CAPÍTULO 7

MÉTODO PROPUESTO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA Y VULNERABILIDAD DE TUBERÍAS

A continuación se presenta, a modo de recomendación, una metodología para estimar la amenaza sísmica a que se verán expuestas las tuberías y la vulnerabilidad asociada a cada tipo de tubería. El investigador podrá determinar si esta metodología es suficiente o si requiere refinamientos adicionales.

1. ESTIMACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA

Paso 1: Se debe asignar un factor de amenaza por tipo de perfil de suelo (FTPS). Así, para un suelo rocoso el FTPS = 1,0; para suelo firme FTPS = 1,5; y para suelo blando FTPS = 2,0 (ver cuadro 7.1).

Paso 2: Se debe asignar un factor de amenaza por licuefacción potencial del suelo (FLPS). Así, para un suelo sin peligro de licuefacción FLPS = 1,0; para suelos con peligro moderado de licuefacción FLPS = 1,5; y para suelos con alto peligro de licuefacción FLPS = 2,0 (ver cuadro 7.2).

Paso 3: Se debe asignar un factor de amenaza por deformación permanente del suelo (FDPS). Así, para suelos sin peligro de deformaciones permanentes FDPS = 1,0; para suelos con peligro moderado de deformaciones permanentes FDPS = 1,5; y para suelos con alto peligro de deformaciones permanentes FDPS = 2,0 (ver cuadro 7.3).

Entonces, para cada tramo de tubería se multiplican los tres factores asignados y se calcula la amenaza total según la siguiente clasificación: si el resultado es menor que 2 se considera zona de amenaza sísmica baja; si el resultado es igual o mayor que 2 pero menor que 4 se considera zona de amenaza sísmica moderada; y si el resultado es mayor o igual que 4 se considera zona de amenaza sísmica alta (ver cuadro 7.4).

Cuadro 7.1 Clasificación para tipos de perfil de suelo

Tipo de perfil	Rocoso	Firme	Blando
Descripción	Estratos rocosos o suelos muy consolidados, con velocidades de propagación de ondas de corte superior a 750 m/s	Estratos de suelos bien consolidados o estratos de suelos suaves con espesor menor de 5 metros	Estratos de suelos suaves con espesor mayor de 10 metros

Cuadro 7.2 Clasificación amenaza por licuefacción potencial del suelo

Amenaza	Baja	Moderada	Alta
Descripción	Suelos bien consolidados y con alta capacidad de drenaje, estratos subyacentes sin contenido de arenas apreciable	Suelos con moderada capacidad de drenaje, estratos subyacentes con contenido de arenas moderado	Suelos mal drenados, niveles freáticos altos, estratos subyacentes con alto contenido de arenas, zonas deltaicas de ríos y depósitos aluviales

Cuadro 7.3 Clasificación amenaza por deformaciones permanentes del suelo

Amenaza	Baja	Moderada	Alta
Descripción	Suelos bien consolidados, terrenos con pendientes bajas, rellenos bien compactados, áreas alejadas de cauces de ríos o fallas geológicas	Suelos consolidados, terrenos con pendientes menores al 25%, rellenos compactados, áreas cercanas a cauces de ríos o fallas geológicas	Suelos mal consolidados, terrenos con pendientes superiores al 25%, áreas ubicadas muy cerca o dentro de cauces de ríos o fallas geológicas

Cuadro 7.4 Factores de multiplicación relativos al tipo de material

Material	Factor de multiplicación
Hierro dúctil (HD)	0,25
Hierro fundido (HF)	1,00
Cloruro de polivinilo (PVC)	1,50
Asbesto cemento (AC)	2,60
Tubo cilíndrico de concreto reforzado (TCCR)	2,60

2. ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

En este punto se asoció directamente la vulnerabilidad de la tubería con el índice de daño generado por un evento sísmico de determinadas características. De acuerdo con la bibliografía consultada existen varios métodos para predecir estos índices de daño, generalmente expresados en cantidad de fallas por kilómetro de tubería, tomando en cuenta factores tales como las aceleraciones y velocidades pico de movimiento del suelo esperadas en sitio, la intensidad según la escala Mercalli modificada, el período fundamental de oscilación de los estratos de suelos, la velocidad de propagación de ondas sísmicas y otros. Para trabajos de este tipo se consideró que lo más adecuado es tomar en cuenta solamente las metodologías que relacionan el índice de daño de las tuberías con la intensidad Mercalli modificada esperada en sitio, ya que el resto de procedimientos requieren de una serie de análisis especializados que podrían no estar al alcance de todos los investigadores que deseen aplicar las guías.

Dentro de las relaciones que toman en cuenta solamente la intensidad Mercalli modificada esperada en sitio se tienen dos tipos: las que contabilizan daños generados por el fenómeno de propagación de ondas sísmicas (figura 7.1) y las que contabilizan los daños generados tanto por el fenómeno de propagación de ondas sísmicas como por las deformaciones permanentes del suelo (figura 7.2). Dado que ambas relaciones se refieren solamente a tuberías de hierro fundido (HF) se presentan en el cuadro 7.4 factores de multiplicación relativos de la cantidad de daños según el tipo de material de la tubería, extraídos de las investigaciones realizadas por Eguchi en 1991 y mostrados en la figura 6.16.

Así, para estimar los daños esperados en las tuberías, se recomienda el siguiente procedimiento:

Paso 1: Se toma como base la tubería de hierro fundido y se estima el índice de daños; si la zona analizada está en un área de poca amenaza se utiliza la figura 7.1 porque se considera que es poca la probabilidad de que se desarrollen fenómenos diferentes a la propagación de ondas sísmicas. Para una zona de amenaza moderada a alta se utiliza la figura 7.2 porque hay mayor probabilidad de que se presente tanto el fenómeno de propagación de ondas sísmicas como el fenómeno de deformaciones permanentes del suelo. Una vez estimado el índice de daños para la tubería de hierro fundido se le aplican los factores de multiplicación del cuadro 7.4 según el material de la tubería.

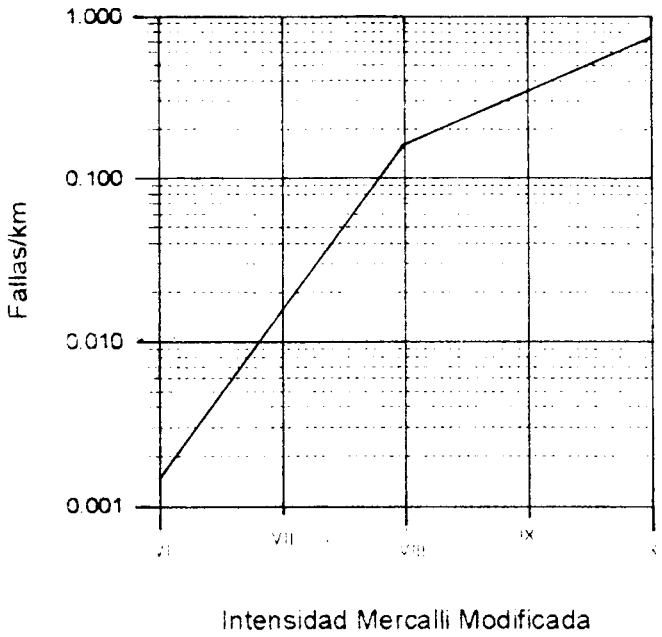
Paso 2: Debe estimarse la edad de la tubería y el estado general de la misma con el fin de determinar, según el criterio del investigador, un porcentaje de aumento que deberá aplicarse a la cifra calculada en el paso 1. Por ejemplo, para el caso de tuberías viejas o en mal estado, el porcentaje de aumento podrá ser de 50%; para tuberías en estado regular el porcentaje será de 25% y para tuberías en buen estado no se aplicará aumento. El aumento total puede calcularse como un promedio ponderado entre los porcentajes de tubería en mal, regular y buen estado.

Paso 3: De acuerdo con datos de daños generados en tuberías de distribución por sismos recientes, influye mucho el contenido de diámetros de la tubería. Así, para tuberías con diámetros menores o iguales a 75 mm (diámetros pequeños) se recomienda aplicar 50% de aumento; para tuberías mayores de 75 mm pero menores que 200 mm (diámetros medianos) se puede aplicar 25% de aumento; y para tuberías con diámetros mayores o iguales que 200 mm (diámetros grandes) no se aplica aumento en los daños esperados. El aumento total puede calcularse como un promedio ponderado entre los porcentajes de tubería distribuidos según el diámetro.

Cuadro 7.5 Posibles combinaciones de los factores de amenaza

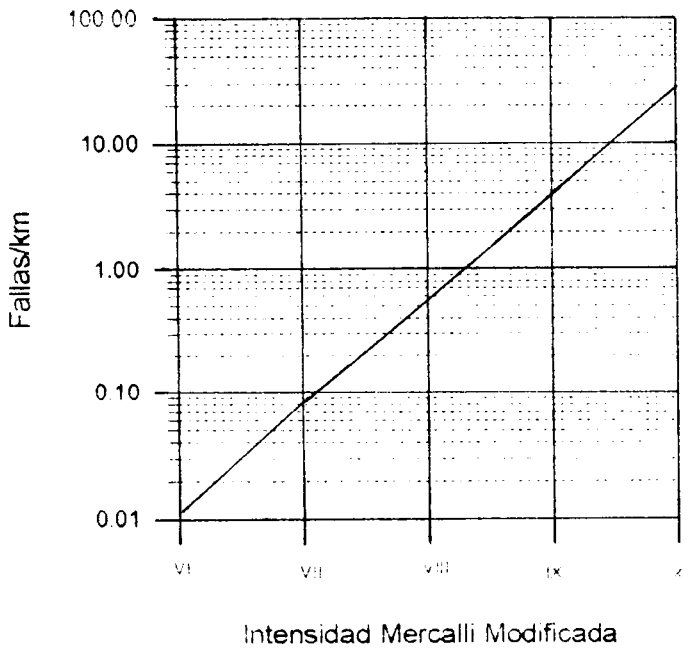
#Comb	FTPS	FLPS	FDPS	Total	Tipo amenaza
1	1,00	1,00	1,00	1,00	Baja
2	1,00	1,00	1,50	1,50	Baja
3	1,00	1,50	1,00	1,50	Baja
4	1,50	1,00	1,00	1,50	Baja
5	1,00	1,00	2,00	2,00	Moderada
6	1,00	2,00	1,00	2,00	Moderada
7	2,00	1,00	1,00	2,00	Moderada
8	1,00	1,50	1,50	2,25	Moderada
9	1,50	1,00	1,50	2,25	Moderada
10	1,50	1,50	1,00	2,25	Moderada
11	1,00	1,50	2,00	3,00	Moderada
12	1,00	2,00	1,50	3,00	Moderada
13	1,50	1,00	2,00	3,00	Moderada
14	1,50	2,00	1,00	3,00	Moderada
15	2,00	1,00	1,50	3,00	Moderada
16	2,00	1,50	1,00	3,00	Moderada
17	1,50	1,50	1,50	3,38	Moderada
18	1,00	2,00	2,00	4,00	Alta
19	2,00	1,00	2,00	4,00	Alta
20	2,00	2,00	1,00	4,00	Alta
21	1,50	1,50	2,00	4,50	Alta
22	1,50	2,00	1,50	4,50	Alta
23	2,00	1,50	1,50	4,50	Alta
24	1,50	2,00	2,00	6,00	Alta
25	2,00	1,50	2,00	6,00	Alta
26	2,00	2,00	1,50	6,00	Alta
27	2,00	2,00	2,00	8,00	Alta

Figura 7.1 Índice de daños por propagación de ondas sísmicas en tubería de hierro fundido según intensidad Mercalli modificada



Fuente: Referencia (2).

Figura 7.2 Índice de daños por propagación de ondas sísmicas y deformación permanente del suelo en tubería de hierro fundido según intensidad Mercalli modificada



Fuente: Referencia (2)

3. CÁLCULO DE LOS DAÑOS ESTIMADOS EN LAS TUBERÍAS PARA EL CASO DE ESTUDIO DE ACUERDO CON EL MÉTODO PROPUESTO Y SU COMPARACIÓN CON LOS DAÑOS REALES

3.1 Líneas de conducción

3.1.1 *Tubería cilíndrica de concreto reforzado (TCCR)*

Se trata de una tubería relativamente nueva y en buenas condiciones. La longitud total de 15,5 kilómetros consta de un solo diámetro de 500 mm. De acuerdo con la zonificación, según tipos de amenaza (figura 7.3), confeccionada siguiendo los lineamientos del artículo 7.1, la longitud total de la tubería queda distribuida en tres tramos de diferentes amenazas, a saber:

Tramo 1: 1,8 km de longitud, baja amenaza.
Tramo 2: 12,7 km de longitud, amenaza moderada.
Tramo 3: 1,0 km de longitud, alta amenaza.

Para la estimación de daños se supondrá una intensidad Mercalli modificada de IX en todos los tramos.

Tramo 1: Por estar en una zona de baja amenaza se usa el gráfico de la figura 7.1 para estimar el índice de daños para tubería de hierro fundido que corresponde a un valor de 0,35 fallas/km. Luego se le aplica el factor de multiplicación del cuadro 7.4 para obtener la relación entre hierro fundido y tubería cilíndrica de concreto reforzado, lo que da un valor de 2,60. Así, para la longitud del tramo se tendrá un índice de daños esperado de: (1,80 km) (0,35 fallas/km) (2,60) = 1,64 fallas. Por tratarse de una tubería relativamente nueva y en buen estado, no se aplican los factores de incremento indicados en los pasos 2 y 3 del artículo 7.2.

Tramo 2: Por tratarse de una zona de amenaza moderada se usa el gráfico de la figura 7.2 que arroja un índice de daño de 4,0 fallas/km. De esta forma, el número total de fallas para este tramo será: (12,7 km) (4,0 fallas/km) (2,60) = 132,08 fallas

Tramo 3: Por tratarse de una zona de amenaza alta se usa el gráfico de la figura 7.2 que arroja un índice de daño de 4,0 fallas/km. De esta forma, el número total de fallas para este tramo será: (1,0 km) (4,0 fallas/km) (2,60) = 10,40 fallas. Entonces, el total de fallas esperado para esa tubería será: Total de fallas = 1,64 + 132,08 + 10,40 fallas = 144,12 fallas (usar 144 fallas).

3.1.2 *Tubería de hierro fundido (HF)*

Se trata de una tubería de 12,50 km en 300 mm de diámetro y no ha alcanzado la mitad de su vida útil, sin embargo, en algunas zonas presentó problemas por corrosión. Siguiendo la metodología anterior se obtiene:

Tramo 1: Longitud = 1,80 km. Amenaza = Baja
Índice de daños = 0,35 fallas/km (figura 7.1)
Factor por tipo de tubo = 1,0 (cuadro 7.4)
Factor por edad de tubería = 1,25 (artículo 7.2, paso 2)
Total fallas en el tramo = (1,80) (0,35) (1,0) (1,25) = 0,78 fallas.

Tramo 2: Longitud = 10,70 km. Amenaza = Moderada
Índice de daños = 4,0 fallas/km (figura 7.2)
Factor por tipo de tubo = 1,0 (cuadro 7.4)
Factor por edad de tubería = 1,25 (artículo 7.2, paso 2)
Total fallas en el tramo = (10,7) (4,0) (1,0) (1,25) = 53,5 fallas.

Así, el total de fallas para esta tubería será:
Total de fallas = 0,78 + 53,5 = 54,28 fallas (usar 54 fallas).

3.1.3 *Tubería de hierro dúctil (HD)*

Se trata de una tubería de 4,54 kilómetros en 300 mm de diámetro relativamente nueva. Siguiendo la metodología anterior se obtiene:

Tramo 1: Longitud = 3,54 km. Amenaza = Baja
Índice de daños = 0,35 fallas/km (figura 7.1)
Factor por tipo de tubo = 0,25 (cuadro 7.4)
Factor por edad de tubería = 1,0 (artículo 7.2, paso 2)
Total fallas en el tramo = (3,54) (0,35) (0,25) (1,0) = 0,31 fallas.

Tramo 2: Longitud = 1,0 km. Amenaza = Alta
Índice de daños = 4,0 fallas/km (figura 7.2)
Factor por tipo de tubo = 0,25 (cuadro 7.4)
Factor por edad de tubería = 1,0 (artículo 7.2, paso 2)
Total fallas en el tramo = (1,0) (4,0) (0,25) (1,0) = 1,0 fallas.

Así, el total de fallas para esta tubería será:
Total de fallas = 0,31 + 1,0 = 1,31 fallas (usar 1,0 falla).

3.2 **Líneas de distribución**

3.2.1 *Tubería de cloruro de polivinilo (PVC)*

Factor por tipo de tubo = 1,5 (cuadro 7.4)
Distribución de amenaza = 35% en baja amenaza (0,35 fallas/km, figura 7.1), 65% en amenaza moderada a alta (4 fallas/km, figura 7.2)
Índice de daños base= (0,35) (1,5) (0,35) + (4,0) (1,5) (0,65) fallas/km = 4,08 fallas/km

Contenido de diámetros = 3% diámetros grandes, 34% diámetros medianos, 63% diámetros pequeños
Factor por contenido de diámetros = (1,0) (0,03) + (0,34) (1,25) + (0,63) (1,5) = 1,40
Condiciones de la tubería = 100% es nueva y en buen estado
Factor por edad y condiciones de tubería = 1,0
Total fallas = (4,08) (1,40) (1,00) (43,7) = 250 fallas.

3.2.2 *Tubería de hierro fundido (HF)*

Factor por tipo de tubo = 1,0 (cuadro 7.4)
Distribución de amenaza = 77% en baja amenaza (0,35 fallas/km, figura 7.1), 23% en amenaza moderada a alta (4 fallas/km, figura 7.2)
Índice de daños base= (0,35) (1,0) (0,77) + (4,0) (1,0) (0,23) fallas/km = 1,19 fallas/km
Contenido de diámetros = 1% diámetros grandes, 66% diámetros medianos, 33% diámetros pequeños
Factor por contenido de diámetros = (1,0) (0,01) + (1,25) (0,66)+ (1,5) (0,33) = 1,33
Condiciones de la tubería = 60% en mal estado y 40% regular
Factor por edad y condiciones de tubería = (1,5) (0,6) + (1,25) (0,4) = 1,4
Total fallas = (1,19) (1,33) (1,40) (23,1) = 51 fallas.

3.2.3 *Tubería de asbesto cemento (AC)*

Factor por tipo de tubo = 2,6 (cuadro 7.4)
Distribución de amenaza = 89% en baja amenaza (0,35 fallas/km, figura 7.1), 11% en amenaza moderada a alta (4 fallas/km, figura 7.2)
Índice de daños base= (0,35) (2,6) (0,89) + (4,0) (2,6) (0,11) fallas/km = 1,95 fallas/km
Contenido de diámetros = 17% diámetros grandes, 35% diámetros medianos, 48% diámetros pequeños
Factor por contenido de diámetros = (1,0) (0,17) + (1,25) (0,35) + (1,5) (0,48) = 1,33
Condiciones de la tubería = 100% en buen estado
Factor por edad y condiciones de tubería = 1,0
Total fallas = (1,95) (1,33) (1,0) (20,5) = 53 fallas.

3.2.4 *Tubería de hierro galvanizado (HG)*

Factor por tipo de tubo = 1,0 (cuadro 7.4, se asume igual que el hierro fundido)
Distribución de amenaza = 96% en baja amenaza (0,35 fallas/km, figura 7.1), 4% en amenaza moderada a alta (4 fallas/km, figura 7.2)
Índice de daños base= (0,35) (1,0) (0,96) + (4,0) (1,0) (0,04) fallas/km = 0,50 fallas/km
Contenido de diámetros = 2% diámetros medianos, 98% diámetros pequeños
Factor por contenido de diámetros = (1,25) (0,02) + (1,5) (0,98) = 1,47
Condiciones de la tubería = 100% en mal estado debido a la acidez del suelo

Factor por edad y condiciones de tubería = 1,5
Total fallas = (0,50) (1,47) (1,5) (8,5) = 9 fallas.

Cuadro 7.6 Comparación entre daños estimados y reales

Tipo Tubería	Material	Daños estimados	Daños reales
Conducción	TCCR	144	120
	HF	54	41
	HD	1	25
Distribución	PVC	250	246
	HF	51	34
	AC	53	81
	HG	9	39
	TOTAL	562	586

Puede observarse que para el caso de tuberías de conducción, el valor de daños estimados es muy cercano al de daños reales provocados por el terremoto del 22 de abril de 1991 excepto para el caso de la tubería de hierro dúctil. Ello se debe a que la zona por donde pasaba esta tubería se vio enormemente afectada por el levantamiento cosísmico, hecho que no toman en cuenta los gráficos de estimación de daños.

Para el caso de las tuberías de distribución se tiene que los daños estimados para la tubería de PVC es similar a los daños reales; mientras que para las tuberías de hierro fundido y asbesto cemento se predijeron 50% más y 50% menos, respectivamente, que los daños reales. Solamente para el caso de las tuberías de hierro galvanizado existe una gran diferencia entre lo estimado y lo causado por el terremoto, probablemente por el hecho de suponer que se podía igualar con el hierro fundido cuando en realidad este tipo de tubo es más frágil.

Nótese que el total de daños estimados difiere apenas en 4% con respecto al total de daños causados por el terremoto.

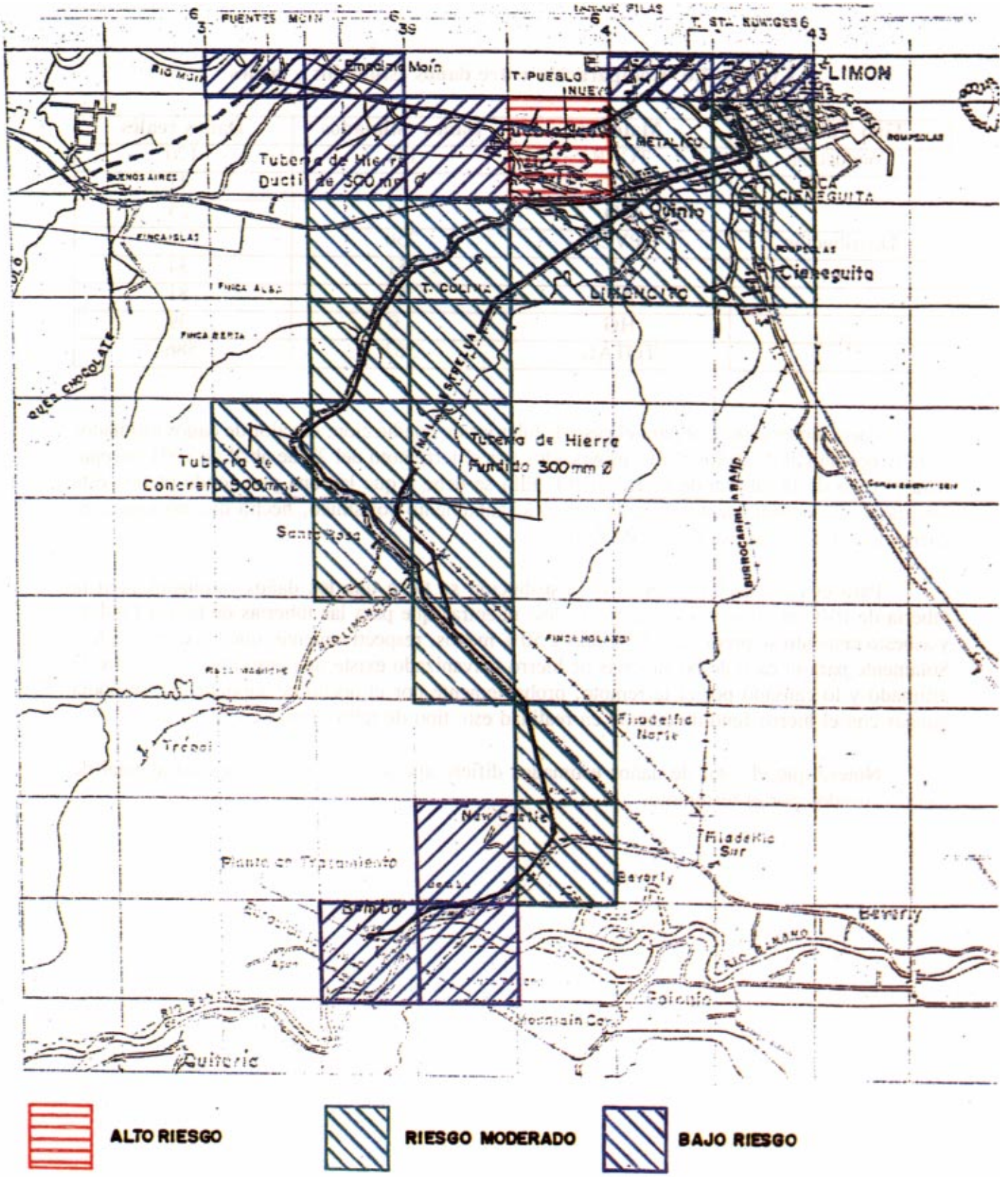



Figura 7.3 Zonificación para los tipos de amenaza sísmica