

Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua

A la Libertad por la Universidad !!



INGENIERIA GEOLÓGICA I

RIESGO SÍSMICO

Dr. Ingeniero Tupak Obando R., Geólogo
Doctorado en Geología y Gestión Ambiental
Celular: 84402511
Website: <http://blogs.monografias.com/>

Managua, Marzo -2010

RIESGO SÍSMICO

En la actualidad, es en el campo de los terremotos donde más se han desarrollado los estudios de riesgo. Barbat (1998) define el **riesgo sísmico** como las pérdidas esperadas que sufren las estructuras durante el lapso de tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica; dicho lapso de tiempo se denomina **período de exposición o periodo de vida útil** de las estructuras



Periodo de vida útil para distintas instalaciones (t)

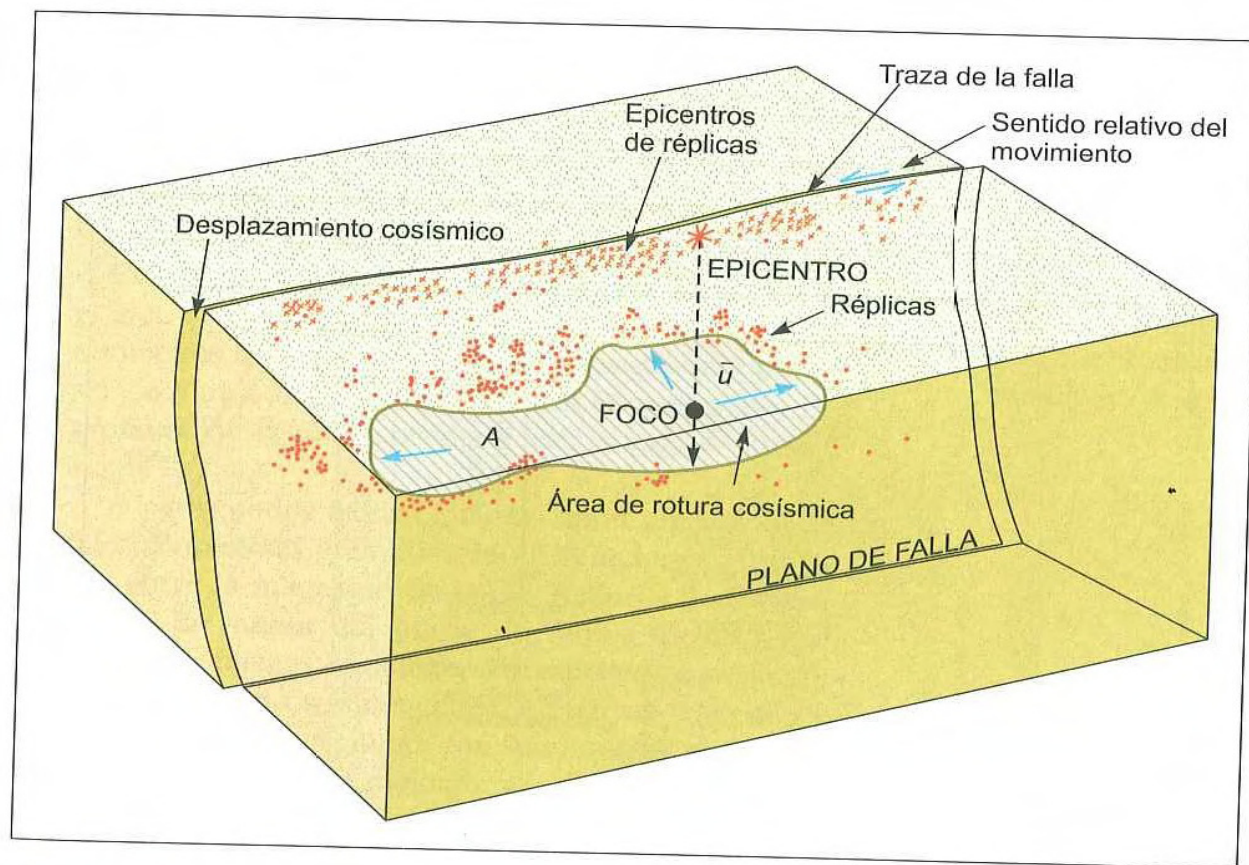
Estructura o instalación	t (años)
Almacenamiento de residuos radiactivos	10.000
Centrales nucleares	40-80
Presas	100-150
Puentes, túneles y grandes obras de infraestructura	100
Almacenamiento de residuos tóxicos	250
Edificios y construcciones convencionales	50-70

La ingeniería geológica, como disciplina tanto geológica como geotécnica, contribuye en los siguientes aspectos fundamentales al estudio del riesgo sísmico:

- Evaluación de las condiciones sísmicas y geológicas de emplazamientos para obras de ingeniería.
 - Determinación de la peligrosidad sísmica y efectos inducidos por los terremotos.
 - Cálculo de las propiedades dinámicas del terreno y su respuesta sísmica.
 - Criterios geológicos y sísmicos para el diseño sismoresistente.
-
- Preparación de mapas de microzonación para la planificación urbana.
 - Análisis de vulnerabilidad de edificios, infraestructuras, etc.
 - Medidas de prevención, protección civil y asistencia en caso de catástrofe.

Fallas y terremotos

la caracterización de las fallas potencialmente sismogénicas en la región de interés. El desarrollo de los modelos precisos para llegar a esta caracterización ha dado lugar a nuevas ramas de la geología, como la neotectónica, la tectónica activa y la paleosismología, y a la utilización de metodologías innovadoras.



El modelo de las fallas sísmicas

A partir de los datos de observación registrados se ha elaborado un gran número de **relaciones empíricas entre la magnitud de los terremotos y el tamaño de la rotura del plano de falla**. Mientras que existe una buena correlación entre el área de ruptura y la magnitud, las relaciones entre longitud-magnitud y desplazamiento-magnitud son muy variables y poco extrapolables de una región a otra. Algunas de las relaciones más utilizadas son las siguientes:

Área de ruptura-magnitud

$$M = \log A + 4.15 \text{ (Wyss, 1979)}$$

donde M es la magnitud y A el área de la falla en km^2

Longitud de falla-magnitud

$$\log L = 0,7M_s - 3,24$$

$$\log L = 0,677M_L - 3,143$$

L en km; $5 \leq M \leq 8,0$; hipocentro < 20 km

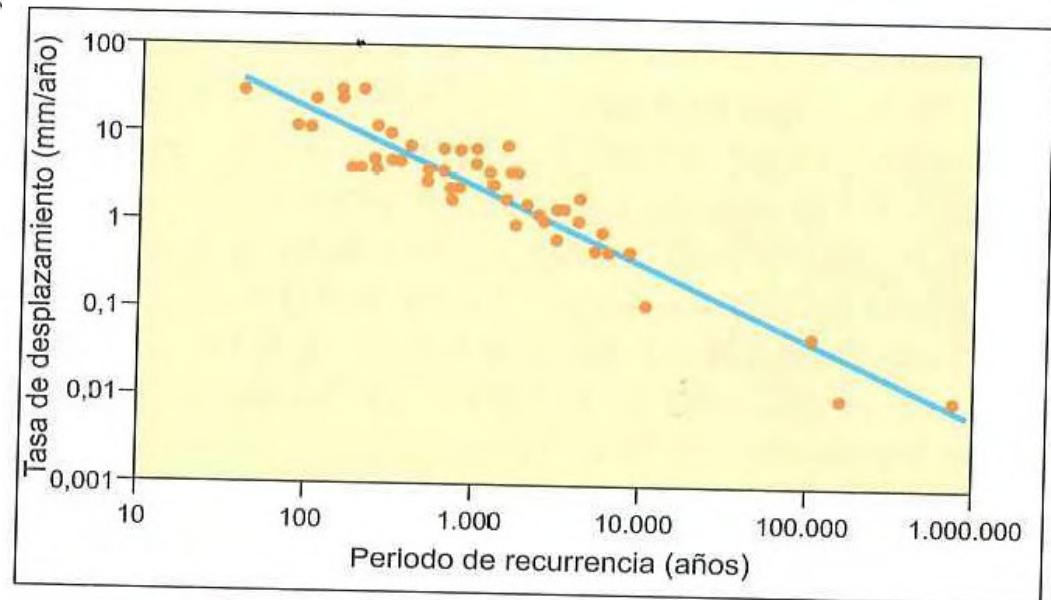
Desplazamiento superficial-magnitud

$$\log D = -4,31 + 0.651M_s$$

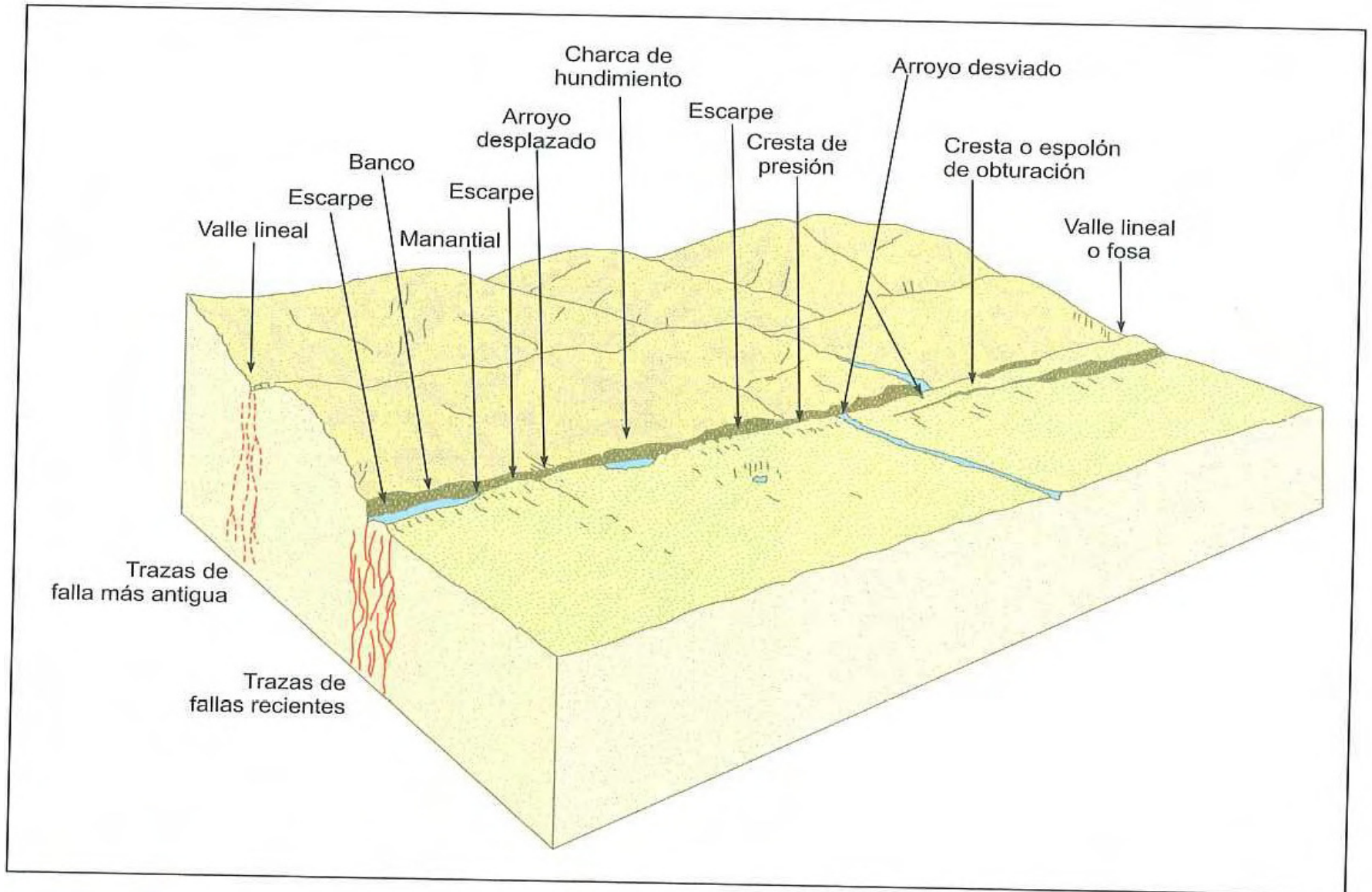
(D en m)

Tasas de deslizamiento y periodo de recurrencia

La magnitud y el periodo de recurrencia de terremotos grandes están relacionados con la velocidad media con la que se mueven las fallas (Figura 15.4). Las fallas que tienen una alta tasa de desplazamiento, por ejemplo del orden de 10 mm/año, acumulan gran cantidad de energía elástica en tiempos pequeños, con lo que el ciclo sísmico es corto. Esto da lugar a terremotos de magnitud alta, de 6 ó 7, con períodos de recurrencia relativamente cortos, del orden de 200 años. Por el contrario, las fallas lentas, con velocidades de 0,1 a 0,01 mm/año, producen terremotos de las mismas magnitudes en periodos de tiempo mucho mayores, del orden de los 45.000 a 500.000 años.



El registro geológico de la actividad en fallas



El estudio de las fallas sísmicas

El estudio de las fallas sísmicas comprende los siguientes aspectos:

- Marco tectónico.
- Análisis paleosísmico de las fallas.
- Evaluación de los parámetros sísmicos de terremotos actuales.

■ MARCO NEOTECTÓNICO

El campo de esfuerzos se obtiene de los estudios de análisis poblacional de fallas y los análisis de mecanismos focales de los terremotos. La deformación actual en el interior de las placas se evalúa a partir de estudios de interferometría de larga base y medidas repetidas con GPS, utilizando redes de estaciones fijas de observación. Junto con estas nuevas metodologías se utilizan observaciones geológicas con vistas a detectar tendencias de levantamiento o hundimiento

Finalmente la detección y distribución de fallas susceptibles de experimentar movimiento se aborda mediante estudios de sensores remotos (principalmente imágenes de satélite y foto aérea), reinterpretación de trabajos y cartografías geológicas previas en regiones con buen conocimiento geológico, análisis de modelos digitales del terreno y análisis geomorfológico cuantitativo (índices geomorfológicos). Estos

■ ANÁLISIS PALEOSÍSMICO DE LAS FALLAS

El objetivo de este análisis es determinar la velocidad media con la que se mueven las fallas, evaluar la magnitud de paleoterremotos y establecer la datación del último evento paleosísmico. La determinación de la tasa de deslizamiento se obtiene mediante estudios de las fallas en zanjas excavadas al efecto, normalmente perpendiculares a la falla. Se analizan los niveles sedimentarios o edafológicos del suelo, sus deformaciones tectónicas por efecto de la falla y los efectos de la evolución geomorfológica de los escarpes (Figura 15.8). La excavación puede tener anchura variable, entre 5 y 8 metros, una longitud apropiada y una profundidad habitual de 2 ó 3 metros. Se establece una red de referencia sobre las paredes, por ejemplo con cuerdas formando cuadros de 1 metro de lado, y se marcan los niveles guía y estructuras significativas. Se realiza un detallado levantamiento de la geo-

Métodos de datación de actividad tectónica o paleosísmica

Métodos absolutos		Relativos		Correlaciones	
Año más próximo	Radiométricos	Radiológicos	Procesos simples	Procesos complejos	Correlación
Registros históricos Dendrocronología Varvas sedimentarias	Carbono 14 Series de uranio Potasio-argón Trazas de fisión	Trazas de uranio Termoluminiscencia y resonancia «spin»-electrón Isótopos cosmogénicos	Racemización de aminoácidos Hidratación de obsidiana Hidratación de tefra Liquenometría	Desarrollo de suelos Meteorización de rocas y minerales Modificación progresiva del relieve Tasa de sedimentación Posición geomorfológica y tasa de incisión Tasa de deformación	Estratigrafía Tefrocronología Paleomagnetismo Fósiles Isótopos estables Tektitas y microtektitas

Análisis de la sismicidad

El análisis de la sismicidad incluye los siguientes estudios:

- Revisión de la sismicidad histórica.
- Evaluación de los parámetros sísmicos.
- Determinación de las leyes de atenuación.
- Distribución y recurrencia de terremotos.
- Regionalización sísmica.
- Relaciones sismotectónicas.

En la realización de estos estudios deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Sistemas de selección de datos.
- Completitud y homogeneidad del catálogo sísmico.
- Obtención de las leyes de atenuación.
- Error epicentral y focal.
- Criterios para la regionalización sísmica.

■ RELACIONES HABITUALES UTILIZADAS
EN LOS ESTUDIOS DE SISMICIDAD

— **Relación intensidad-distancia**

$$I_0 - I = 2,46 \operatorname{Ln}(R + 25) - 7,40$$

donde I_0 es la intensidad en el punto de estudio o emplazamiento, I es la intensidad MKS epicentral y R la distancia entre ambos, en km.

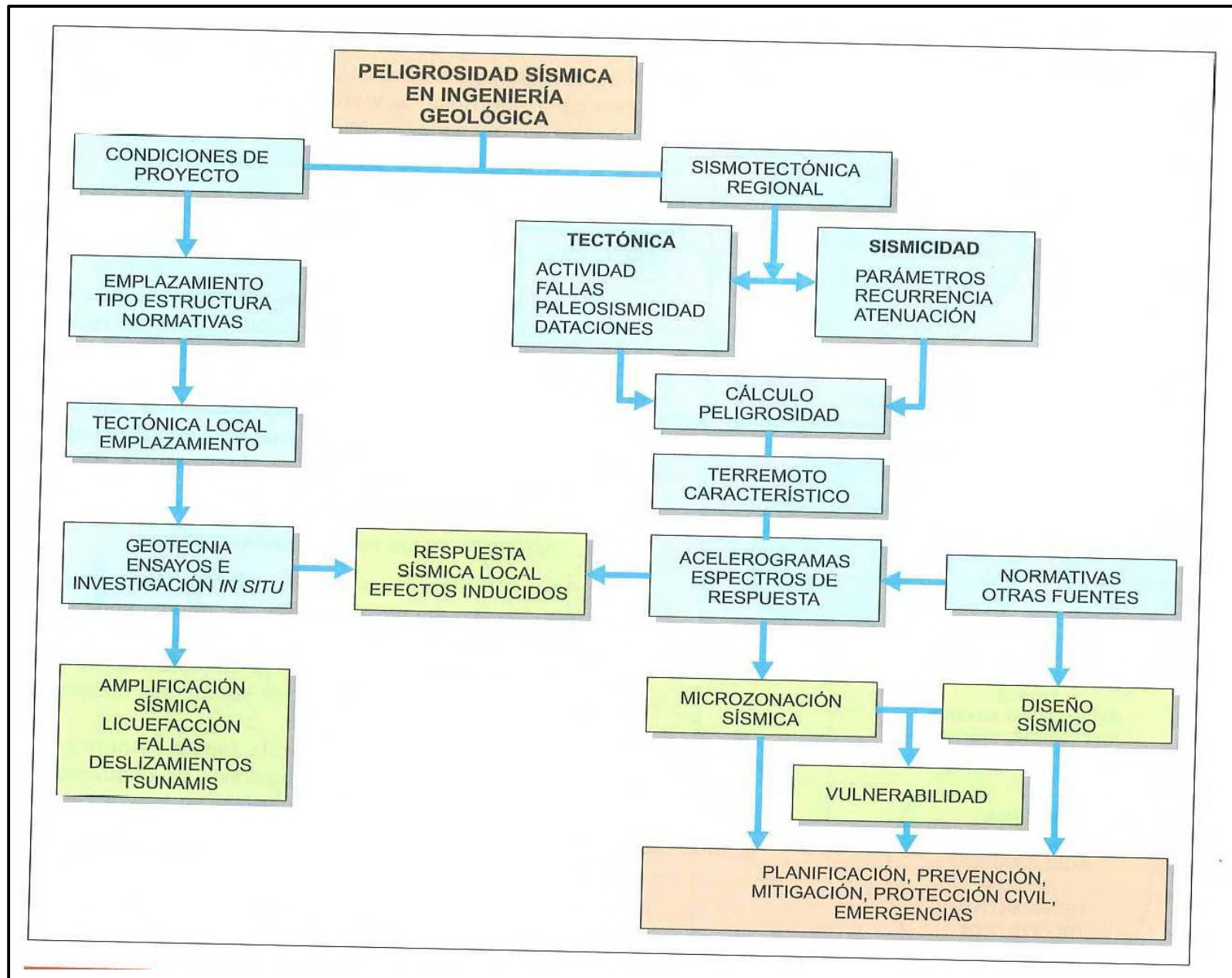
— **Relación frecuencia-magnitud**

A partir del análisis de la sismicidad se estima la relación entre el número de terremotos N y su magnitud M , según la relación de Gutenberg y Richter:

$$\log N = a - bM$$

a y b son coeficientes de regresión obtenidos por el método de mínimos cuadrados, en donde a representa el nivel de sismicidad en la región considerada y b la

Análisis de la peligrosidad sísmica



Respuesta sísmica en el emplazamiento

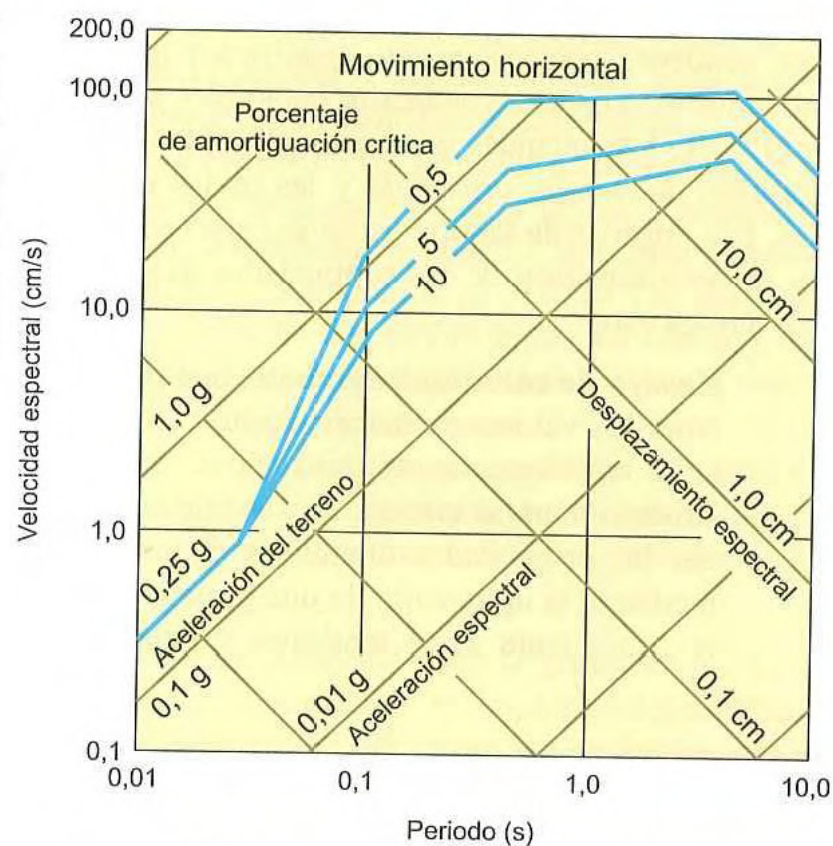
Terremoto característico

A partir del análisis de la peligrosidad se obtienen distintos valores del movimiento del terreno (intensidad, aceleración, etc.) para varios periodos de retorno (100, 500, 1.000 años, por ejemplo). El **terremoto característico, o de diseño**, es el correspondiente al periodo de retorno elegido. Por ejemplo, en el estudio de una presa es habitual utilizar periodos de retorno de 1.000 años; suponiendo que a este periodo le corresponda una intensidad de VIII, la probabilidad de ocurrencia de este terremoto para un periodo útil de vida de la estructura de 100 años sería del 9,5 % (Fi-

Parámetros sísmicos del movimiento del terreno

El movimiento del terreno debido a un sismo («ground motion» o «strong motion») se expresa por una serie de parámetros físicos cuya definición constituye la base del diseño sísmico. Si se dispone de registros de acelerogramas representativos del emplazamiento, se puede acceder a dichos parámetros: aceleración, velocidad, desplazamiento, periodo y duración, entre otros

El **acelerograma de un terremoto** (representación gráfica de la variación de la aceleración con el tiempo registrada por un acelerógrafo) permite, mediante una integración numérica, calcular la aceleración máxima para un amortiguamiento específico y un periodo dominante. La representación de estas aceleraciones máximas en función del periodo constituye el denominado **espectro de respuesta del terreno** (Figura 15.15), que indica la amplificación del movimiento del terreno con respecto a la aceleración, velocidad, o desplazamiento. El espectro de respuesta se utiliza para el diseño sísmoresistente de estructuras, siendo necesario que el espectro de respuesta del movimiento del suelo no exceda al de diseño de la estructura.



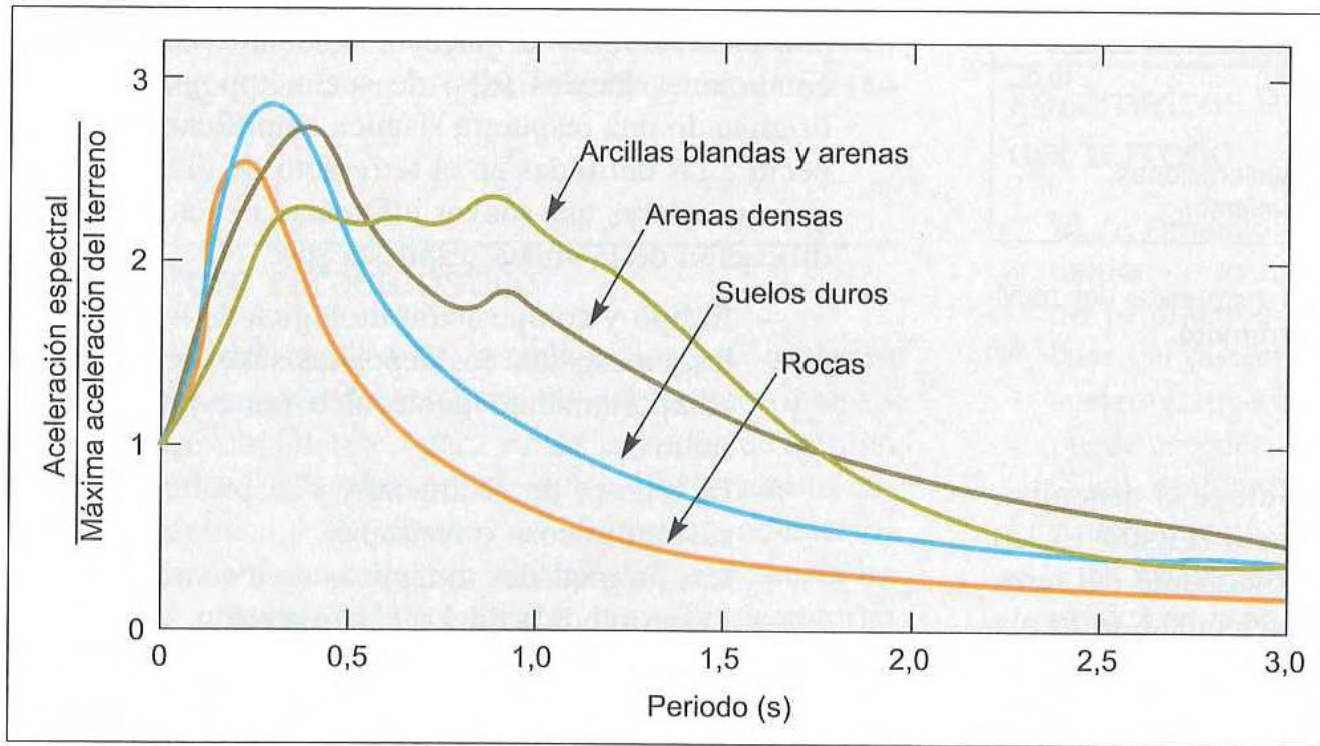
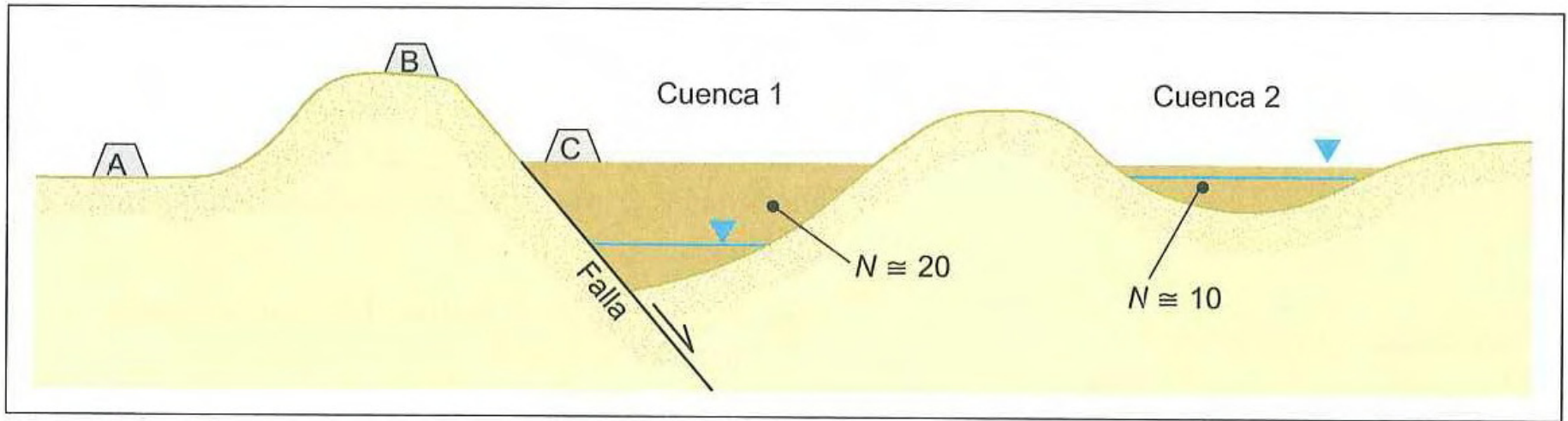
Espectros de respuesta de aceleraciones, velocidades y desplazamientos

Modificación del movimiento del terreno por condiciones locales

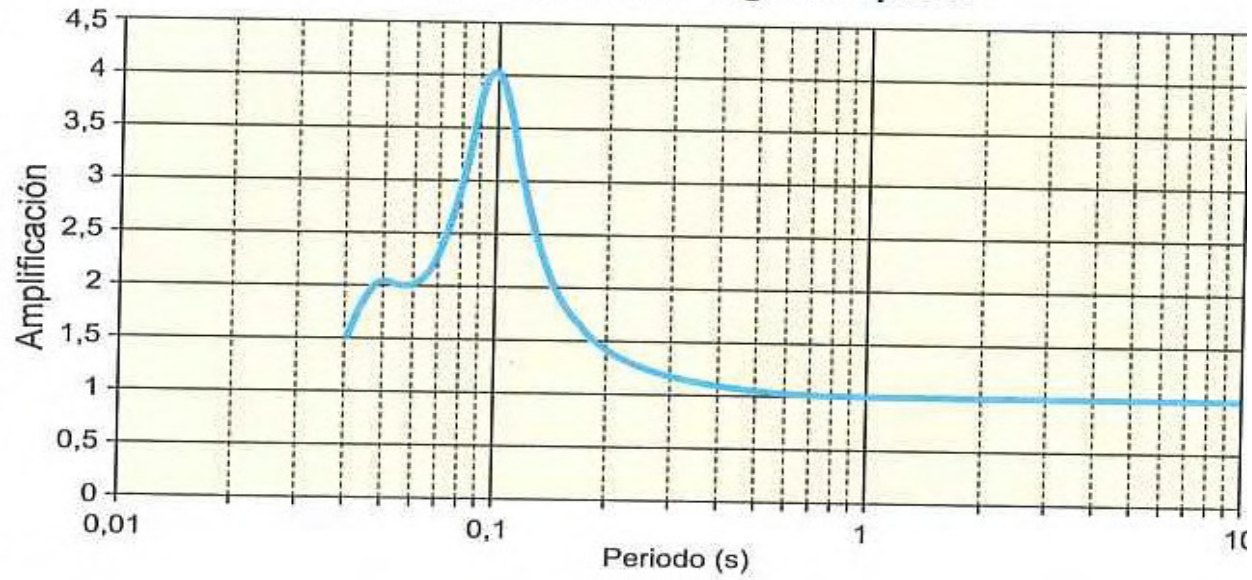
Las características sísmicas de un terremoto determinado (terremoto característico o de diseño), definidas por su acelerograma, pueden ser modificadas por las condiciones locales (tipo de suelo, topografía, etc.), originando una respuesta sísmica amplificada con respecto a las definidas en el terremoto de diseño.

Los factores que mayor influencia tienen en la modificación de la citada respuesta son:

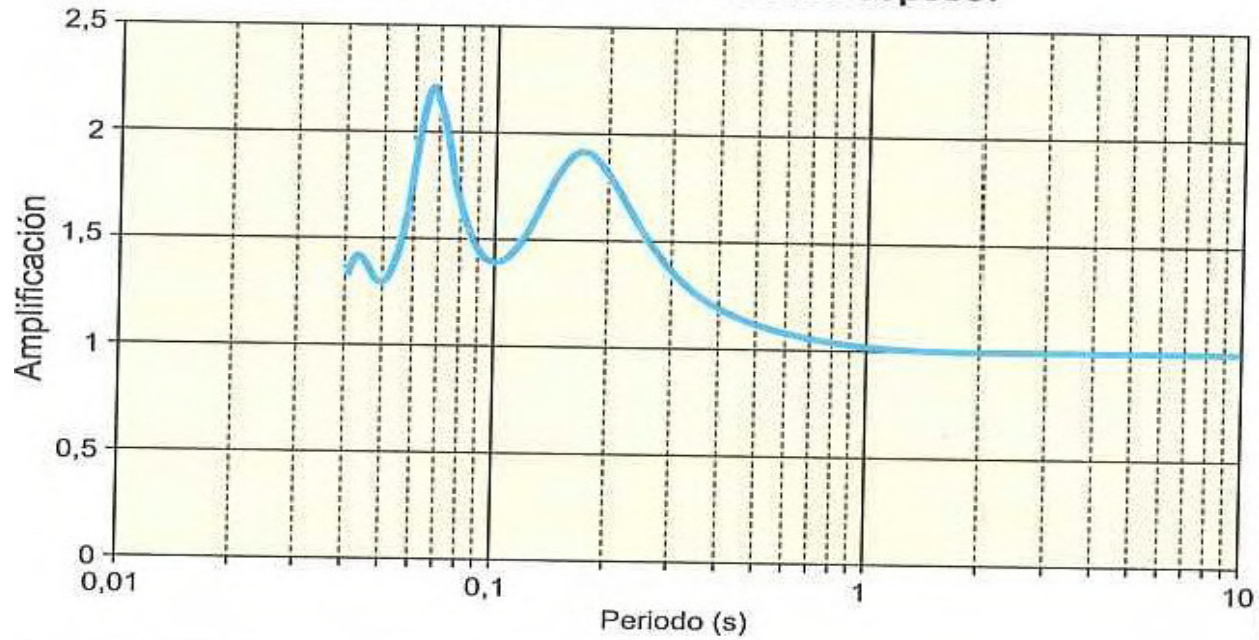
- El tipo y composición litológica de los materiales, en especial los depósitos superficiales cuyo comportamiento geotécnico corresponde al de suelos.
- El espesor de sedimentos y la profundidad del sustrato rocoso o resistente.
- Las propiedades dinámicas de los suelos.
- La profundidad del nivel freático.
- La topografía, tanto superficial como del sustrato.
- La presencia de fallas, su situación y características.



Suelos blandos de gran espesor



Suelos blandos de escaso espesor



Efectos inducidos por los terremotos en el terreno

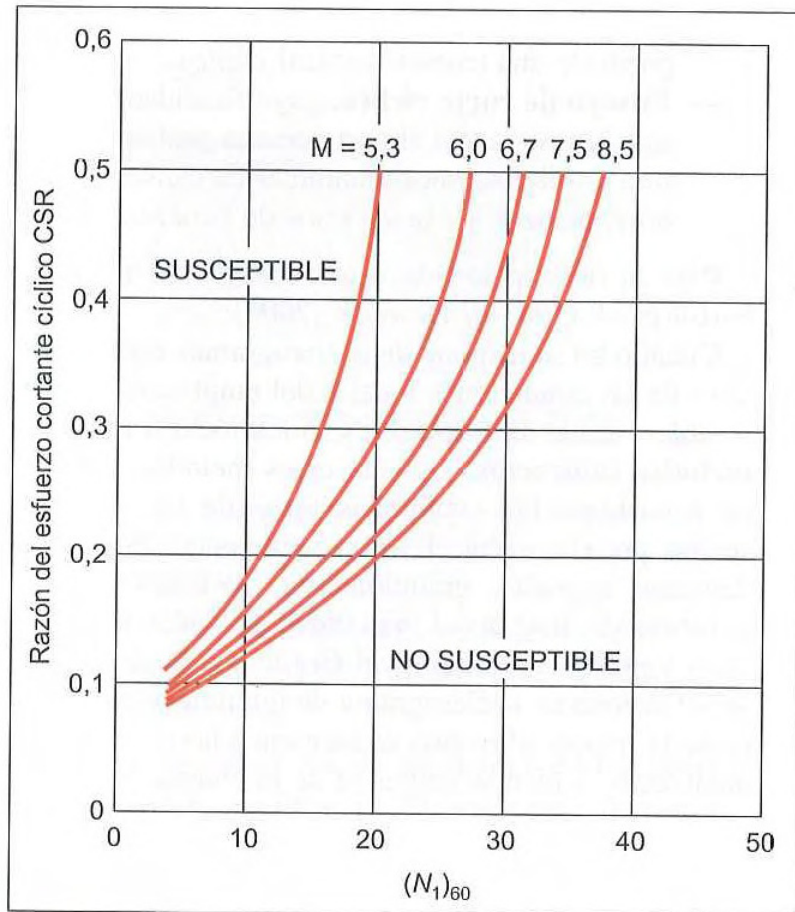
Los terremotos pueden producir, además del movimiento vibratorio característico, una serie de efectos inducidos que dan lugar a grandes deformaciones y roturas en el terreno:

- Licuefacción de suelos.
- Deslizamientos y desprendimientos.

- Roturas en superficie por fallas tectónicas.
- Tsunamis.

Excepto los tsunamis, los demás efectos inducidos están directamente relacionados con el comportamiento geológico y geotécnico del terreno, describiéndose a continuación sus principales características y métodos de análisis.

Susceptibilidad de licuefacción



$$CSR = \frac{\tau_{cm}}{\sigma'_v} = 0,65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{\max}}{g} r_d$$

donde:

τ_{cm} = esfuerzo cortante cíclico medio

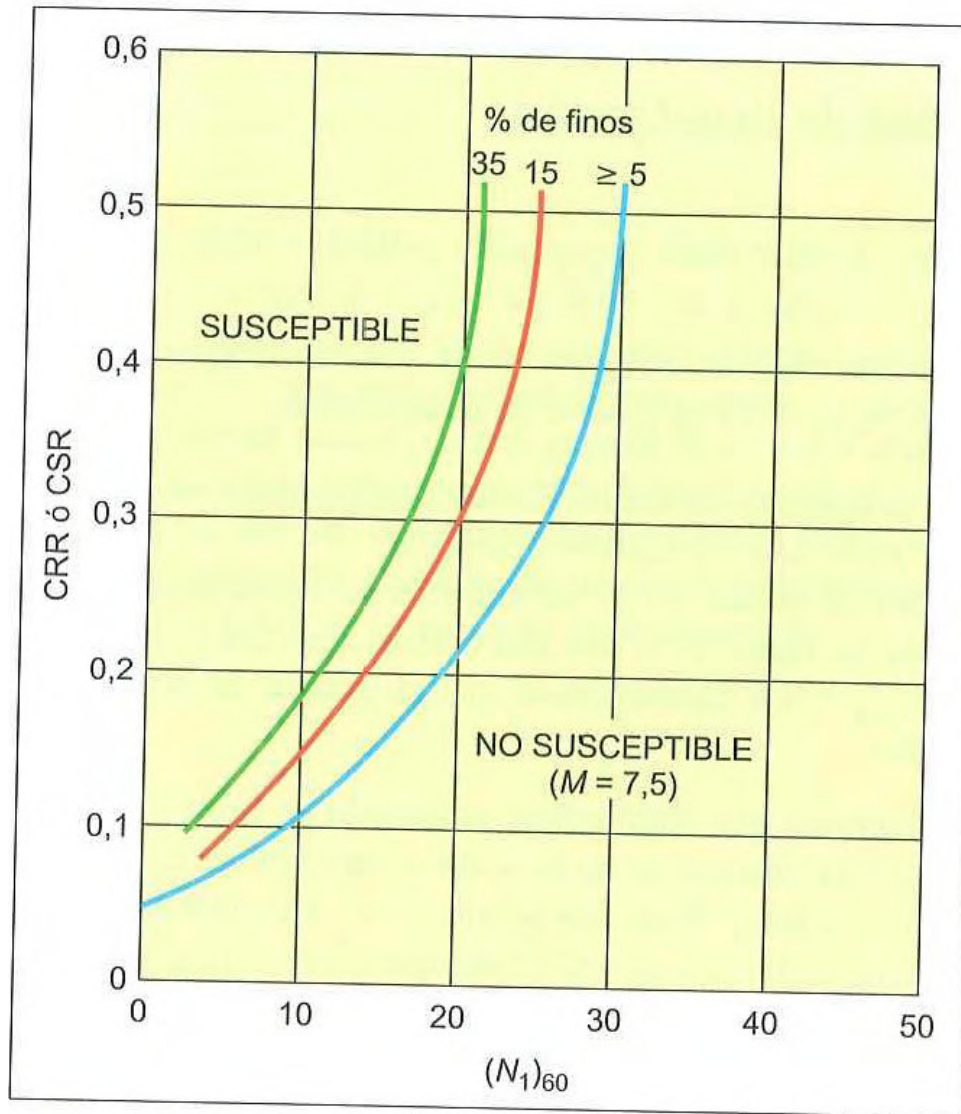
σ_v = tensión total

σ'_v = tensión efectiva

a_{\max} = aceleración máxima horizontal

g = aceleración de la gravedad

r_d = factor de reducción con la profundidad
($r_d = 1 - 0,015z$, siendo z la profundidad)

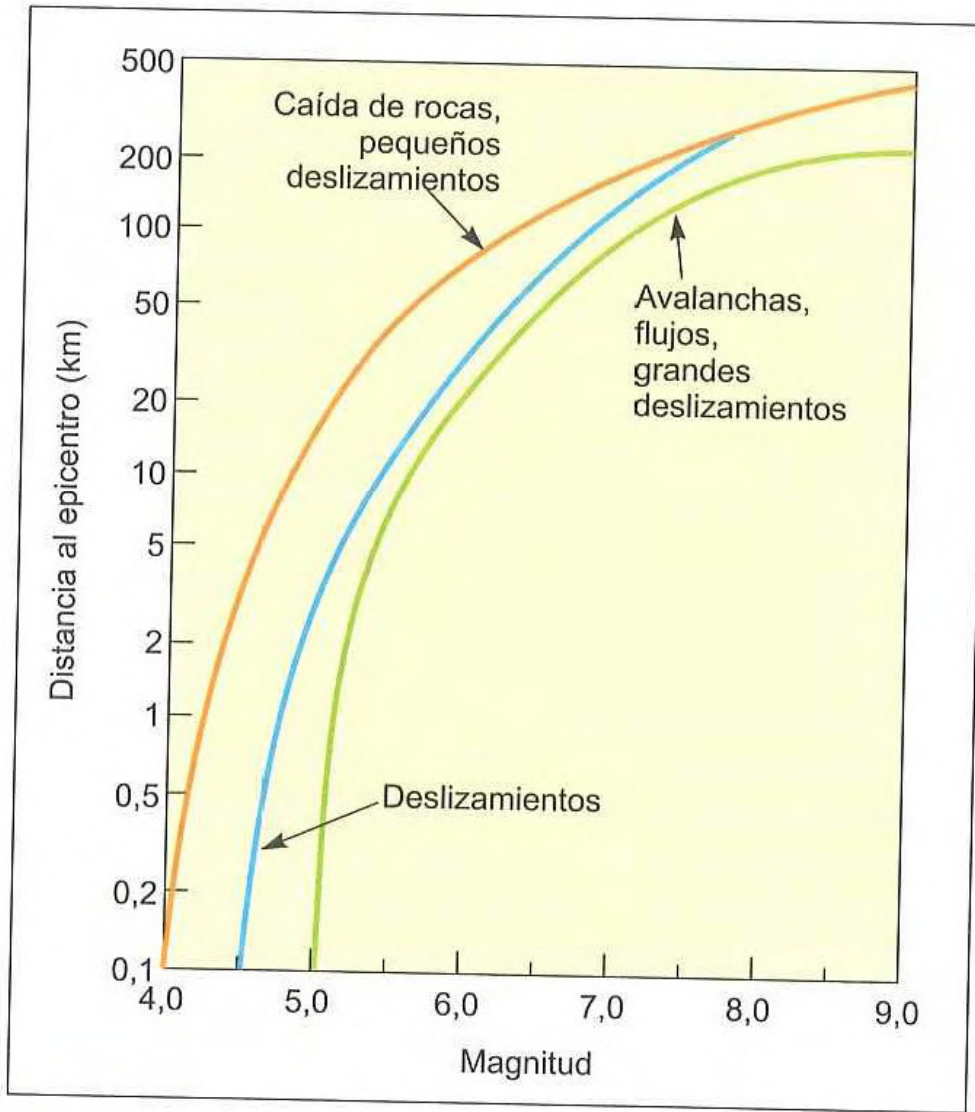


El índice de licuefacción potencial (ILP) puede expresarse como:

$$ILP = \frac{e^{(0,5M)H}}{(R + 16)\sigma'_v \bar{S}c}$$

donde M es la magnitud del terremoto, H es la profundidad considerada, en pies (ft), R es la distancia al foco (en millas) y σ'_v son las tensiones efectivas, en libras por pulgada al cuadrado (psi) ($1 t/m^2 \approx 1,42 psi$). La resistencia al corte del suelo $\bar{S}c$ se calcula según se

Deslizamientos inducidos por sismos



El análisis de la susceptibilidad frente a deslizamientos inducidos por sismos puede realizarse por métodos cualitativos en función de los factores condicionantes, o por métodos analíticos como el método pseudoestático, que permite asignar la acción sísmica a una fuerza estática horizontal, la cual se incorpora a la ecuación de equilibrio límite. Dicha fuerza pseudoestática es el producto de un coeficiente sísmico k_h y del peso W de la masa de suelo analizada:

$$p = k_h W = \frac{a_h}{g} W$$

siendo

$$k_h = \frac{a_h}{g}$$

donde a_h es la aceleración máxima horizontal y g es la aceleración de la gravedad.

Roturas por fallas

Los movimientos en la superficie del terreno por fallas activas están asociados a terremotos importantes con magnitudes superiores o iguales a 6,0, y sus efectos dependen de múltiples factores, entre otros:

- Naturaleza del suelo y propiedades dinámicas del mismo.
- Espesor de recubrimientos por encima del sustrato o nivel resistente.
- Características del terremoto, magnitud, profundidad, distancia al epicentro, etc.
- Tipo de falla, fallas asociadas, etc.

Algunos de los aspectos observados en relación al fallamiento superficial son los siguientes (Wang y Law, 1994):

- Los movimientos tipo «creep» pueden inducir roturas superficiales, con menor probabilidad si el espesor de recubrimientos por encima del sustrato es superior a los 5 m.

- La dislocación que se produce en una falla «oculta» puede producir fallamiento superficial en el terreno.
- Para terremotos de magnitud $M \geq 6$ y de poca profundidad (10-30 km), es prácticamente segura la dislocación tectónica en superficie.
- A partir de 30 m de espesor de recubrimientos sobre el sustrato las posibilidades de que se den roturas en superficie son bajas.
- El ancho de la zona de rotura superficial suele ser del orden de varios metros o varias decenas de metros, es decir, constituye un estrecho corredor, aunque la longitud de fractura tectónica puede extenderse a cientos de metros.

El espesor de recubrimientos ejerce una influencia importante en el fallamiento superficial, dada su capacidad para absorber energía, por lo que la rotura superficial puede depender de este espesor. Sin embargo, el tipo de falla es determinante en la dislocación: las fallas translacionales producen movimientos en superficie independientemente del espesor de sedimentos, pero las fallas normales o inversas necesitan grandes espesores de sedimentos para absorber la deformación.

Microzonación sísmica

Los aspectos más significativos a estudiar en los estudios de microzonación son los siguientes:

- Propiedades geotécnicas de los suelos, espesor, densidad, velocidad de ondas transversales, módulo de rigidez, resistencia, SPT, CPT, profundidad del nivel freático, etc.
- Susceptibilidad frente a la licuefacción, deslizamiento y roturas superficiales por fallas.
- Condiciones topográficas que puedan amplificar la respuesta sísmica.
- Peligrosidad frente a tsunamis en zonas costeras.

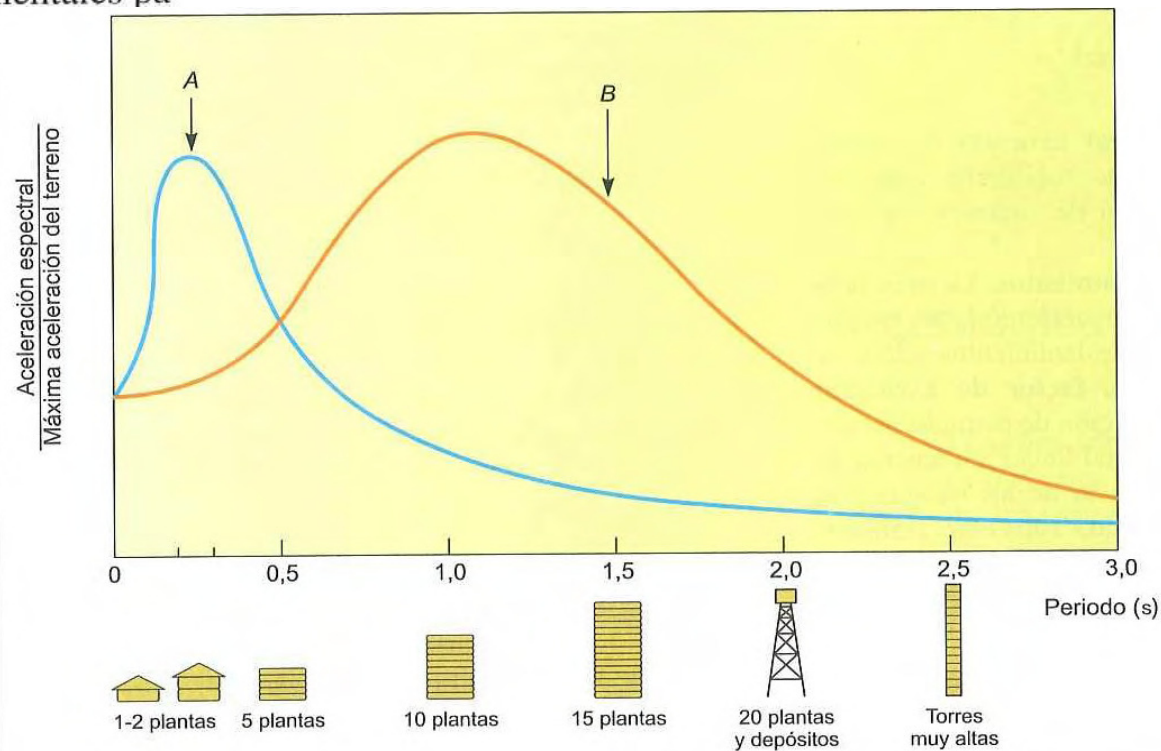
Estimación de la vulnerabilidad sísmica

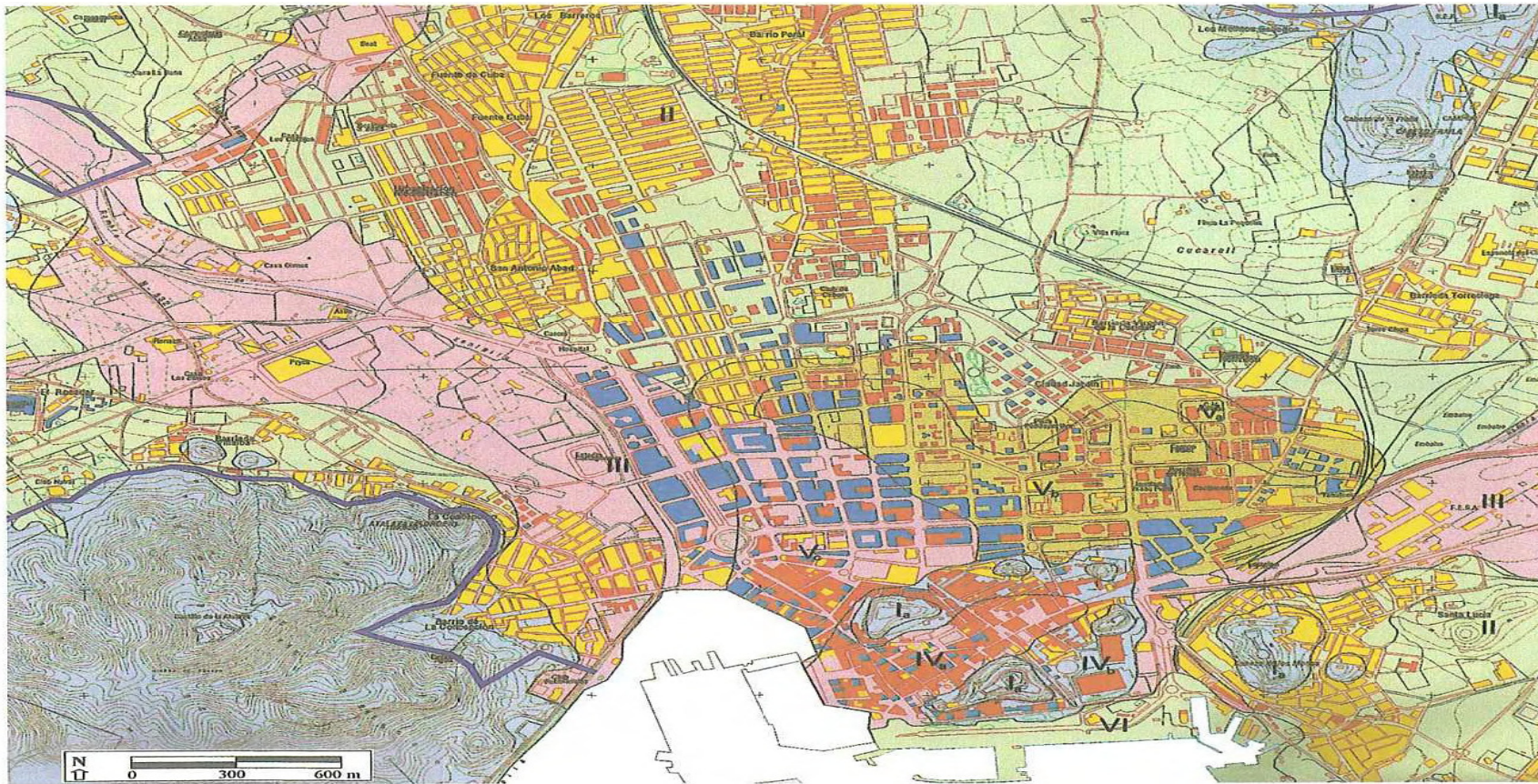
Los métodos para estimar la vulnerabilidad de los elementos estructurales expuestos a la acción de un terremoto se basan en las **matrices de probabilidad de daño** y en las **funciones de vulnerabilidad**. En los primeros se necesita conocer el tipo de edificación, el posible comportamiento de cada edificación frente a terremotos de magnitud o intensidad determinada y el daño estructural relacionado con los distintos niveles

de intensidad. Las **funciones de vulnerabilidad** consisten en relaciones gráficas entre la vulnerabilidad estructural (o grado de daño en los distintos tipos de edificación) y la intensidad u otro parámetro significativo del terremoto (Figura 13.2 del Capítulo 13).

Por medio de los estudios de vulnerabilidad es posible efectuar estimaciones del grado de pérdidas que podrían producirse en una ciudad o estructura concreta para un «escenario sísmico» determinado. Estos estudios permiten conocer qué estructuras o zonas de la ciudad son más vulnerables y la gravedad de los daños, incluso qué instalaciones pueden quedar sin servicio o verse seriamente afectadas. También se pueden hacer estimaciones sobre pérdidas de vidas humanas. Estos datos son muy importantes para los planes de prevención y de mitigación sísmica, que incluyen no sólo actuaciones técnicas sino acciones sociales, informativas, educativas, de gestión, etc., aspectos fundamentales para la mitigación del riesgo sísmico. Para una

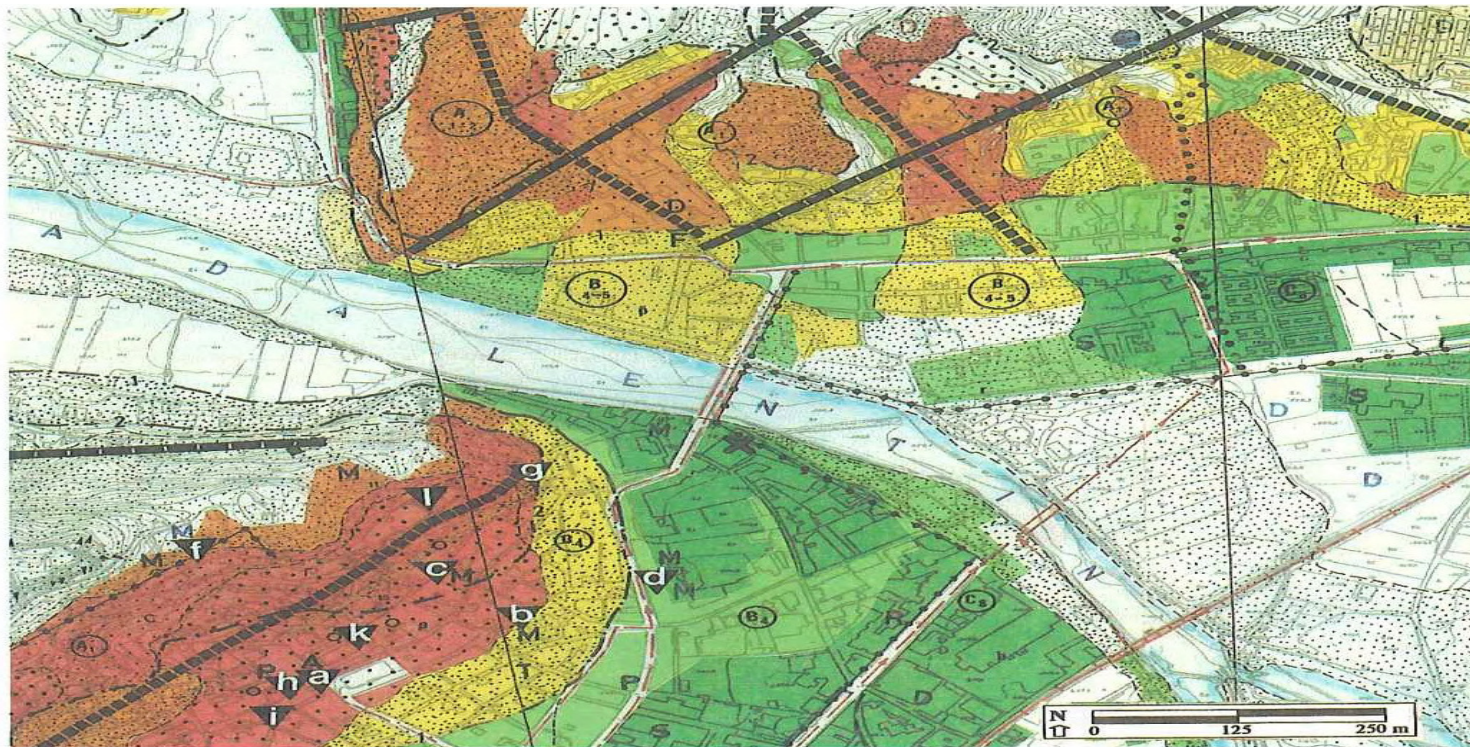
Espectro de respuesta y períodos naturales de distintos tipos de edificios





Respuesta sísmica y vulnerabilidad de la edificación

Zona	Vibración del terreno		Porcentaje edificios			Tipo de edificios vulnerables	Respuesta sísmica
	Amplificación máxima(*)	Periodo(s)	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3		
Ia	Muy baja	—	100	—	—	Ninguno	Muy baja
Ib	Muy baja	0,04	95	5	—	Ninguno	Muy baja
II	Media	0,043	78	17	5	Ninguno	Baja
III	Media	0,25	79	3	18	1	Media-alta
IVa	Media	0,37	20	50	30	2 – 1 – 3	Media-alta
IVb	Muy baja	—	40	50	10	Ninguno	Muy baja
Va	Muy alta	0,095	27	51	22	1	Media
Vb	Media	0,07	13	48	39	1 – 2	Media
Vc	Alta	0,3	19	34	47	2 – 1 – 3	Media-alta
VI	Baja	0,45	90	10	0	2 – 3	Baja
Terremoto de referencia:				Tipo de edificio	Nº plantas	Periodo natural de vibración (s)	
Magnitud Richter: 4,7				1	1 – 2	0,1 a 0,3	
Probabilidad de ocurrencia en 100 años: 9,5%				2	3 – 5	0,3 a 0,6	
(*) para el terremoto de referencia				3	> 5	> 0,6	



Peligrosidad sísmica			
Características del terreno	Grado 0	Grado 1	Grado 2
Materiales muy flojos, sueltos y rellenos	[Dotted pattern]	[Dotted pattern]	[Dotted pattern]
Materiales flojos, conos de deyección y aluvial	[Dotted pattern]	[Dotted pattern]	[Dotted pattern]
Material firme, coluvial y aluvial compacto	[Dotted pattern]	[Dotted pattern]	[Dotted pattern]
Material muy firme, roca	[Dotted pattern]	[Dotted pattern]	[Dotted pattern]
Influencia de la topografía en la amplificación de las ondas sísmicas Factor de amplificación 1			

Vulnerabilidad sísmica				
Tipo de edificación predominante	Peligrosidad sísmica			
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
A Construcciones simples, con muros de mampostería, adobe o tapial	[Yellow]	[Orange]	[Red]	[Red]
B Con muros de fábrica o ladrillo, mortero, mampostería con mortero, sillería	[Light Green]	[Yellow]	[Orange]	[Red]
C Construcciones con estructuras metálicas y/u hormigón armado	[Green]	[Light Green]	[Yellow]	[Orange]
Tipo de edificaciones y número de plantas				

Zonificación		
Vulnerabilidad sísmica	Peligrosidad sísmica	
[Light Green] Baja - Muy baja	Baja a Media. Edificaciones predominantes tipo C	
[Yellow] Media	Variable. Edificaciones predominantes tipo B y C	
[Orange] Alta - Muy alta	Media a Muy alta. Edificaciones predominantes tipo A y B	

Hipótesis de vulnerabilidad		
Peligrosidad sísmica	Amplificación esperada	Intensidad MKS
[Light Green]	Muy baja. Zona 1	VII
[Yellow]	Baja – Media. Zona 2	VIII
[Orange]	Media – Alta. Zona 3	
[Red]	Alta – Muy alta. Zona 4	IX

b Terreno firme. Apoyo directo de cimentaciones
v - f Terreno flojo. No apto para apoyo directo
r Edificios recalzados
p Edificios pilotados

Falla reconocida
 Falla deducida
 Desprendimientos de bloques
 Colapso de cavidades antrópicas

Edificios singulares: M, F, D,.....
 Líneas de vida
 Edificios con daños en terremotos históricos

El terremoto de Kocaeli (Turquía) del 17 de agosto de 1999



GRACIAS POR SU ATENCIÓN