, 4 de enrocado, 3 de concreto, 1 de relleno hidráulico y 8 de material no identificado (MOP 1976 y MARNR 1995).

Es evidente que cualquier pronunciamiento sobre la seguridad de una represa debe estar sustentada en estudios detallados sobre: (i) la amenaza sísmica local, (ii) las propiedades dinámicas y la respuesta del sistema presa-embalse, y (iii) los materiales del embalse.

Cuadro 4.1
Matriz de vulnerabilidad basada en la estadística de daños por sismo
de 456 represas de tierra (Chang 1992)

Intensidad sísmica	Grado de daño**			
	D ₀ (No daño)	D ₁ (Menores)	D ₂ (Moderados)	D ₃ (Severos)
VI (132) *	58,3	33,3	6,2	2,2
VII (284) *	18,7	48,9	21,1	11,3
VIII (28) *	7,1	39,3	17,9	35,7
IX (12) *	0	16,7	16,7	66,6

* Número total de represas en ese nivel de intensidad sísmica.

Grado de daños en represas de tierra

- Grado 1 (D₁). daños menores
 - algún agrietamiento transversal o longitudinal de pequeña dimensión;
 - evidencia de asentamientos o levantamientos locales;
 - agrietamiento en cara aguas arriba;
 - pequeñas grietas en la estructura de las tuberías o aliviadero.
Cualquiera de los daños anteriores no se considera que amenaza la estabilidad de la represa.
- Grado 2 (D₂) daños moderados
 - pequeño incremento de flujo en la base de la presa;
 - número de grietas transversales o longitudinales inferior a 10-20 de ancho y longitud pequeña o asentamiento y levantamiento concurrentes;
 - desplazamiento limitado a algún bloque de piedra suelto en el recubrimiento aguas abajo;
 - agrietamientos aguas arriba.
 - estructura de las tuberías agrietadas y levemente inclinada;
 - grietas en la estructura del aliviadero.
- Grado 3 (D₃). daños severos
 - deslizamiento o agrietamiento por deslizamiento en el cuerpo de la presa;
 - percolación en las laderas de la presa;
 - incremento manifiesto del flujo en la base de la presa;
 - se detecta fuentes de agua o volcanes de arena;

- descenso del nivel de agua de la presa.
- el número de grietas longitudinales o transversales de la represa excede de 10-20;
- el ancho de las grietas excede de 5 a 10 cm;
- las longitudes alcanzan 100 o más metros;
- hay flujo de agua y fractura de la estructura de las tuberías;
- la estructura de la válvula de la tubería queda fracturada e inclinada.

Comentarios: En adición al **grado 0 (D₀)**, ningún daño, los tres grados anteriores se asocian a estados finales de embalses ubicados en áreas de isosistas conocidas. El grado 3 (D₃) se considera en el umbral de la inestabilidad.

Cuadro 4.2
Generalización sobre el desempeño esperado
de represas de tierra

Zona sísmica de Venezuela (COVENIN 1756-82)						
ALTURA (m)	0	1 (0,08g)	2 (0,15g)	3 (0,22g)	4 (0,30g)	(1) > 0,30g
<i>< 20</i>	<i>NO SE CONOCEN PROBLEMAS POR EFECTO DE VIBRACIONES SÍSMICAS</i>					
<i>> 20</i>			<i>RIESGO MUY BAJO EN REPRESAS BIEN CONSTRUIDAS</i>			
<i>< 60</i>				<i>FALLAS LOCALES EN SISMOS PASADOS</i>		
<i>> 60</i>						

(1) Zona en discusión

Tuberías

Para las tuberías de mayor diámetro, con estadísticas publicadas sobre los efectos de sismos, se ha elaborado el cuadro 4.3 que muestra el número medio de reparaciones debido a sismos.

Cuadro 4.3
Número medio de reparaciones de tuberías por sismos

Aceleración máxima del terreno (g)	Número medio de reparaciones / km	
	Suelos promedio	Suelos competentes
0,05 - 0,10	0,001	0,0005
0,15 - 0,20	0,04	0,008
0,25 - 0,30	1,5	0,06
0,40 - 0,50	20	3,00

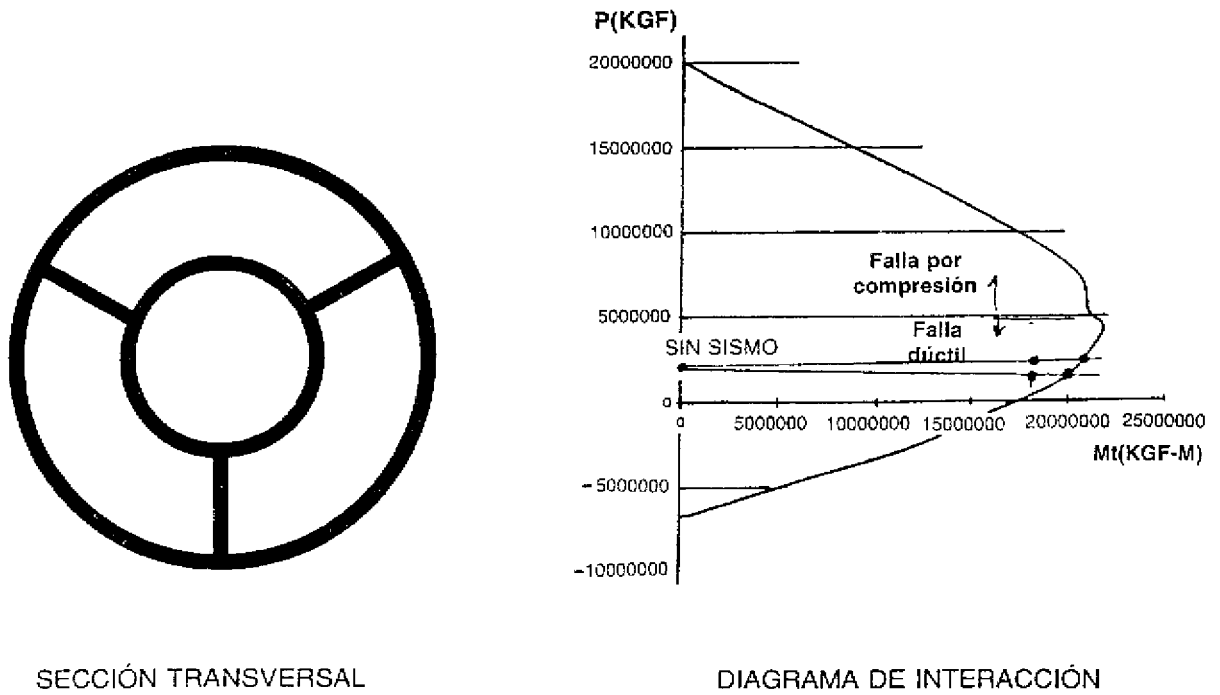
Fuente: (American Society of Mechanical Engineers 1985, Ariman 1987; BSSC 1987; Shinozuka 1992 y Nyman 1984)

Chimeneas de equilibrio

Por su configuración estructural, las chimeneas de equilibrio pueden ser vulnerables a sismos, vientos extremos y a fallas en sus fundaciones.

El cálculo de los efectos sobre la chimenea debido a las acciones eólicas se llevó a cabo de acuerdo con las prescripciones establecidas en COVENIN 2003 (1986) y CUBIC (1989). De ese análisis se desprende que para la mayor de las chimeneas expuestas (98 m de altura y 7,0 m de diámetro) con superficie exterior cilíndrica, de concreto, sin huecos, los vientos críticos que pueden ocasionar daños de cierta importancia son de más de 190 (km/hora). Esto equivale a una velocidad de 52,8 (m/seg), la cual es más del doble que la establecida en la norma venezolana para esa zona considerada para una vida de servicio de 100 años y, por lo tanto, tiene una probabilidad despreciable de ser excedida.

En relación con los sismos y luego de verificarse la capacidad resistente a sismos por medio de un análisis dinámico (CORAL 83 1997) y considerando el área de armaduras y su confinamiento, a esa configuración estructural de la chimenea de equilibrio estudiada (figura 4.1) se le asigna una elevada probabilidad de ruina para demandas de ductilidad que excede 50% lo aceptado en las normas vigentes. Tomando como base los criterios y datos anteriores se formuló la matriz de probabilidad de daños que se presenta en el cuadro 4.4 y 4.5.



SECCIÓN TRANSVERSAL

DIAGRAMA DE INTERACCIÓN

Figura 4.1

Chimenea de equilibrio de 98 m de altura y 7 m de diámetro exterior. Sección transversal (espesor uniforme de 20 cm de concreto armado) y diagrama de interacción

Cuadro 4.4

Grado de daño y rangos de aceleración en una chimenea de 98 m de altura 17 m de diámetro

Grado de daño	Demanda de ductilidad	Rango de aceleración (g)
No daño	< 1	< 0,16
Menores	1	0,23
Moderados	1,25	0,30
Severos	1,50	0,35
Ruinas	≥ 2,25	≥ 0,51

Cuadro 4.5
Matriz de probabilidad de daños de las chimeneas de equilibrio

Grado de daño	Grado de intensidad de Mercalli					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
No daño (D < 1)	100	90	70	30	5	0
Menores (D = 1)	--	10	15	30	15	5
Moderados (D = 1,25)	--	--	10	20	20	10
Severos (D = 1,50)	--	--	5	15	20	15
Ruinas (D = 2,25)	--	--	--	5	40	70

Red de alta tensión

Los elementos de la red de alta tensión están constituidos por subestaciones de alta tensión (115 kW y menos), torres y líneas de transmisión (Pieretti 1965).

La experiencia de sismos pasados revela que la vulnerabilidad de la red, en términos de operatividad, se encuentra particularmente condicionada por los equipos de porcelana de las subestaciones eléctricas (EERI 1986). Las conclusiones sobre su desempeño esperado, basadas en una estadística de 1400 equipos, (Eidinger 1995) son las siguientes.

Los equipos de 215 kW, al igual que los equipos de mayor nivel de tensión y los componentes más frágiles (columnas aisladoras de porcelana, interruptores de tanque vivo y transformadores de tensión), son más vulnerables que los equipos anclados o con centro de gravedad bajo. La probabilidad de falla que se espera en los equipos frágiles, en término medio, pueden expresarse como:

$$P_f = 0.21 + 0.43 (A_o)$$

$$0,05g \leq A_o \leq 0,90g$$

Para los equipos menos frágiles, su probabilidad de falla se supondrá igual a la mitad de la de los equipos frágiles.

En el cuadro 4.6 se describe el desempeño esperado de las subestaciones eléctricas de alto voltaje (≤ 230 kW) de acuerdo con los criterios establecidos para diferentes estados de daños en términos de porcentaje de equipos afectados, según J. Eidinger (1995).

En relación con las líneas, el problema sísmico es menor; como eventual problema destaca la inestabilidad de las fundaciones de torres ubicadas cerca de taludes o en las cercanías de márgenes de ríos donde pueden ser debilitadas, problema que no se evalúa en este trabajo.

Estaciones de bombeo

Las estaciones de bombeo están constituidas por tres elementos fundamentales: (a) las bombas centrífugas; (b) la subestación de alto voltaje; y (c) los tanques de succión.

- *Bombas centrífugas:* De acuerdo con PDVSA (1993), la tasa de fallas de las bombas centrífugas en condiciones de operación es de $1,71 \times 10^{-2}$ (1/año). Si P es la probabilidad de falla de un componente y hay n componentes idénticos, la probabilidad de que falle alguno es $1-(1-P)^n$; para pocos componentes y probabilidades pequeñas, la probabilidad anterior se puede estimar como: $n \cdot P$.

Cuadro 4.6
Vulnerabilidad de las subestaciones de voltaje igual o inferior a 230 kW

Grado IMM	Probabilidad de falla (%)		Desempeño esperado	Tiempo estimado de interrupción (horas) (1)
	Componentes frágiles	Componentes no frágiles		
V	--	--	Subestación funcional	--
VI	10	4	Breve interrupción	½ a 1
VII	17	8	Daños menores	~ 4
VIII	24	12	Daños moderados	~ 8
IX	31	16	Daños en equipos, sustitución de piezas	~ 12
X	≥ 38	≥ 19	Daños en equipos y edificio de control	~ 24

(1) No incluye tiempo de transporte de equipos al sitio.

Si se supone que hay cuatro bombas en operación, la probabilidad de que falte alguna bomba es muy cercana a:

$$1 - (1 - 0,0171)^4 = 6,7\%$$

Aún cuando esta probabilidad es algo mayor por razones de desgaste, se considera pequeña si se toma en cuenta el número de bombas disponibles en cada estación.

- *Subestación de alto voltaje:* el elemento más vulnerable es el suministro de energía, bien sea por falla del sistema, lo cual implica tiempos de rehabilitación relativamente cortos o por destrucción de elementos de la subestación como consecuencia de terremotos u otro tipo de desastre.
- *Tanques de succión:* no presentan aspectos particularmente vulnerables y pueden ser tratados como chimeneas de poca esbeltez.

Túneles

El desempeño de túneles, minas y grandes espacios subterráneos con espesores sustanciales de roca generalmente ha sido satisfactorio. Oven y Sholl (1981) agruparon las estadísticas sobre los efectos constatados en túneles de acuerdo a los siguientes tres grados:

No daño:	No hay nuevas grietas ni caída de rocas.
Daños menores:	Nuevos agrietamientos y caída de rocas.
Daños graves:	Agrietamiento severo, deslizamientos de roca importantes y taponamiento, especialmente en los extremos del túnel.

Los resultados de estudios analíticos y la estadística disponible para túneles predominantemente ubicados en roca se pueden sintetizar en el cuadro 4.7, cuyos valores pueden diferir para túneles excavados en otros tipos de materiales.

Cuadro 4.7
Rangos de movimientos máximos del terreno para tres niveles de daño en túneles ubicados en roca

Niveles de daño	Movimientos máximos del terreno	
	Aceleraciones (g)	Velocidades (cm/s)
No daño	< 0,20	< 20
Daños menores	0,20 - 0,40	20 - 40
Daños	> 0,40	> 40

Lo anterior se puede presentar en forma de matrices de vulnerabilidad referidas a grados de intensidad de Mercalli, como se muestra en el cuadro 4.8.

Cuadro 4.8
Matriz de probabilidad de daños en túneles expresados en
grados de intensidad de Mercalli

Nivel de daño	Intensidad de Mercalli (IMM)				
	VI	VII	VIII	IX	X
No daños	90	70	40	10	-
Menores	10	28	40	40	15
Graves	-	2	20	50	85

Turbiedad

La turbiedad generada por el arrastre de sólidos depende de las características geológicas de las cuencas que drenan hacia las fuentes de agua (Williams y Berndt 1977). En el caso particular del río Tuy, afluente del sistema de agua analizado, la turbiedad en períodos de lluvia puede sufrir cambios sustanciales. En la muestra que se ilustra en la figura 4.2, correspondiente a 1996 en la época de lluvias, el grado UNT llegó a multiplicarse por 30 respecto al período no lluvioso; esta variación se refleja en los efluentes de la planta de tratamiento.

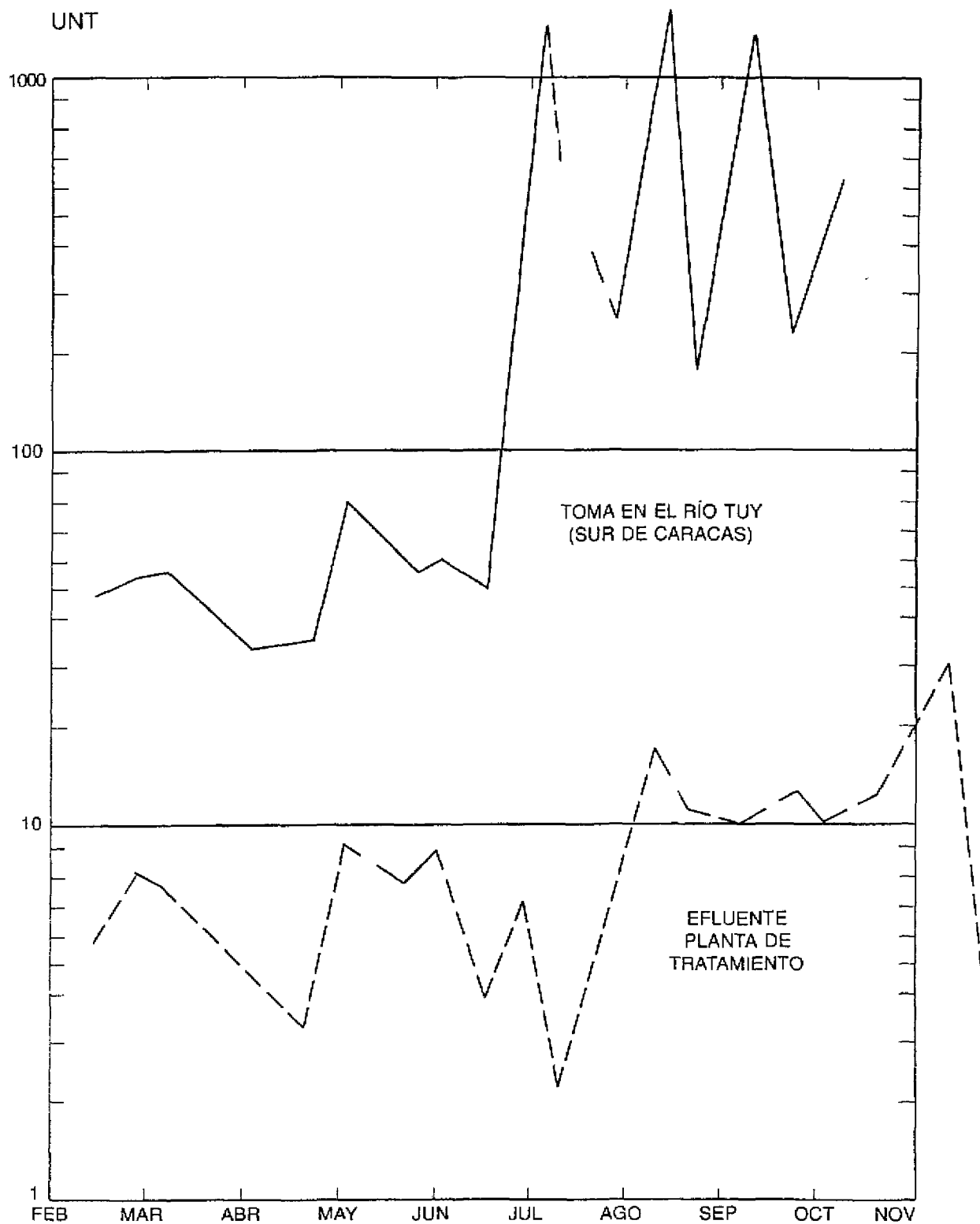


Figura 4.2
Variación de la turbiedad (muestra de 1996)
UNT: Unidades nefelométricas de turbiedad

CAPÍTULO 5

PROCEDIMIENTOS PARA EVALUAR LA CONFIABILIDAD DEL SISTEMA ANALIZADO

En la literatura se encuentran variados procedimientos para cuantificar la confiabilidad de los sistemas. Se entiende por confiabilidad a la probabilidad de que el sistema deje de prestar el servicio para el cual fue diseñado (Hopkins 1993); (Nyman 1984); (CAE 1991).

Cualquiera sea la metodología que se emplee, la finalidad de la evaluación es identificar los elementos críticos del sistema y determinar la sensibilidad del mismo a eventuales intervenciones, generalmente con el fin de optimizar la eficiencia del sistema.

TIEMPO DE REHABILITACIÓN

Esta medida toma en consideración la capacidad remanente del componente, la magnitud del daño y las expectativas de rehabilitación en unidades de tiempo. Con los análisis usuales de ingeniería, lo anterior puede aplicarse a estaciones y subestaciones de bombeo, tanques de almacenamiento, chimeneas de equilibrio, tanques de succión, puentes, tuberías de conducción y otros componentes.

Al estimar el tiempo de rehabilitación se debe considerar: (a) la magnitud del daño; (b) requerimientos y disponibilidad de recursos humanos, materiales y financieros; (c) facilidad de acceso al lugar; y (d) el grado de afectación de cada componente.

Comparación de tiempos de rehabilitación de tuberías-puentes sobre ríos

En la foto 5.1 se observa el puente A que cruza la quebrada Las Palmas con acceso inmediato a la carretera y en la foto 5.2 el puente B que cruza el río Guaire, de difícil acceso, en una zona de topografía irregular. En el cuadro 5.1 se comparan tiempos de rehabilitación correspondientes a problemas similares de socavación de las bases de las pilas de apoyo.

Para calcular el tiempo total de rehabilitación del sistema, se debe considerar las configuraciones en serie o en paralelo de los componentes del sistema. Por ejemplo, en el caso del cuadro 5.1 las tareas (2) y (3) pueden hacerse paralelamente.



Foto 5.1
Puente (quebrada Las Palmas) con acceso directo a la carretera



Foto 5.2. Puente B (río Guaire) en zona de difícil acceso. Actualmente se accede por medio de la escalerilla de la mano derecha que conduce a una carretera que finaliza 20 metros más arriba.

Cuadro 5.1
Estimación del tiempo de rehabilitación
para dos tuberías-puente

Fase o tarea		Tiempo en horas	
		Puente A Ø = 78"	Puente B Ø = 78"
1	Identificación del daño (1)	10 - 20	24 - 72
2	Interrupción del flujo	2	2
3	Preparación del material, equipo y cuadrilla	4	4
4	Traslado al sitio	1	5 - 10
5	Ejecución de reparación (2)	15 - 30	100 - 200
6	Coordinación de reinicio y puesta en operación	4	4
7	Total	36 - 61	139 - 292

- (1) Depende de la frecuencia de inspección; el puente A es visible desde una vía secundaria de acceso a una estación de bombeo. El puente B suele ser inspeccionado por vía aérea.
- (2) Se ha supuesto que la reparación requiere excavación parcial y llenado con concreto armado. En el caso del puente B, la solución puede requerir apuntalamientos temporales si el río está crecido

SELECCIÓN DE ESCENARIOS

Generalmente, para verificar la confiabilidad de los sistemas se seleccionan escenarios extremos (Davis 1980); (Hopkins 1993); (World y Jochim 1989); (CAE 1991).

Entre las amenazas naturales consideradas en el presente documento destacan las tres siguientes:

- *Vientos huracanados*: la distribución de valores extremos de velocidades de viento dada en la figura 2.2, con velocidades asociadas a períodos de retorno de 500 años, permite observar que sólo representan 66% de los vientos equivalentes a acciones sísmicas de diseño. La evaluación de solicitaciones fue hecha con la norma COVENIN 2003-86 "Acciones del viento sobre las construcciones", para la cual se seleccionó una chimenea de 98 m de altura y 7,0 m de diámetro, considerado como el componente potencialmente más vulnerable a la acción eólica.

- *Tormenta tropical:* los efectos de las crecidas en las pilas de los puentes, tales como la erosión (inestabilidad de pendientes y deslizamientos potenciales) y posibles efectos en la turbiedad del agua almacenada en los embalses, sólo es objeto de evaluación parcial.
- *Sismos:* El área puede ser afectada