

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

"VULNERABILIDAD Y SERVICIABILIDAD DE LOS SISTEMAS
DE DISTRIBUCION DE AGUA ANTE SISMO"

JESUS RAFAEL LOPEZ RIVAS

TRABAJO

PRESENTADO A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSTGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(ESTRUCTURAS)

CIUDAD UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE 1992



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E.

- 1.- INTRODUCCION.
- 2.- ANTECEDENTES.
- 3.- COMPORTAMIENTO SISMICO DE TUBERIAS ENTERRADAS.
- 4.- VULNERABILIDAD SISMICA.
 - 4.1 ANALISIS DE LA INFORMACION EXISTENTE.
 - 4.2 PROCEDIMIENTO DE ESTIMACION DE DAÑOS.
 - 4.3 ANALISIS HIDRAULICO.
- 5.- MODELO ESTUDIADO Y HERRAMIENTA DE ANALISIS.
- 6.- RESULTADOS OBTENIDOS.
- 7.- CONCLUSIONES.
- 8.- REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.

RECONOCIMIENTOS

Quiero expresar mi profunda gratitud al Dr. Gustavo Ayala Milián por su valiosa dirección y asesoría en la elaboración de este trabajo. Usted no se imagina cuanto se lo agradezco. Así mismo, al M.I. Jose Alberto Escobar Sanchez, M.I. Octavio Garcia Dominguez, Ing. Margarita Correa Montaña, Ing. Jaime del Carmen Castillo Ruiz, Ing. Olga Eugenia Urrego Giraldo y al Ing. Uriel Zapata Múnera sus comentarios, apoyo y comprensión.

1. INTRODUCCION.

La ocurrencia de temblores intensos ha sido la causa de fallas de sistemas de suministro de agua potable en diversas partes del mundo. Dada la gran importancia social, política y de salud pública que estas fallas tienen, es indispensable lograr que el riesgo de que ellas ocurran sea bajo (ref.1).

Los pasados terremotos de Septiembre de 1985 provocaron en la Ciudad de México, además del daño en las edificaciones con la consecuente pérdida de vidas y recursos materiales, severas fallas en las líneas de suministro y distribución de agua potable. Estas líneas, que en condiciones normales sirven a unos 18 millones de habitantes, dejaron aproximadamente a un 30 % de ellos sin el vital líquido como consecuencia del sismo.

La Ciudad de México, sin embargo, no fué la única que durante este sismo experimentó esta clase de efectos. Lazaro Cárdenas, cercana al epicentro, experimentó igualmente serios daños en las tuberías de agua potable(ref.2).

De particular importancia, por el volumen de agua suministrado, fueron los daños experimentados por el sistema de acueductos del sur-oriente de la Ciudad de México, en donde, a pesar de haber ocurrido fallas durante 1979, no existía un plan de emergencia que garantizara, al ocurrir fallas por temblores esperados, un pronto restablecimiento del servicio. Afortunadamente, los enormes esfuerzos por parte de los ingenieros y técnicos involucrados en el restablecimiento del servicio evitó que el problema alcanzara

proporciones mayores.

Lo anterior muestra la necesidad de contar con planes que permitan, en situaciones de emergencia como los ocasionados por un temblor severo, la pronta detección y reparación de los daños en las líneas de suministro de agua potable. Estos planes permiten contar, de manera eficiente, con personal calificado y recursos materiales suficientes y bien distribuidos para llevar a cabo el restablecimiento del servicio.

Una parte importante en la definición de estos planes de salvaguarda es la determinación de la vulnerabilidad ante sismos de los sistemas de tuberías que abastecen de agua potable a la Ciudad de México. La evaluación de la vulnerabilidad del sistema se efectúa definiendo, con base en las estadísticas de daño existentes en la Ciudad de México y en otros lugares del mundo, la distribución espacial del peligro sísmico y postulando, con esta información, escenarios de daño basados en un modelo probabilista. Con la herramienta propuesta es posible, para cualquier escenario de daño, efectuar el análisis hidráulico de la red y determinar el nivel de servicio esperado y las posibles condiciones de operación que incrementen su serviciabilidad a medida que se efectúan las reparaciones al daño.

En este trabajo se hace un estudio del peligro sísmico a que se ve expuesta la red primaria de distribución de agua potable de la Ciudad de México y se determina qué tan vulnerable es el sistema y cómo es la serviciabilidad de la misma después de un evento sísmico.

2. ANTECEDENTES.

Durante el sismo del 14 de Marzo de 1979 que se sintió en el Distrito Federal con una magnitud de 7.6 en la escala de Richter se presentaron daños de consideración en la línea de suministro de agua ubicada en la zona de Xochimilco-Tláhuac, además de la red de distribución primaria del Distrito Federal.

Dicho acueducto está construido a base de tubos de concreto con juntas tipo lock-joint, de 4.88 mts (16 pies) de largo y diámetros diversos, hasta de 181 cms (72 ").

El diagnóstico acerca de la causa de la falla (ref.3) fué que las juntas no tuvieron la holgura (separación) suficiente para absorber las deformaciones ocasionadas por el temblor, por lo que algunos tramos consecutivos entraron en contacto, sufriendo impactos en sus caras adyacentes, los que ocasionaron la ruptura en diez puntos de unión de tramos de tubería; además, se presentaron fallas por desenchufe. Un resumen de los daños estadísticos ocasionados a los sistemas de distribución de agua potable de la Ciudad de México y otras partes del mundo se presentan en la tabla 1, en la cual se presentan los daños ocasionados a dichos sistemas desde 1800 hasta la actualidad (ref.4).

Tabla 1 Reseña histórica de daños.

FECHA	MAGNITUD	LUGAR	CARACTERISTICAS DEL DAÑO
31-05-1818	*	México D.F	Daños en el sistema de acueducto.
04-05-1820	*	México D.F	Daños en el sistema de acueducto.
06-01-1835	*	México D.F	Daños en el sistema de acueducto.

Tabla 1 Reseña histórica de daños. (Continuación)

FECHA	MAGNITUD	LUGAR	CARACTERISTICAS DEL DAÑO
03-10-1864	*	México D.F	Daños en tuberías enterradas en arcillas.
19-07-1882	*	México D.F	Daños en tuberías enterradas en arcillas.
14-04-1907	8.2	México D.F	Daños en tuberías enterradas en arcillas.
01-09-1923	7.9	Kanto, Japón	Daños en la línea de conducción desde la fuente hasta la ciudad de Tokio - el daño se presentó en las juntas.
03-06-1932	8.4	México D.F	Daños en el sistema de acueducto.
28-06-1948	7.3	Llanura de Fukui (Japón)	Daños en las línea de distribución primaria en tubería curvas cercanas a puentes, en válvulas y piezas especiales.
16-06-1964	7.5	Niigata Japón	Daños en las líneas de conducción y distribución, donde hubo separación de juntas, rupturas de llaves de toma, válvulas y Tubería en general.
09-02-1971	6.6	Sn Fdo California	Daños en las líneas de distribución, donde se presentó colisión, flexión y separación de tuberías.
23-12-1972	6.3	Managua Nicaragua	Daño en el sistema de distribución, debido al desplazamiento de juntas.
30-06-1973	7.5	México D.F	Daños en el sistema de acueducto.
28-08-1973	7.5	México	Daños en el sistema de distribución de Orizaba y en las tuberías de concreto reforzado del sistema de conducción de la ciudad de Córdoba.

Tabla 1 Reseña histórica de daños. (Continuación)

FECHA	MAGNITUD	LUGAR	CARACTERISTICAS DEL DAÑO
28-07-1976	8.0	Tangshan, Provincia de Hopei	Ruptura de tubería, fallas en juntas y piezas especiales.
2-06-1978	7.4	Miyagi, Japón	Fallas en las tuberías de distribución, debido a la proximidad a líneas de corte y relleno.
14-03-1979	6.5	México D.F	Daños en el sistema de acueducto. Fallas en las juntas por incrustación de un tubo en otro al chocar dos tramos continuos de tubería. (Telescopiado).
19-09-1985	8.1	México D.F	Daños en el sistema de acueducto, donde se presentaron telescopiado de tubos y separaciones.

* no estimados.

Por lo anterior, para evitar las fallas por choque de tramos contiguos, es indispensable dejar holguras suficientes en las juntas. El tamaño mínimo recomendable de dichas holguras dependerá de las deformaciones impuestas al terreno por el sismo de diseño, de la compresibilidad del suelo de desplante, de la longitud y diámetro de los tubos, de las rigideces de las juntas, de la cohesión del suelo con los tubos, de las propiedades del suelo y la velocidad de propagación de las ondas. Con una separación adecuada de los tramos se logra reducir considerablemente los esfuerzos en la propia tubería respecto a los que se tendrían si fuese continua

Del análisis de las fallas en tuberías debidos a sismos de diversas partes del mundo, se ha concluido que la mayoría de ellas pueden atribuirse a alguna de las siguientes causas :

1. Propagación de ondas en el suelo.
- 2 Desplazamientos relativos de ambas caras de una falla geológica.
3. Movimientos permanentes del suelo de soporte, ocasionados por fallas de taludes o por licuación de arenas.

Debido a la localización y a las condiciones locales del suelo del Distrito federal se puede afirmar que los daños en las tuberías son causados por los movimientos del terreno, atribuidos a la propagación de las ondas sísmicas, y en menor importancia a la falla y/o agrietamiento del terreno. Los deslizamientos y el fenómeno de licuación no ocurren en el valle de México.

3. COMPORTAMIENTO ANTE SISMOS DE TUBERIAS ENTERRADAS.

A diferencia de la mayoría de las estructuras, las tuberías enterradas no basan su comportamiento sísmico en efectos producidos por la aceleración a que se ven sometidas. Debido a su poca masa en comparación con su gran longitud, su comportamiento sísmico está regido por la deformación que sufre el terreno que se puede demostrar, es función de la velocidad máxima del terreno.

Por otro lado, cuando un edificio se somete a un movimiento en su base, es válido considerar que este es constante en ella. En el caso de una tubería enterrada, sin embargo, no se puede adoptar tal suposición debido a la extensión de este tipo de estructuras, de modo que a lo largo de ella el desplazamiento de sus puntos no será simultáneo sino que se tratará de un movimiento incoherente (ref.5) y los esfuerzos en la tubería se deberán a ello.

Kuesel (ref.6) señala que es importante que el diseñador reconozca que el efecto del sismo en estructuras enterradas es la imposición de una deformación arbitraria que no puede ser cambiada reforzando la estructura; por tanto, hay que buscar ductilidad más que resistencia a las cargas inerciales especificadas.

La imposición de una deformación arbitraria se puede deber a diferentes movimientos del terreno; sin embargo, el más frecuente es el debido a la propagación de ondas sísmicas y a la amplificación de estas. Una pregunta que aún nos queda al comenzar a estudiar el movimiento de un conducto subterráneo es si existe o no deslizamiento entre el suelo y el tubo. Aunque no se tiene una

respuesta definitiva, los autores de las ref.7 y 8 coinciden en que el considerar tal corrimiento como nulo es conservador.

Un segundo aspecto es el tipo de excitación a que se somete la tubería en su condición más crítica; Kuesel afirma que para tubos de gran diámetro a profundidades medias, las ondas que tienen más interés en nuestro caso son las de cortante; por otro lado, las ondas que influyen más en las deformaciones unitarias de la tubería a profundidades someras son las superficiales (Raleigh y Love).

Lo anterior parece concordar con las observaciones de Kubo (ref 9) en cuanto a que las tuberías dañadas en el sismo de Kanto de 1923 fueron aquellas que estaban enterradas a 1.20 mts de profundidad, mientras que las que se situaban a 2.40, mts permanecieron indemnes, es decir, que las tuberías más superficiales sufrieron más el embate del sismo; esta situación ocurrió también en la Ciudad de México al no presentarse daño aparente en tuberías del drenaje profundo.

Otro punto que cabe resaltar es que los efectos más importantes, en tuberías enterradas son los axiales ya que los efectos de flexión son comparativamente despreciables, excepto en suelos blandos donde estos pueden tener alguna importancia por las grandes deformaciones a que se ven sometidos (ref 8).

Kubo (ref 9) y Ayala y Rascón (ref 3) encontraron, con base en observaciones de campo, que las deformaciones por flexión en la cercanía de codos y curvas fueron del mismo orden que las registradas en tramos rectos.

Por último, es muy importante resaltar que es en las zonas de transición donde ocurre el mayor daño en las tuberías, pues además de cambiar de relación de propiedades mecánicas suelo-estructura, existe una modificación en el movimiento del terreno.

4. VULNERABILIDAD.

4.1 ANALISIS DE LA INFORMACION EXISTENTE.

La Ciudad de México cubre una área aproximada de 1500 km² con una población que excede los 18 millones de habitantes. La mayor parte de la Ciudad se encuentra en el Distrito Federal y requiere de un suministro de flujo superior a 62 m³/seg y las áreas metropolitanas dentro del Estado de México requieren un gasto menor.

Las principales fuentes de abastecimiento de agua potable y su porcentaje dentro del suministro total para el Distrito federal son :

Manantiales y pozos (D.F. y C.A.V.M.)	71.0 %
Sistema Lerma (D.F.)	14.5 %
Sistema Cutzamala	9.7 %
Reciclaje de aguas residuales	3.2 %
Almacenamiento de precipitaciones	1.6 %

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) a través de la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM) , proporciona 20 m³/seg de los 62 m³/seg del gasto total del Distrito Federal. La fig.1 muestra un mapa de las fuentes de suministro.

Debido al gasto real de los acuíferos de los Valles de México y Lerma, el Gobierno Federal ha empezado a operar el sistema

- Manantiales
- Sistema de pozos
- +++++ Limites del Distrito Federal
- *** Acueductos de la CAVM
- Acueductos del D.F.

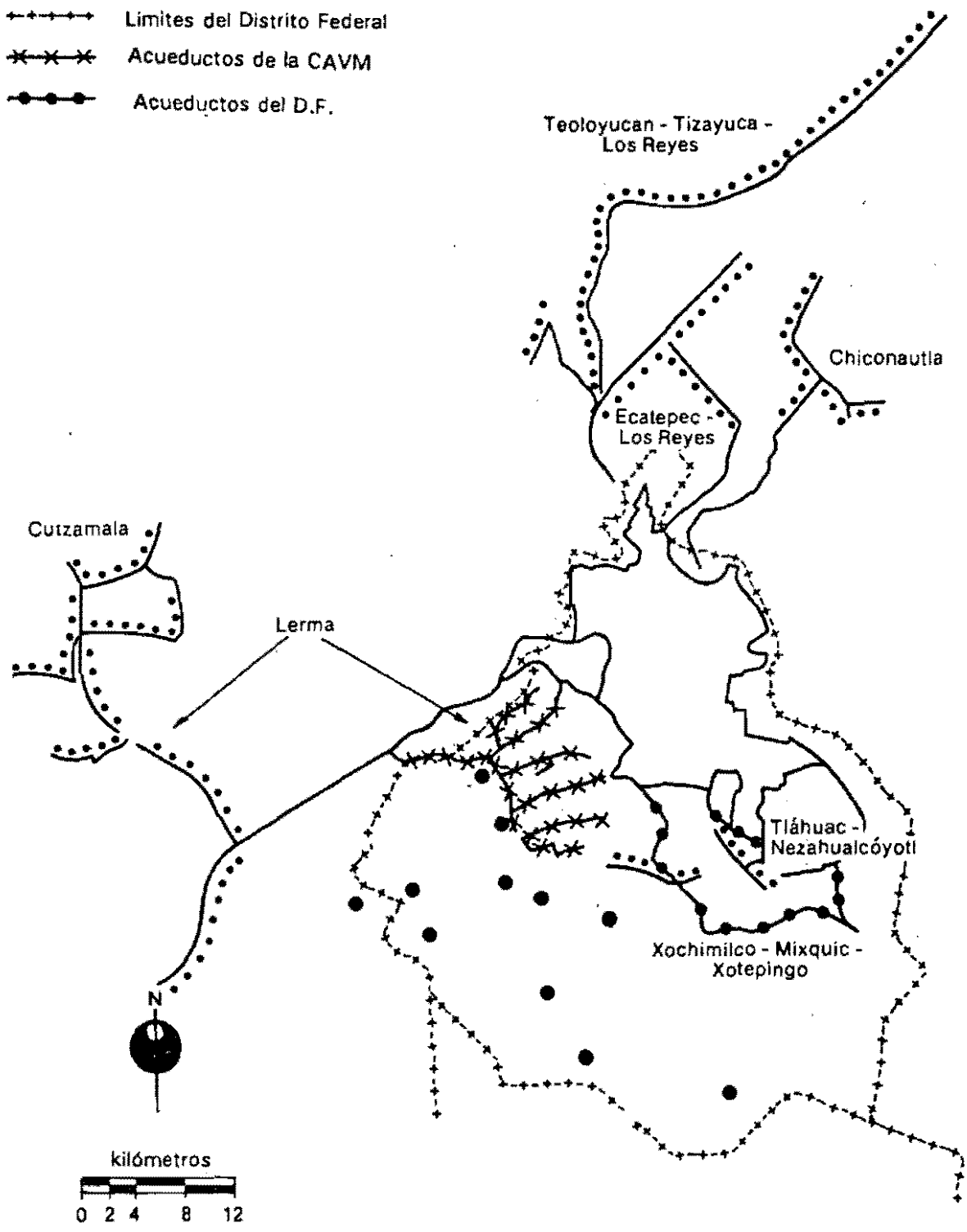


Fig. 1. Suministro de agua para el área metropolitana de la ciudad de México

Cutzamala, que suministra agua potable a la zona metropolitana de la Ciudad de México de la cuenca del Río Balsas, localizada al oeste del Valle de México. Se estima que este sistema será suficiente para solucionar el incremento de la demanda hasta el año 2000.

Existen 10 plantas de tratamiento de aguas residuales operadas por el Departamento del Distrito Federal, las cuales proveen agua reciclada/tratada para uso industrial, riego de parques y lagos recreativos. La red para el tratamiento de aguas residuales, que consiste de 500 km, se muestra en la fig 2.

La red de transmisión y distribución primaria de agua potable en el Distrito Federal consiste de aproximadamente 560 km. de tuberías, con diámetros de 20" a 72". La red secundaria está compuesta de aproximadamente 11,700 km de tubería con diámetros de 2" a 18". El sistema ha evolucionado desde inicios de siglo y está formado por la red construida hace 8 décadas y numerosas nuevas líneas que han sido construidas recientemente.

No se tiene un censo completo del material y tipo de tubería, ni la localización precisa de las líneas debido al hecho de que el edificio donde esta información era almacenada fué completamente destruido por el sismo del 19 de septiembre de 1985; en vista de estas circunstancias fué necesario conocer su estado actual de la manera más precisa posible. Para ello se visitó en repetidas ocasiones a sitios donde esta se ubica, se discutió con el personal encargado de su mantenimiento y reparación; todo esto con el propósito de establecer las características que presenta la misma, esto es, su trazo, diámetros de los tubos que la integran, material de los tubos que la constituyen, características de las juntas, número y características de las fallas detectadas, etc.

En este aspecto, tanto el personal de la DGCOH del DDF como algu-

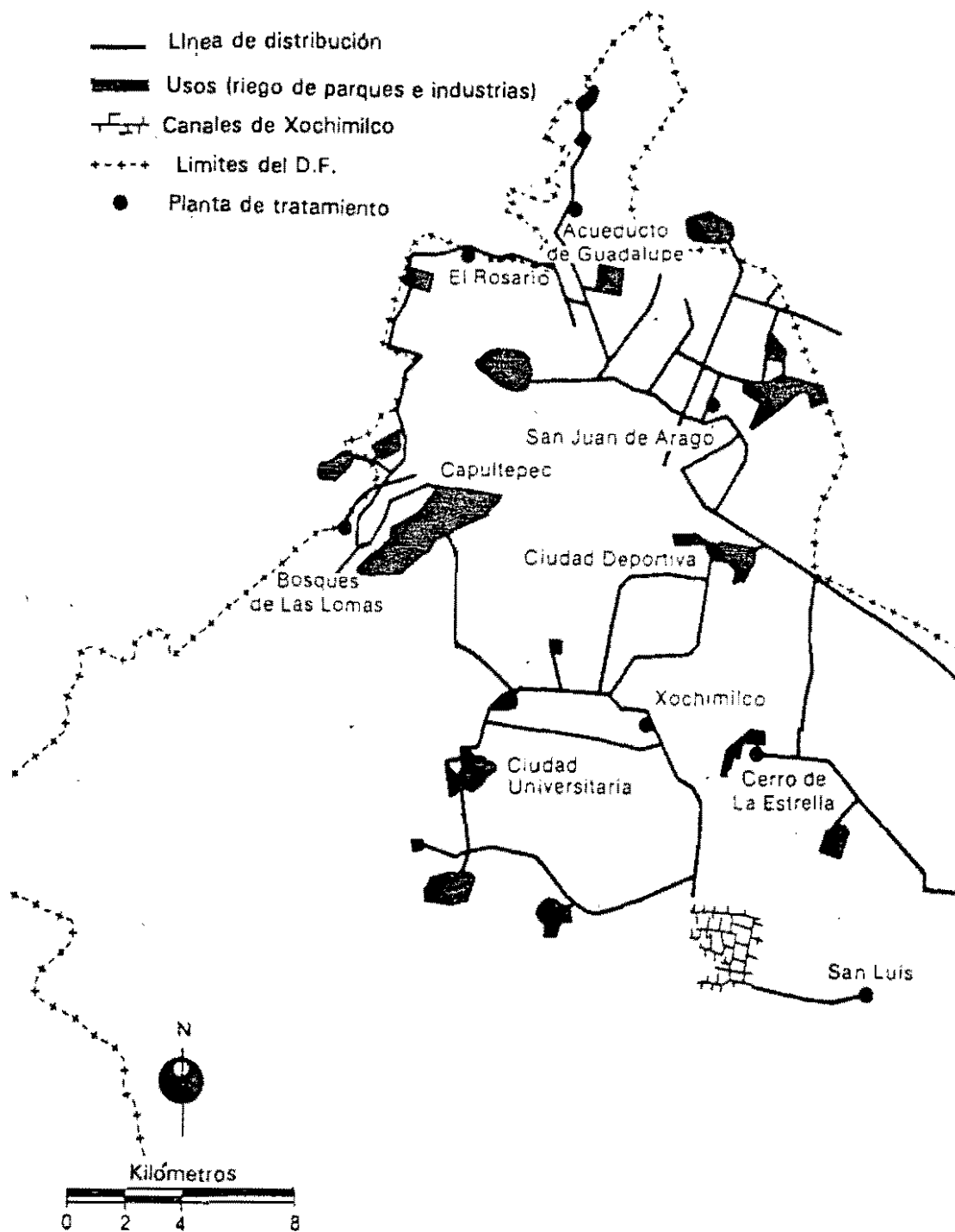


Fig. 2. Red de distribución para el tratamiento de aguas residuales

nas de las compañías constructoras que participaron directamente en la construcción y/o reparación de fallas de la red primaria de agua potable de la Ciudad de México, representaron la mejor fuente de información para establecer el estado actual de la misma.

Con base en lo anterior, fué posible establecer las características físicas de la red y en base a los datos suministrados por el personal de la DGCOH del DDF fué posible desarrollar la fig.3, la cual nos muestra la localización de las líneas primarias de transmisión y de distribución más importantes con diámetros iguales o mayores a 20".

Cabe mencionar que éstas líneas primarias están distribuídas uniformemente en la parte norte del Distrito Federal, la cual está urbanizada. La parte sur del Distrito Federal es montañosa y su población está dispersa en una gran superficie.

Otros datos para evaluar la vulnerabilidad de la red primaria de distribución de agua potable son las características de los suelos en los que ésta se ubica, esto es, velocidad aparente de las ondas en el suelo, módulo de rigidez al cortante y cohesión del suelo, entre otros.

En esta etapa se presentaron dificultades para obtener esta información ; dado que no se cuenta con sondeos ni estudios recientes que permitan conocer con cierto grado de confiabilidad las características del suelo, se recurrió a la información presentada en diferentes Congresos Nacionales de Mecánica de Suelos, pudiéndose establecer un perfil geológico aproximado de los diferentes tipos de suelos de la zona donde se ubica la red de distribución primaria de agua potable de la Ciudad de México, como se muestra en la fig.4.

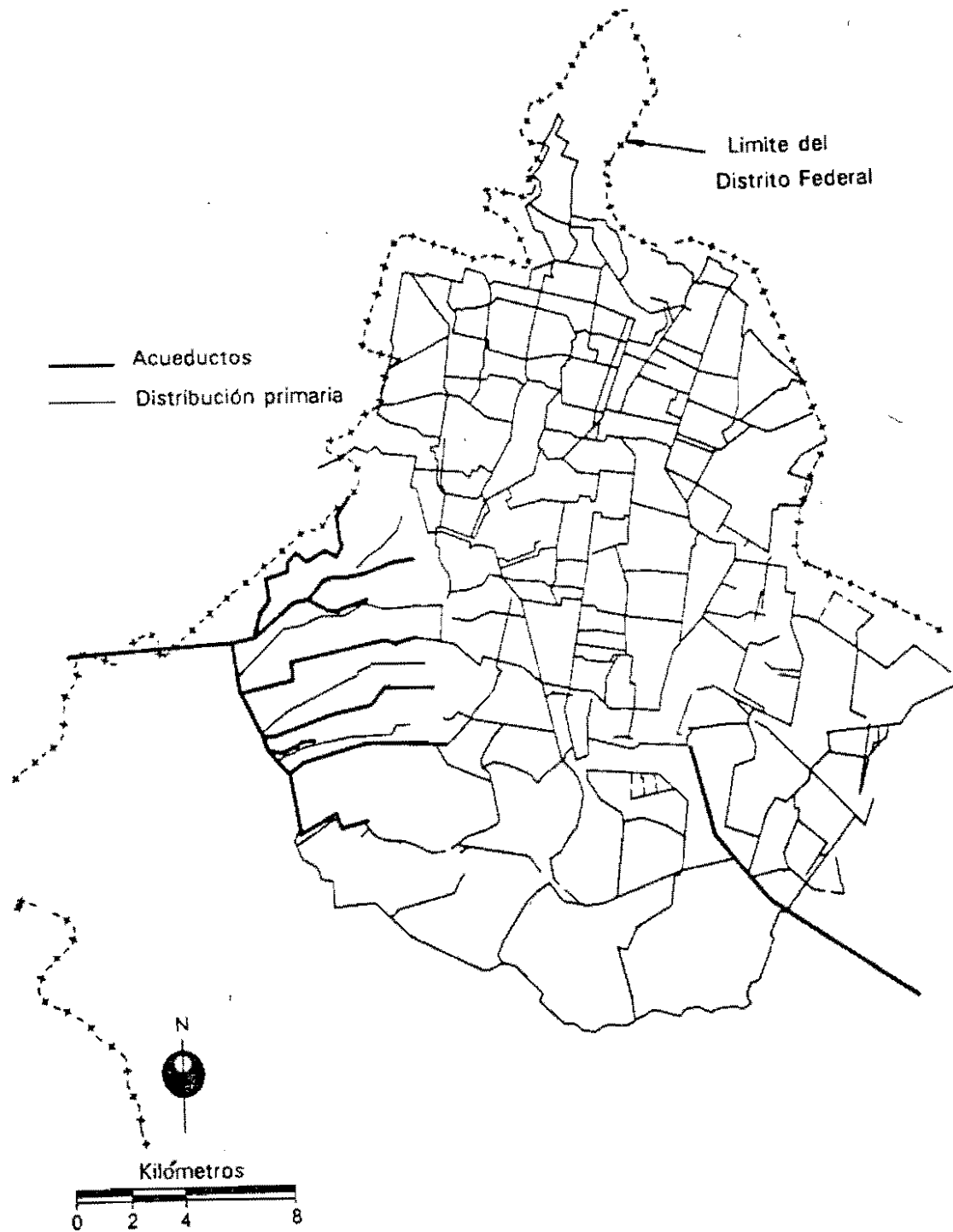


Fig. 3. Acueducto y líneas de distribución primaria controlados por el Distrito Federal

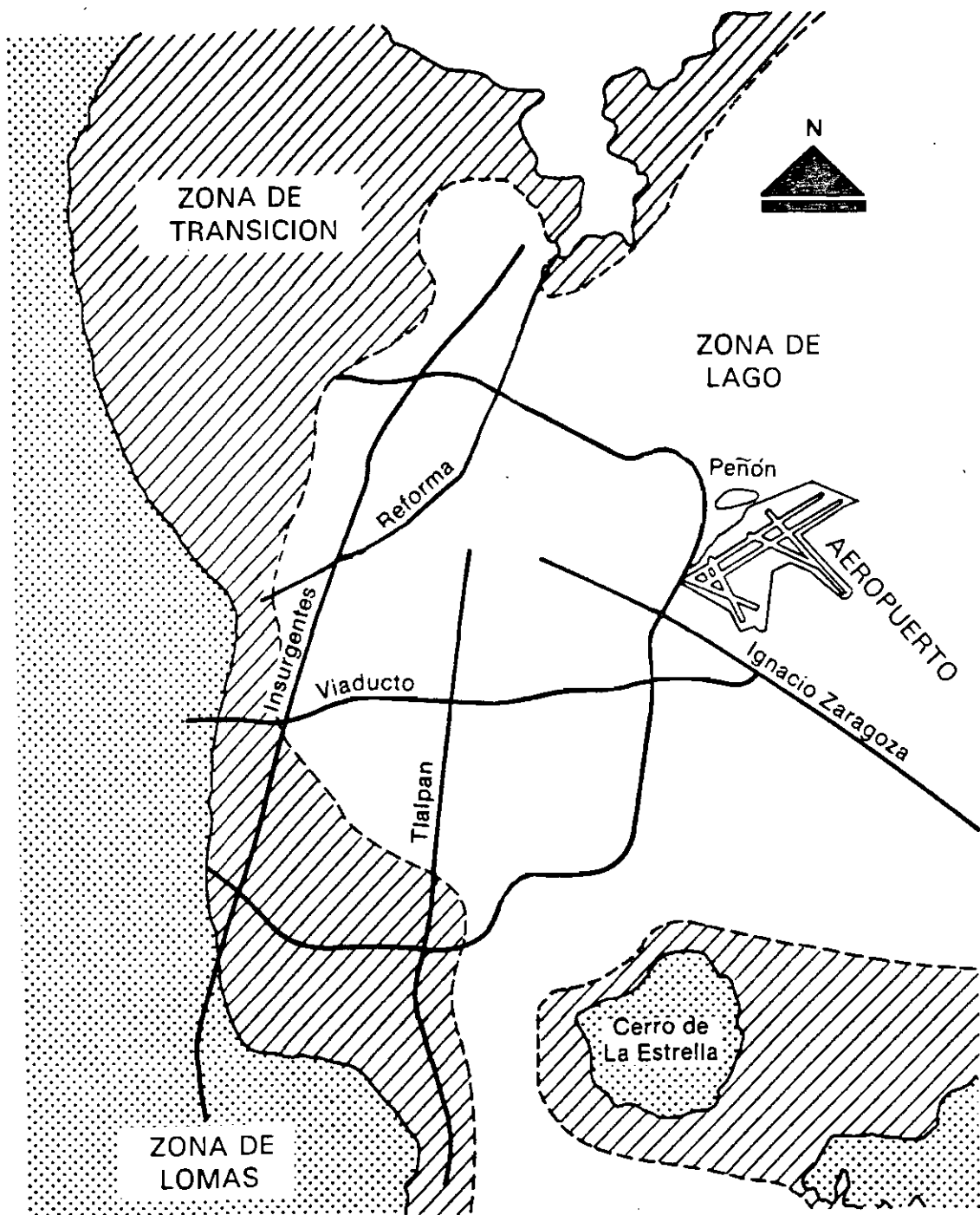


Fig.4 Zonas de suelo para el área metropolitana de la ciudad de México

4.2 PROCEDIMIENTO DE ESTIMACION DE DAÑOS.

La confiabilidad de un sistema se define como la capacidad de mantener su funcionamiento en márgenes previstos a pesar de las perturbaciones adversas que sufre; se mide como el inverso de la probabilidad de la alteración y, en el caso de las líneas vitales (específicamente redes de distribución de agua) la disminución del servicio del sistema.

La confiabilidad depende de la intensidad del fenómeno destructivo y de la vulnerabilidad del sistema. El daño físico sufrido por un sistema puede alterar severamente su funcionalidad, o sea su serviciabilidad.

Para un sistema de abastecimiento de agua es importante no solamente asegurarse de su resistencia ante sismos, sino además, dado que no es posible garantizar que un sistema no se dañará, preparar medidas ante los efectos del temblor, tales como planes para optimizar la restauración del servicio con medidas apropiadas de emergencia.

Por lo tanto, la evaluación del daño, la serviciabilidad del sistema y la preparación razonable de medidas que enfrenten una catástrofe de este tipo son los problemas más importantes que trata de resolver este trabajo.

La fig 5 muestra las razones de daño en diversos lugares del mundo. En ella se correlacionan las reparaciones por kilometro contra la máxima aceleración del terreno con límites asociados a las condiciones del suelo divididas en tres categorías: condiciones pobres, medias y buenas (ref.10).

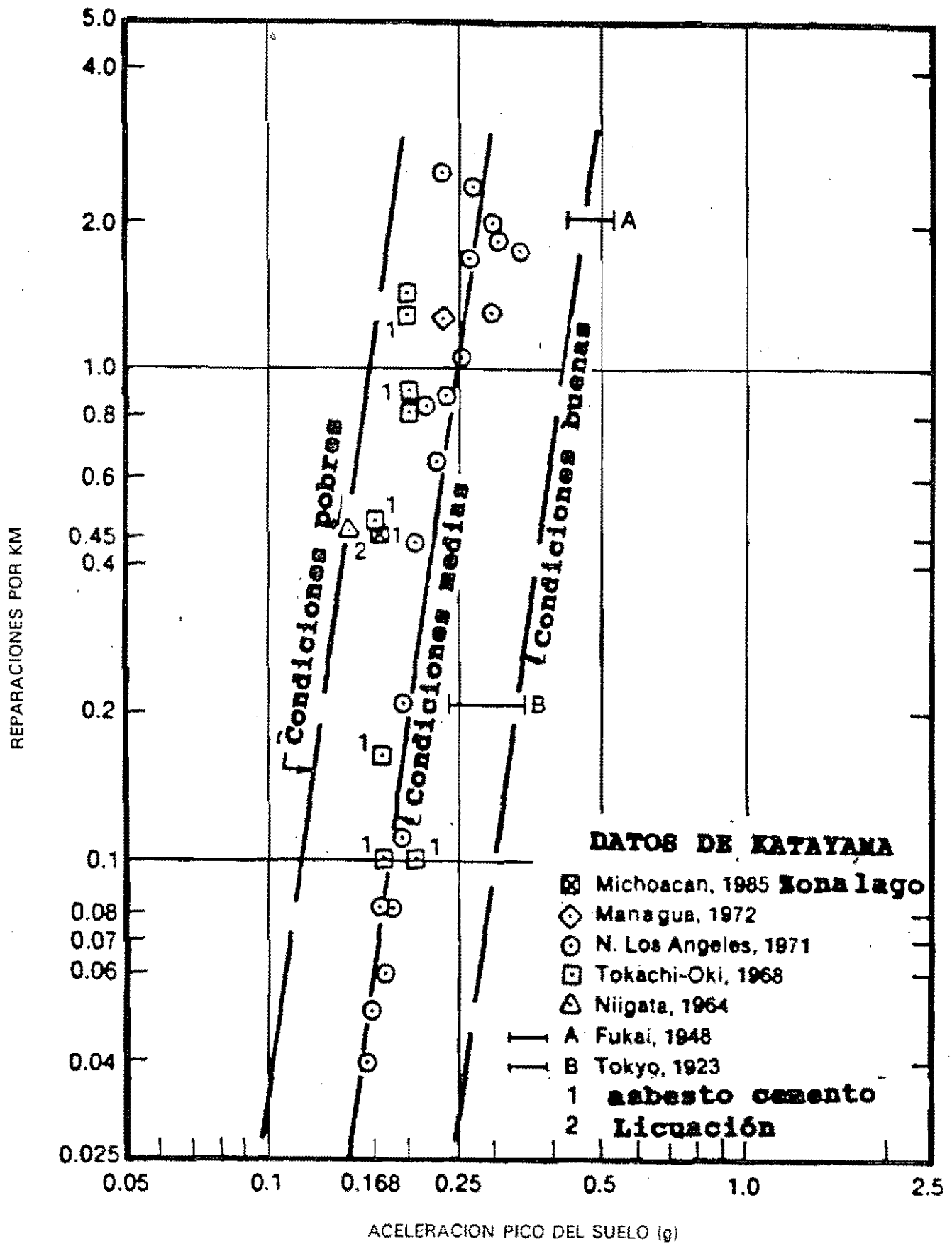


Fig. 5. Estadísticas de daño para diversos lugares del mundo.

En la gráfica podemos observar la ubicación correspondiente a los daños causados en las tuberías por el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México, se nota que se ajusta muy bien a las gráficas de estadísticas mundiales, motivo por el cual emplearemos estas gráficas para simular otros estados de daños correspondientes a sismos de diferentes intensidades.

La determinación del daño esperado en la red representa un paso crítico en la evaluación de su vulnerabilidad. En general, la razón de daño R se considera conocida, sin embargo, es función de diversos factores adicionales a la intensidad sísmica, tales como el material de las tuberías, los diámetros de las mismas, etc.

Así, la razón de daño se puede expresar como :

$$R = C1 * C2 * \dots * Cn * Rb \quad \text{Ec.1.}$$

donde C1 a Cn son coeficientes que dependen del tipo de suelo, características y edad de los tubos, profundidad de desplante, etc, y Rb es la razón básica de daño.

Se debe definir la probabilidad de daño de la red primaria de distribución de agua potable de la Ciudad de México ante un evento sísmico determinado, este es un problema fundamental e importante ya que en buena parte, de él depende el análisis del funcionamiento del sistema después de ocurrido un evento sísmico. La evaluación razonable de la probabilidad de daño de una tubería enterrada es una tarea extremadamente dificultosa y en especial para las tuberías de la red primaria de abastecimiento de la ciudad de México, por la gran cantidad de tuberías de diferentes materiales y tamaños por las condiciones tan complejas del suelo. En realidad es muy poco lo que se conoce acerca de todas las variables físicas de la red que intervienen en la probabilidad de falla de sus elementos, motivo por el cual el procedimiento a seguir para evaluar el

daño es a partir de la relación de falla (R), entendida como la relación entre el número de fallas por unidad de longitud(km). Para la Ciudad de México este valor variará espacialmente de acuerdo con las estadísticas de daño experimentado durante el sismo del 19 de septiembre de 1985.

Las razones de daño que se emplean en este trabajo se basan en las estadísticas de daño del sismo de 1985; en la fig.6 se muestra la distribución de estos daños por Delegación. Para otras intensidades, debido a la ausencia de información sobre daño en tuberías en la Ciudad de México, se utilizó la información contenida en la fig.5.

Los modelos probabilistas para la predicción de daño están basados en la información registrada de eventos pasados. De esta información se establece que el modelo de falla obedece a un PROCESO DE POISSON, de modo tal que a cada tubería se le asigna una probabilidad de falla dada por la siguiente expresión :

$$P (f)_n = 1 - \text{EXP} (- R_n * L_n) \quad \text{EC.2.}$$

donde

$P (f)_n$ = es la probabilidad de falla de la tubería n,
 R_n = es la razón básica de daño de la tubería n y
 L_n = es la longitud de la tubería n.

El algoritmo para simular que una tubería se ha roto ante la acción de un evento sísmico de intensidad conocida consiste en generar un número aleatorio con distribución uniforme entre 0 y 1 para cada tubería y compararlo con P(f). Así, si el número aleatorio es menor que P(f), la tubería se considera como rota y será modificada de acuerdo a lo que se discute más adelante.

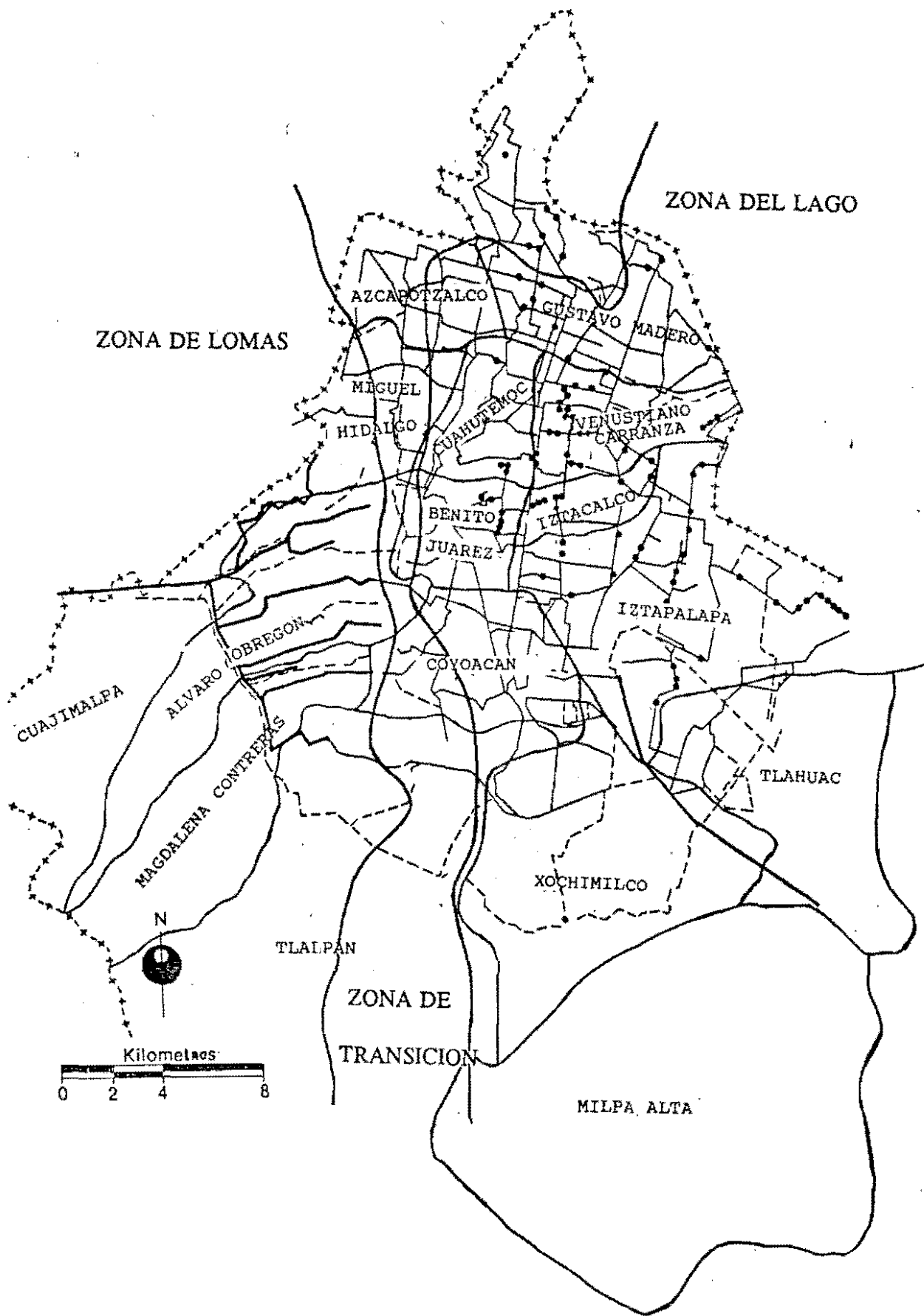


Fig. 6. Localización de los daños registrados en la red de distribución de agua de la ciudad de México por delegaciones - sismo 19 de septiembre de 1985

De esta forma, se pueden obtener escenarios de daño simulados para sismos de intensidades diferentes y a partir de estos escenarios analizar la vulnerabilidad del sistema, es decir, detectar si un escenario de fugas impacta el funcionamiento de la red y cómo modifica su serviciabilidad.

4.3 ANALISIS HIDRAULICO.

El análisis de redes de distribución de agua con fugas no ha sido tratado suficientemente en la literatura especializada. A pesar de ser un problema de gran importancia no existen programas comerciales y, probablemente, tampoco de investigación que puedan resolver el problema general de una red de distribución de agua con fugas. La dificultad del problema estriba en que, aún bajo condiciones estacionarias, la existencia de fugas ocasiona la aparición de presiones negativas artificiales en zonas en donde no es posible que exista flujo en las tuberías, y que si existiese este sería parcial en el que el agua no circularía a tubo lleno sino parcialmente lleno como en un canal.

El despreciar estas características en el análisis de redes de distribución de agua lleva a resultados erróneos que a menudo contradicen los mismos fundamentos físicos del flujo de agua en redes de tuberías, es decir, que la demanda fuese siempre satisfecha a pesar de la existencia de presiones negativas que causarían el colapso de los tubos y hasta el fenómeno de cavitación. Ya que es bien conocido que las redes de distribución de agua en general admiten aire, estas presiones negativas no son posibles por lo que es necesario contar con un modelo hidráulico realista para redes dañadas, en el que los tubos no acepten ninguna presión por abajo de la atmosférica.

El problema de evaluar el comportamiento hidráulico de redes de distribución de agua ha sido tema de investigación por varias décadas. Las ecuaciones y los métodos empleados son bien conocidos en la literatura; sin embargo, la información existente no permite el análisis de redes con fugas, por lo que a continuación se presenta un método desarrollado para este propósito, el cual es plasmado en el programa de análisis hidráulico de tuberías dañadas presentado en la ref.13.

El programa puede analizar hidráulicamente redes de cualquier tamaño simulando bombas, válvulas, válvulas check, depósitos y otros componentes. La solución de la red se hace a través de un proceso iterativo basado en el método de Newton-Raphson, el cual es eficaz para resolver las ecuaciones que gobiernan al problema físico.

Las ecuaciones que gobiernan el análisis del sistema son :

. Ecuaciones de continuidad para cada nudo. Estas ecuaciones establecen que la suma de flujos Q_{ij} en las tuberías incidiendo a un nudo son iguales a la demanda en dicho nudo.

$$\sum Q_{ij} - D_i = 0 \quad \text{EC.3.}$$

.Ecuaciones de energía para cada tubería. Estas ecuaciones involucran las pérdidas de energía de una tubería (h_L), son iguales a la suma de las pérdidas por fricción (h_{LP}) y las pérdidas menores (h_{LM}). Para estimar las pérdidas por fricción, el programa tiene la opción de emplear la ecuación de HAZEN-WILLIAMS o la ecuación de DARCY-WEISBACH, expresadas en la siguiente forma :

$$h_{LP} = K_p * Q^n \quad \text{EC.4.}$$

donde K_p es una constante que es función de la longitud de la tubería, el diámetro, la rugosidad y el factor de fricción. De acuerdo con la ecuación utilizada, para la ecuación de Hazen-Williams, tomaría la forma :

$$K_p = X * L / (C^{1.852} * D^{4.87}) \quad \text{EC.5.}$$

donde el exponente $n = 1.852$ y la constante X depende del sistema de unidades empleado; por ejemplo, para unidades inglesas $X = 4.73$ y para el sistema internacional: $X = 10.69$. L es la longitud de la tubería, C es el coeficiente de rugosidad y D el diámetro de la

tubería; para la ecuación de Darcy-Weisbach, su forma es :

$$K_p = 8 * f * L / (g * D^5 * \Pi^2) \quad \text{EC.6.}$$

donde el exponente $n = 2.0$, f es el factor de fricción y g la aceleración de la gravedad.

Las pérdidas menores están dadas por la siguiente ecuación :

$$h_{LM} = K_H * Q^2 \quad \text{EC.7.}$$

K_H es una función de la suma de los coeficientes de pérdidas menores (V) y del diámetro, expresada como :

$$K_H = A_2 * V / D^4 \quad \text{EC.8.}$$

donde A_2 es una constante que depende del sistema de unidades. Así, si se trabaja con el sistema inglés: $A_2 = 0.02517$; si es el sistema internacional: $A_2 = 0.08265$.

La ecuación de energía expresada en términos de flujo es :

$$E = (K_p * Q^n + K_H * Q^2) - Z / Q \quad \text{EC.9.}$$

donde

$$E = H - e, \text{ y}$$

Z = es una función de la potencia en caso de que existan bombas definidas en la red.

Para simular las fugas, la metodología que se empleó consistió en dos procedimientos :

- El primer procedimiento que se empleó consistió en cerrar la tu-

bería declarada como rota con una válvula para eliminar el flujo entre los dos nodos; además, se adicionó a cada nodo una tubería de igual diámetro que la original, con longitud igual a la mitad de la tubería rota y la presión en el extremo de estas dos nuevas tuberías es la presión atmosférica, como se muestra en la fig.7.

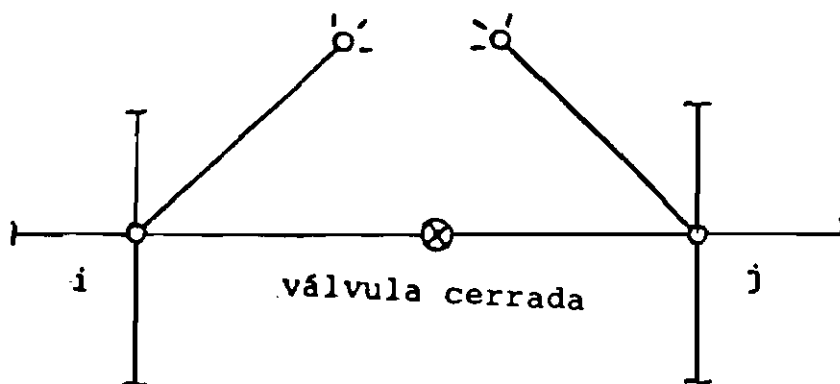


Figura 7. Modelo 1 para simular las fugas en una tubería

La desventaja encontrada en este modelo es que no permite considerar fugas de tamaños diferentes ya que todos los tubos rotos se abren a la atmósfera.

- El segundo procedimiento que se emplea consiste en simular una fuga en una tubería como un orificio localizado en un punto predefinido a lo largo de ella. Si la presión del fluido es positiva, la formulación se hará como se describe más adelante. En caso de que la presión sea negativa será necesario revisar la condición de flujo parcial. En el caso de presentarse presión negativa en la tubería que simula un orificio, esta se cerrará con una válvula check. En la fig 8 se muestra este modelo (ref.11).

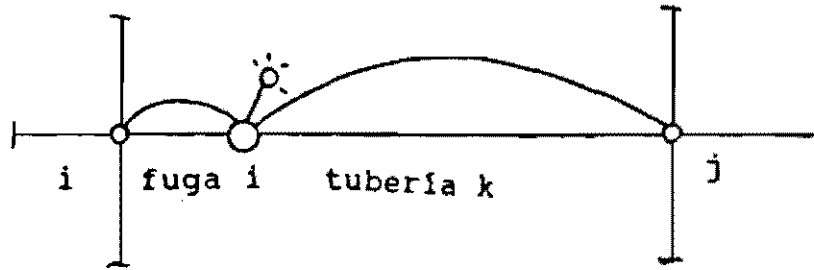


Figura 8. Modelo 2 para simular las fugas en una tubería

Sea un orificio localizado en un punto intermedio entre los extremos i-j de una tubería, la fórmula del orificio está dada por la ec.10; véase refs.12 y 13.

$$Q_o = C_c * a * C_v * \sqrt{(2 * g * h)} \quad \text{Ec. 10.}$$

donde

- Q_o = es la fuga o gasto en la tubería,
- C_v = es el coeficiente de velocidad,
- C_c = es el coeficiente de contracción,
- g = es la aceleración de la gravedad,
- a = es el área del orificio y
- h = es la altura piezométrica.

El coeficiente C_v es un factor para tomar en cuenta las pérdidas por energía y el coeficiente C_c mide la contracción del flujo al pasar por el orificio. El producto de C_c y C_v se puede expresar como un coeficiente de descarga C , con lo que la Ec. 10 se puede escribir como :

$$Q_o = C * a * \sqrt{(2 * g * h)} \quad \text{EC. 11.}$$

Pruebas experimentales en tuberías de sección transversal cuadrada y circular han proporcionado valores aproximados del coeficiente de descarga. Se ha encontrado que el coeficiente de velocidad promedio es del orden de 0.62 y el coeficiente de contracción C_c se aproxima a 1, dando como resultado un coeficiente de descarga promedio C igual a 0.63. Se ha encontrado que el valor del coeficiente de descarga oscila entre 0.607 y 0.776. Por recomendación de expertos en el área de hidráulica, en esta investigación y en las partes subsecuentes de la misma que se llevarán a cabo en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se seleccionó un coeficiente de descarga igual a 1.0.

5. MODELO ESTUDIADO Y HERRAMIENTA DE ANALISIS.

El modelo hidráulico de la red de distribución primaria de agua potable de la Ciudad de México consta de 274 tuberías, 158 nodos y 23 tanques; véase fig. 9. En la tabla 2 se muestra la relación de longitud-diámetro para toda la red de acuerdo a las delegaciones. Para el escenario de daños definido por el temblor de septiembre 19 de 1985, se consideraron 51 tubos rotos, lo cual concuerda con los datos que nos fueron proporcionados por la DGCOH del DDF al cual se hizo referencia en la sección 4.1; véase fig.6.

TABLA 2

LONGITUD DE TUBERIAS PARA EL SISTEMA PRIMARIO DE DISTRIBUCION DE AGUA EN EL DISTRITO FEDERAL (D. F.)

DELEGACION	LONGITUD DE TUBERIAS (EN km PARA VARIOS DIAMETROS EN PULGADAS)								TOTAL
	20"	24"	30"	32"	36"	42"	48"	72"	
BENITO JUAREZ	9.30	0.00	0.00	0.00	8.40	0.00	22.40	0.00	40.10
COYOACAN.	14.80	0.00	0.00	0.00	3.30	0.00	20.90	0.00	39.00
TLALPAN.	1.00	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	2.30
IZTACALCO.	5.70	0.00	3.40	0.00	5.00	2.40	17.40	0.00	33.90
AZCAPOTZALCO	8.50	0.00	0.00	0.00	7.50	0.00	29.10	0.00	45.10
VENUSTIANO CARRANZA	12.70	0.00	0.00	4.00	11.10	7.80	12.90	0.00	48.50
CUAUHTEMOC	2.90	0.00	0.00	6.10	14.10	0.00	28.50	0.00	51.60
GUSTAVO A. MADERO	44.00	0.00	0.00	0.00	16.90	0.00	40.80	12.40	114.10
CUAJIMALPA	2.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.80
MAGDALENA CONTRERAS	1.70	0.00	0.00	0.00	1.40	0.00	4.20	0.00	7.30
MIGUEL HIDALGO	18.40	0.00	0.00	0.00	7.20	3.50	13.40	0.00	42.50
ALVARO OBREGON	2.60	0.00	0.00	0.00	*	0.00	31.90	0.00	34.50
IZTAPALAPA	28.10	0.00	2.90	0.00	8.20	*	53.10	0.00	92.30
XOCHIMILCO	1.50	0.00	0.00	0.00	9.00	0.00	0.00	0.00	10.50
MILPA ALTA	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90
TLAHUAC.	3.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.20
TOTALES.	158.10	0.70	6.30	10.10	92.10	13.70	275.20	12.40	568.60

* NO DISPONIBLE

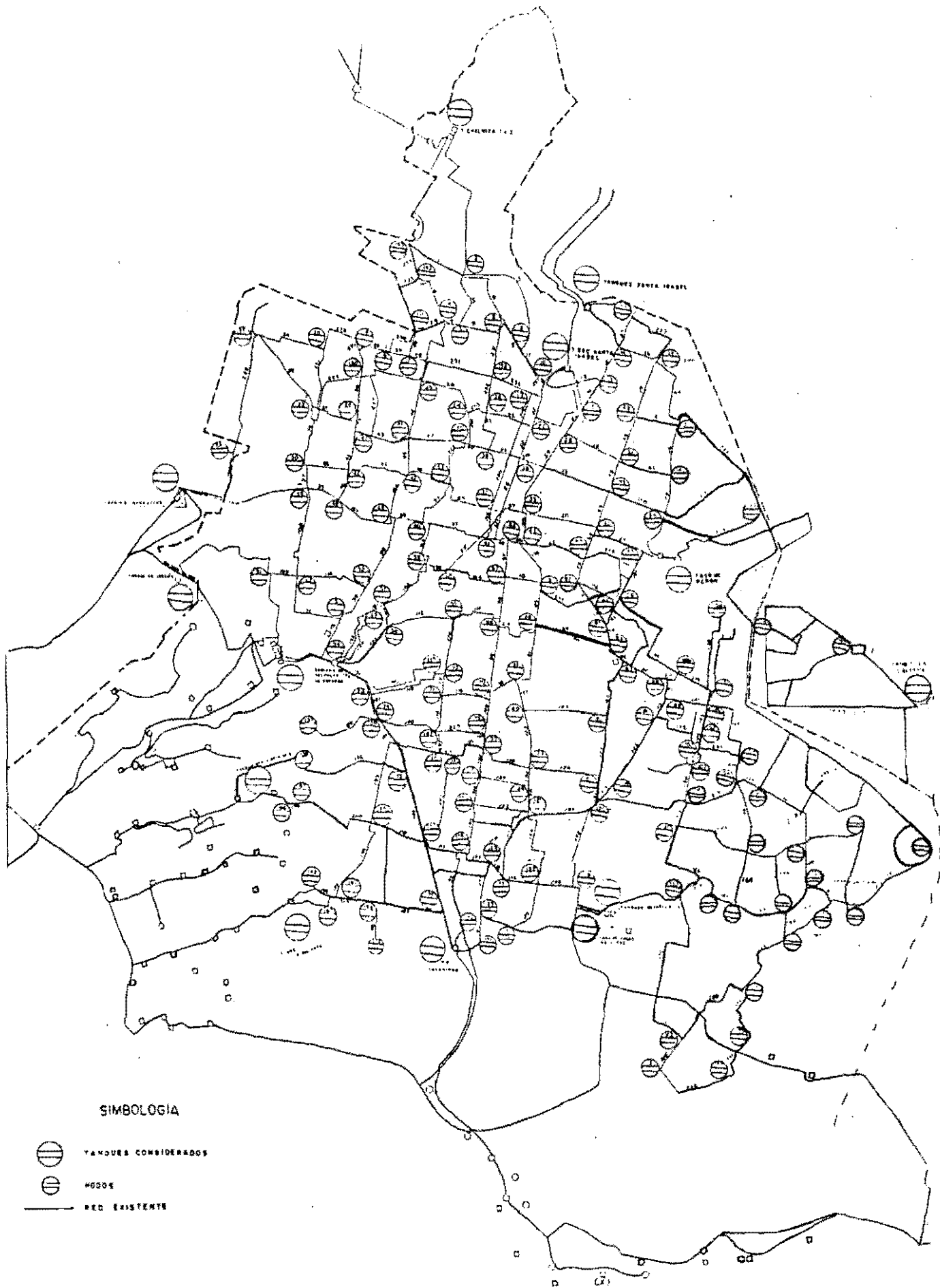


Fig. 9. Modelo hidráulico de la red de distribución primaria de agua potable de la Ciudad de México.

Para generar escenarios de daño aleatorios se trabajó en la obtención de las razones de daño con base en los parámetros ya expuestos en la sección 4.2; los resultados se muestran en la tabla 3.

TABLA 3

NUMERO DE FALLAS PARA EL SISTEMA PRIMARIO DE DISTRIBUCION DE AGUA EN EL DISTRITO FEDERAL (D. F.)

DELEGACION	NUMERO DE FALLAS								TOTAL.
	20	24	30	32	36	42	48	72	
BENITO JUAREZ	0	0	0	0	8	0	2	0	10
COYOACAN.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TLALPAN.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IZTACALCO.	5	0	2	0	1	0	11	0	19
AZCAPOTZALCO	0	0	0	0	1	0	1	0	2
VENUSTIANO CARRANZA	10	0	0	7	16	0	4	0	37
CUAUHTEMOC	4	0	0	8	11	0	9	0	32
GUSTAVO A. MADERO	13	0	0	0	6	0	13	0	32
CUAJIMALPA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MAGDALENA CONTRERAS	*	0	0	0	*	0	*	0	0
MIGUEL HIDALGO	1	0	0	0	0	0	0	0	1
ALVERO OBREGON	0	0	0	0	6	0	2	0	8
IZTAPALAPA	2	0	1	0	1	3	22	0	29
XOCHIMILCO	0	0	0	0	5	0	0	0	5
MILPA ALTA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TLAHOAC.	0	0	0	0	0	0	0	0	0

* INFORMACION INCOMPLETA

Para efectuar el análisis hidráulico de una red de abastecimiento de agua con fugas, fué necesario desarrollar un programa particular que incluyese tanto las modificaciones a los algoritmos existentes para el análisis de redes como los desarrollos de esta investigación. El primer paso en el análisis hidráulico de redes dañadas por sismo consiste en definir los escenarios de fugas : tubos con fugas, intensidad de la fuga dada por el diámetro del orificio y localización del orificio a lo largo del tubo. Esta información se puede proporcionar al programa de manera determinista o bien simularse dentro del programa, en cuyo caso será necesario proporcionar las tasas de daño consideradas. Una descripción global de la estructura del programa se presenta a continuación.

Para llevar a cabo el análisis hidráulico de una red dañada se deben realizar los siguientes procedimientos previos a la ejecución del mismo: determinación del número de tuberías que constituyen la red, número de tubos rotos, número de nodos, número de tanques, bombas, válvulas (si existen), coeficientes de razón de daño para los tubos, es decir, crear los distintos escenarios que se desean estudiar. El programa puede simular varios escenarios de daños de acuerdo a los requerimientos del usuario; el número de simulaciones se define dentro del programa principal.

Inicialmente se requiere la información básica para la ejecución y se abren todos los archivos requeridos. Una síntesis de los procedimientos que desarrolla el programa es :

- Lectura de datos de la red. Este archivo contiene información sobre el número y características de las tuberías, el número de nodos, número de iteraciones, la tolerancia en la precisión, número y características de válvulas, tanques, bombas, etc. Para las tuberías se les define la conectividad, el estado en que van a funcionar que puede ser : abierta, cerrada, o abierta con la opción de válvula check. Para los nodos se define la demanda, la elevación y las tuberías que inciden a él.

- Escritura de datos y resultados. En este procedimiento se reescriben los datos de entrada y luego la solución hidráulica por cada simulación de daño y por cada iteración de eliminación de presiones negativas o reducción de demandas en nudos. Escribe los gastos, pérdidas, velocidades y alturas piezométricas en cada tubería; para cada nudo escribe la demanda final satisfecha, las alturas piezométricas totales, la elevación y la presión.

- Lectura del escenario de daño. Si se seleccionó ejecutar un escenario proporcionado por el usuario, se lee un archivo que contiene el número que corresponde a cada tubería rota, el diámetro

del orificio y la posición del mismo.

- Lectura de la razón básica de daño por Delegación, especificándose además la delegación a que corresponde cada tubería. Su nombre se define tomando el nombre general. Este archivo se abre sólo si el escenario de daños seleccionado es aleatorio.

- En el análisis hidráulico se realiza todo el análisis de la red. El programa originalmente desarrollado por Wood (ref.11) calcula el flujo por medio de ecuaciones de circuito, estableciendo que la sumatoria de pérdidas de la altura hidráulica es igual a cero en cada circuito y que se satisfacen las ecuaciones de continuidad en cada nodo (ecuaciones de conservación de masa para cada intersección de las tuberías). En esta subrutina se mantuvo la estructura de datos del programa de Wood por ser este un estándar en la disciplina; sin embargo, fué necesario sustituir los algoritmos originales de Wood cambiando la formulación por circuitos a una por tuberías que usa las ecuaciones de energía para cada tubería y las ecuaciones de continuidad para cada nodo.

- A su vez se requiere realizar la simulación del escenario de daño si la opción fuera aleatoria o aleatoria con tuberías rotas adicionales proporcionadas por el usuario. Para estimar la distribución espacial del peligro sísmico relacionada con la falla de sistemas de tuberías se creó un módulo en el programa que permite simular por medio de un proceso de Poisson los escenarios de tuberías con fugas correspondientes a las razones de daño proporcionadas por el usuario. Esta subrutina crea un tubo con fuga con el artificio que se presentó con anterioridad.

- Los cálculos se continúan hasta que el error relativo sea menor que 0.005, esta precisión se define como la suma de los flujos en valor absoluto de las últimas dos pruebas dividido por la suma absoluta de los flujos, esto es :

$$e_r = \frac{Q - Q_1}{Q} < 0.005$$

EC.12.

Uno de los principales problemas que se encontró en la solución hidráulica de este sistema de abastecimiento de agua potable con elementos dañados fué la presencia de presiones negativas que no obedecen a una realidad del funcionamiento del sistema. Las redes de abastecimiento de agua deben ser diseñadas a fin de que el agua esté repartida en cada nodo en suficiente cantidad y presión para atender la demanda; si el sistema presenta daños, este comportamiento se vé drásticamente alterado; la principal dificultad ocurre al aparecer presiones negativas considerables que se presentan cuando la demanda asignada al nudo no puede ser satisfecha con presión positiva o bien cuando, aún con demanda cero, la línea del gradiente hidráulico pasa por debajo de la elevación del nodo.

Cabe aclarar que el análisis hidráulico de una red dañada es más complejo que el cálculo de una red sin daños porque ya el problema se convierte en un problema altamente no lineal.



DEPEI

6. RESULTADOS OBTENIDOS.

En base a las tablas mencionadas en el capítulo 5 se pudo obtener los coeficientes de razón de daño para cada zona de suelo correspondiente al Distrito Federal como se muestra a continuación en la tabla 4.

Tabla 4. Razon de daño para las distintas zonas de suelo en el Distrito Federal.

ZONA.	# REP / KM.
LOMAS (I).	0.01
TRANSICION (II).	0.07
LAGO (III).	0.45

Así mismo, se obtuvo un resumen general de los daños estadísticos a que fué sometida la red primaria de distribución de agua potable de la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre 1985, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Resumen de daño estadísticos para la red primaria de distribución de agua en el Distrito Federal.

DIAMETRO	LONGITUD	REPARACIONES	RAZON DAÑO	% REPARAC.	% LONGIT
20.00	158.10	35.00	0.221	20.00	28.46
24.00	-	-	-	-	-
30.00	6.30	3.00	0.476	1.71	1.13
32.00	10.10	15.00	1.485	8.57	1.82
36.00	92.10	55.00	0.597	31.43	16.58
42.00	13.70	3.00	0.219	1.71	2.47
48.00	275.20	64.00	0.233	36.57	49.54
72.00	-	-	-	-	-
TOTALES	555.50	175.00	0.32	100.00	100.00

De la misma manera se pudieron obtener los coeficientes de razón de daño para cada una de las delegaciones que conforman el Distrito Federal, con el objeto que se puedan hacer estimaciones de daños de acuerdo a las zonas y poder determinar los pasos a seguir después de un evento sísmico; estos coeficientes se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Razón de daño por Delegación para la red de distribución primaria de agua potable de la Ciudad de México.

DELEGACION	RAZON DE DAÑO (# fugas/km)
BENITO JUAREZ	0.249
COYOACAN	0.026*
TLALPAN	0.435*
IZTACALCO	0.560
AZCAPOTZALCO	0.044
VENUSTIANO CARRANZA	0.763
CUAHUTEMOC	0.620
GUSTAVO MADERO	0.280
CUAJIMALPA	0.357*
MAGDALENA CONTRERAS	0.137*
MIGUEL HIDALGO	0.024
ALVARO OBREGON	0.232
IZTAPALAPA	0.314
XOCHIMILCO	0.476
MILPA ALTA	0.221*
TLAHUAC	0.313*

* En estas delegaciones no se presentaron fallas, pero para poder encontrar una razón de daños se les asignó una falla de manera que los resultados fuesen conservadores.

Para la determinación de los coeficientes de razón de daño de las tuberías se tuvo que determinar en qué delegación y zona sísmica se encontraban para poder asignarles los valores corres-

pendientes y así obtener sus coeficientes de razón de daño; para esto se tuvo que crear la tabla 7, la cual nos muestra alguna de las características de las tuberías como son: diámetro, Delegación a la que distribuyen agua potable y zona de suelo en la cual se encuentran ubicadas.

Tabla 7. Tuberías que conforman la red de distribución primaria de agua potable del Distrito Federal (características).

TUBO No	DIAM. pulg.	DELEG.	ZONA	TUBO No	DIAM. pulg.	DELEG.	ZONA	TUBO No	DIAM. pulg.	DELEG.	ZONA
1	30	G.MADERO	II	26	48	G.MADERO	III	51	48	G.MADERO	III
2	36	G.MADERO	III	27	48	AZCAPOTZALCO	II	52	36	G.MADERO	III
3	36	G.MADERO	II	28	48	G.MADERO	II	53	48	G.MADERO	III
4	30	G.MADERO	III	29	48	AZCAPOTZALCO	II	54	48	CUAHUTEMOC	III
5	48	G.MADERO	II	30	48	AZCAPOTZALCO	II	55	48	CUAHUTEMOC	III
6	72	G.MADERO	II	31	36	AZCAPOTZALCO	II	56	48	V.CARRANZA	III
7	48	G.MADERO	II	32	48	COYOACAN	II	57	48	V.CARRANZA	III
8	48	G.MADERO	II	33	20	COYOACAN	II	58	48	G.MADERO	III
9	48	G.MADERO	II	34	48	AZCAPOTZALCO	II	59	48	G.MADERO	III
10	36	V.CARRANZA	III	35	48	AZCAPOTZALCO	II	60	48	V.CARRANZA	III
11	30	G.MADERO	III	36	36	AZCAPOTZALCO	II	61	30	G.MADERO	III
12	30	CUAHUTEMOC	III	37	36	M.HIDALGO	II	62	30	V.CARRANZA	III
13	48	G.MADERO	III	38	48	AZCAPOTZALCO	II	63	48	V.CARRANZA	III
14	48	G.MADERO	III	39	36	M.HIDALGO	II	64	20	G.MADERO	III
15	48	G.MADERO	II	40	48	M.HIDALGO	II	65	48	V.CARRANZA	III
16	20	G.MADERO	III	41	48	AZCAPOTZALCO	II	66	30	G.MADERO	III
17	48	G.MADERO	III	42	48	AZCAPOTZALCO	II	67	30	V.CARRANZA	III
18	48	G.MADERO	III	43	36	AZCAPOTZALCO	II	68	30	V.CARRANZA	III
19	48	G.MADERO	III	44	48	AZCAPOTZALCO	II	69	36	V.CARRANZA	III
20	48	G.MADERO	III	45	48	AZCAPOTZALCO	II	70	30	B.JUAREZ	III
21	48	G.MADERO	III	46	48	AZCAPOTZALCO	II	71	30	M.HIDALGO	II
22	36	G.MADERO	III	47	36	AZCAPOTZALCO	II	72	20	G.MADERO	II
23	48	G.MADERO	II	48	48	CUAHUTEMOC	III	73	30	G.MADERO	III
24	36	G.MADERO	III	49	36	G.MADERO	III	74	20	V.CARRANZA	III
25	48	AZCAPOTZALCO	II	50	36	G.MADERO	III	75	48	V.CARRANZA	III

Tabla 7. Tuberías que conforman la red de distribución primaria de agua potable del Distrito Federal (características).
Continuación

TUBO No	DIAM. pulg.	DELEG.	ZONA	TUBO No	DIAM. pulg.	DELEG.	ZONA	TUBO No	DIAM. pulg.	DELEG.	ZONA
76	20	V.CARRANZA	III	111	36	CUAHUTEMOC	III	146	48	IZTAPALAPA	III
77	32	V.CARRANZA	III	112	36	CUAHUTEMOC	III	147	48	IZTAPALAPA	III
78	48	V.CARRANZA	III	113	36	CUAHUTEMOC	III	148	20	IZTAPALAPA	III
79	32	V.CARRANZA	III	114	48	B.JUAREZ	II	149	48	IZTAPALAPA	III
80	48	IZTACALCO	III	115	20	XOCHIMILCO	III	150	36	G.MADERO	III
81	48	IZTAPALAPA	III	116	36	B.JUAREZ	III	151	48	IZTAPALAPA	III
82	48	IZTACALCO	III	117	48	B.JUAREZ	II	152	48	IZTAPALAPA	III
83	48	V.CARRANZA	III	118	36	B.JUAREZ	III	153	20	IZTAPALAPA	III
84	36	V.CARRANZA	III	119	48	B.JUAREZ	II	154	48	IZTAPALAPA	III
85	48	V.CARRANZA	III	120	20	B.JUAREZ	II	155	48	IZTAPALAPA	III
86	32	V.CARRANZA	III	121	48	B.JUAREZ	II	156	48	IZTAPALAPA	III
87	36	V.CARRANZA	III	122	48	IZTACALCO	III	157	48	IZTAPALAPA	III
88	36	V.CARRANZA	III	123	36	IZTACALCO	III	158	48	IZTAPALAPA	III
89	36	B.JUAREZ	III	124	36	IZTACALCO	III	159	48	IZTAPALAPA	III
90	48	IZTACALCO	III	125	36	IZTAPALAPA	III	160	48	TLAHUAC	III
91	48	IZTACALCO	III	126	36	IZTAPALAPA	III	161	48	IZTAPALAPA	III
92	32	V.CARRANZA	III	127	48	IZTAPALAPA	III	162	48	IZTAPALAPA	III
93	32	CUAHUTEMOC	III	128	36	IZTAPALAPA	III	163	48	IZTAPALAPA	III
94	48	CUAHUTEMOC	III	129	48	IZTACALCO	III	164	48	IZTAPALAPA	III
95	48	CUAHUTEMOC	III	130	36	B.JUAREZ	III	165	48	IZTAPALAPA	III
96	36	CUAHUTEMOC	III	131	20	B.JUAREZ	III	166	48	IZTAPALAPA	III
97	48	G.MADERO	III	132	48	IZTAPALAPA	III	167	48	IZTAPALAPA	III
98	36	CUAHUTEMOC	III	133	20	IZTAPALAPA	III	168	48	IZTAPALAPA	III
99	36	CUAHUTEMOC	III	134	48	IZTAPALAPA	III	169	48	TLAHUAC	III
100	20	COYOACAN	II	135	20	IZTAPALAPA	III	170	48	IZTAPALAPA	III
101	48	CUAHUTEMOC	III	136	20	IZTAPALAPA	III	171	20	TLAHUAC	III
102	48	CUAHUTEMOC	III	137	36	IZTAPALAPA	III	172	48	IZTAPALAPA	III
103	20	CUAHUTEMOC	III	138	48	COYOACAN	II	173	48	IZTAPALAPA	III
104	36	CUAHUTEMOC	III	139	48	IZTAPALAPA	III	174	48	IZTAPALAPA	III
105	48	V.CARRANZA	III	140	48	IZTAPALAPA	III	175	20	COYOACAN	II
106	48	CUAHUTEMOC	III	141	48	IZTAPALAPA	III	176	48	COYOACAN	II
107	36	M.HIDALGO	II	142	48	IZTAPALAPA	III	177	36	COYOACAN	III
108	20	M.HIDALGO	II	143	20	IZTAPALAPA	III	178	48	COYOACAN	II
109	20	CUAJIMALPA	II	144	48	IZTAPALAPA	III	179	48	COYOACAN	II
110	20	M.HIDALGO	II	145	48	IZTAPALAPA	III	180	48	COYOACAN	III

Tabla 7. Tuberías que conforman la red de distribución primaria de agua potable del Distrito Federal (características).
Continuación

TUBO No	DIAM pulg.	DELEG.	ZONA	TUBO No	DIAM pulg.	DELEG.	ZONA	TUBO No	DIAM pulg.	DELEG.	ZONA
181	32	V.CARRANZA	III	212	36	B.JUAREZ	III	243	20	V.CARRANZA	III
182	48	COYOACAN	II	213	48	IZTAPALAPA	III	244	20	V.CARRANZA	III
183	48	COYOACAN	II	214	48	V.CARRANZA	III	245	48	G.MADERO	III
184	48	COYOACAN	II	215	20	IZTAPALAPA	III	246	20	B.JUAREZ	II
185	48	COYOACAN	II	216	48	IZTAPALAPA	III	247	20	AZCAPOTZALCO	II
186	48	COYOACAN	II	217	48	IZTAPALAPA	III	248	20	G.MADERO	III
187	48	B.JUAREZ	II	218	20	IZTAPALAPA	III	249	20	G.MADERO	III
188	20	B.JUAREZ	II	219	48	IZTAPALAPA	III	250	20	V.CARRANZA	III
189	36	B.JUAREZ	III	220	48	AZCAPOTZALCO	II	251	20	CUAHUTEMOC	III
190	36	COYOACAN	III	221	48	AZCAPOTZALCO	II	252	48	IZTAPALAPA	III
191	48	B.JUAREZ	II	222	48	CUAHUTEMOC	III	253	48	IZTAPALAPA	III
192	48	B.JUAREZ	II	223	20	B.JUAREZ	II	254	36	IZTAPALAPA	III
193	36	B.JUAREZ	III	224	48	TLAHUAC	III	255	48	COYOACAN	II
194	48	CUAHUTEMOC	III	225	48	IZTAPALAPA	III	256	48	B.JUAREZ	II
195	48	B.JUAREZ	II	226	36	O.MADERO	III	257	48	COYOACAN	II
196	20	B.JUAREZ	II	227	48	G.MADERO	III	258	48	COYOACAN	II
197	20	M.CONTRERAS	I	228	48	AZCAPOTZALCO	II	259	48	A.OBREGON	II
198	48	M.CONTRERAS	I	229	20	AZCAPOTZALCO	II	260	20	A.OBREGON	I
199	32	V.CARRANZA	III	230	48	AZCAPOTZALCO	II	261	36	M.CONTRERAS	I
200	48	A.OBREGON	I	231	20	G.MADERO	III	262	20	M.HIDALGO	II
201	48	COYOACAN	II	232	48	G.MADERO	III	263	20	M.HIDALGO	II
202	48	IZTAPALAPA	III	233	20	G.MADERO	III	264	48	M.HIDALGO	II
203	36	G.MADERO	III	234	72	G.MADERO	II	265	48	M.HIDALGO	II
204	36	V.CARRANZA	III	235	48	AZCAPOTZALCO	II	266	72	G.MADERO	II
205	48	G.MADERO	III	236	20	G.MADERO	III	267	72	G.MADERO	II
206	36	V.CARRANZA	III	237	48	G.MADERO	III	268	20	G.MADERO	III
207	36	IZTAPALAPA	III	238	48	IZTAPALAPA	III	269	48	G.MADERO	III
208	20	IZTAPALAPA	III	239	48	IZTAPALAPA	III	270	48	G.MADERO	III
209	20	IZTAPALAPA	III	240	20	IZTAPALAPA	III	271	20	G.MADERO	III
210	36	V.CARRANZA	III	241	20	TLAHUAC	III	272	20	V.CARRANZA	III
211	36	IZTAPALAPA	III	242	20	XOCHIMILCO	III	273	32	V.CARRANZA	III
								274	48	G.MADERO	III

De igual forma que para las Delegaciones, también se pudieron obtener los coeficientes de razón de daño para cada tubería en particular, como se muestra a continuación en la tabla 8; estos coeficientes nos servirán para poder realizar simulaciones sobre los distintos escenarios de daños que se pueden presentar en la Ciudad de México a través del programa de análisis que se está empleando. De acuerdo a los resultados obtenidos por el mismo se tomarán las medidas y precauciones necesarias a seguir en el futuro.

Tabla 8. Coeficientes de razón de daño en # rep/km para la red primaria de agua potable de la Ciudad de México.

TUBO #	# REP/KM	TUBO #	# REP/KM	TUBO #	# REP/KM	TUBO #	# REP/KM
1	0.30	25	0.03	49	0.36	73	0.30
2	0.36	26	0.32	50	0.36	74	0.79
3	0.36	27	0.03	51	0.32	75	0.31
4	0.30	28	0.32	52	0.36	76	0.79
5	0.32	29	0.03	53	0.32	77	0.76
6	0.28	30	0.03	54	0.32	78	0.31
7	0.32	31	0.13	55	0.32	79	0.76
8	0.32	32	0.05	56	0.31	80	0.63
9	0.32	33	0.07	57	0.31	81	0.41
10	0.76	34	0.03	58	0.32	82	0.63
11	0.30	35	0.03	59	0.32	83	0.31
12	0.62	36	0.13	60	0.31	84	0.76
13	0.32	37	0.14	61	0.30	85	0.31
14	0.32	38	0.03	62	0.79	86	0.76
15	0.32	39	0.14	63	0.31	87	0.76
16	0.30	40	0.07	64	0.30	88	0.76
17	0.32	41	0.03	65	0.31	89	0.25
18	0.32	42	0.03	66	0.30	90	0.63
19	0.32	43	0.13	67	0.79	91	0.63
20	0.32	44	0.03	68	0.79	92	0.76
21	0.32	45	0.03	69	0.76	93	0.62
22	0.36	46	0.03	70	0.25	94	0.32
23	0.32	47	0.13	71	0.05	95	0.32
24	0.36	48	0.32	72	0.30	96	0.78

Tabla 8. Coeficientes de razón de daño en # rep/km para la red primaria de agua potable de la Ciudad de México.
Continuación

TUBO #	# REP/KM	TUBO #	# REP/KM	TUBO #	# REP/KM	TUBO #	# REP/KM
97	0.32	131	0.11	165	0.41	199	0.76
98	0.62	132	0.41	166	0.41	200	0.06
99	0.62	133	0.07	167	0.41	201	0.05
100	0.07	134	0.41	168	0.41	202	0.41
101	0.32	135	0.07	169	0.31	203	0.36
102	0.32	136	0.07	170	0.41	204	0.76
103	0.62	137	0.12	171	0.31	205	0.32
104	0.62	138	0.05	172	0.41	206	0.76
105	0.31	139	0.41	173	0.41	207	0.12
106	0.32	140	0.41	174	0.41	208	0.07
107	0.14	141	0.41	175	0.07	209	0.07
108	0.05	142	0.41	176	0.05	210	0.76
109	0.05	143	0.07	177	0.30	211	0.12
110	0.05	144	0.41	178	0.05	212	0.25
111	0.62	145	0.41	179	0.05	213	0.41
112	0.62	146	0.41	180	0.05	214	0.31
113	0.62	147	0.41	181	0.76	215	0.07
114	0.09	148	0.07	182	0.05	216	0.41
115	0.67	149	0.41	183	0.05	217	0.41
116	0.25	150	0.36	184	0.05	218	0.07
117	0.09	151	0.41	185	0.05	219	0.41
118	0.25	152	0.41	186	0.05	220	0.03
119	0.09	153	0.07	187	0.09	221	0.03
120	0.11	154	0.41	188	0.11	222	0.32
121	0.09	155	0.41	189	0.95	223	0.11
122	0.63	156	0.41	190	0.30	224	0.31
123	0.20	157	0.41	191	0.09	225	0.41
124	0.20	158	0.41	192	0.09	226	0.36
125	0.12	159	0.41	193	0.25	227	0.32
126	0.12	160	0.31	194	0.32	228	0.03
127	0.41	161	0.41	195	0.09	229	0.12
128	0.12	162	0.41	196	0.11	230	0.03
129	0.63	163	0.41	197	0.07	231	0.30
130	0.25	164	0.41	198	0.06	232	0.32

Tabla 8. Coeficientes de razón de daño en # rep/km para la red primaria de agua potable de la Ciudad de México.
Continuación

TUBO #	# REP/KM	TUBO #	# REP/KM	TUBO #	# REP/KM	TUBO #	# REP/KM
233	0.30	244	0.79	255	0.05	266	0.08
234	0.08	245	0.32	256	0.09	267	0.08
235	0.03	246	0.11	257	0.05	268	0.30
236	0.30	247	0.12	258	0.05	269	0.32
237	0.32	248	0.30	259	0.06	270	0.32
238	0.41	249	0.30	260	0.06	271	0.30
239	0.41	250	0.79	261	0.06	272	0.79
240	0.12	251	0.62	262	0.05	273	0.76
241	0.31	252	0.41	263	0.05	274	0.32
242	0.67	253	0.41	264	0.07		
243	0.79	254	0.12	265	0.07		

De acuerdo a los datos presentados en las tablas 5 y 8 se puede observar que las tuberías que más daños sufrieron fueron las tuberías de tamaño mediano que conforman la red, entendiéndose como tal aquellas tuberías con diámetros mayor o igual a 30" y menores o iguales a 36 "; en las tuberías pequeñas, aquellas con diámetros menores de 30 " y mayores o iguales a 20 " y en las tuberías grandes, aquellas con diámetros mayores a 36", el daño fué de poca consideración.

En resumen, se puede decir que la investigación que se reporta en este trabajo alcanzó los siguientes objetivos :

- Desarrollo de la parte probabilista para la definición del escenario de daño para diferentes intensidades sísmicas.
- Obtención de los coeficientes de razón de daño para la simulación de escenarios de daños de acuerdo a los criterios que se han establecido. A partir de estos se podran crear planes de operación para maximizar el funcionamiento de la red ante un fenómeno inesperado.

7. CONCLUSIONES.

Debido a la distribución espacial del daño causado por el sismo del 19 de septiembre de 1985 a la red de distribución primaria de agua potable de la Ciudad de México y a los coeficientes de razón de daño obtenidos en este trabajo podemos concluir :

a) Las tuberías son más vulnerables a los efectos de los sismos cuando están enterradas en suelos blandos. Una razón es que las tuberías en tales condiciones experimentan mayores deformaciones antes, durante y después de un sismo.

b) La corrosión interna y externa que produce el sismo en las tuberías enterradas debido a las fugas, hacen que éstas cambien su comportamiento antes, durante y después de un acontecimiento similar, cambiando el funcionamiento general de la red. Por lo que esto incrementa la complejidad del análisis de una red con daños.

c) Nótese que los coeficientes de razón de daño que tuvieron índices mayores se encontraron en la zona del lago (0.763 # fugas/km) lo cual nos corrobora que es en esta zona, así como también en la zona de transición (0.435 # fugas/km) donde mayor índice de daños se presentan en la red, mientras que en la zona de lomas los índices encontrados fueron sumamente bajos (0.024 # fugas/km), sucediendo lo mismo que en las estructuras de edificios. Cabe aclarar que estos coeficientes son correspondientes a las Delegaciones del Distrito Federal, que son diferentes a los encontrados para los distintos tipos de suelo de la Ciudad de México mostrados en la tabla 4.

d) Con base en las simulaciones que se realicen a futuro se podrá realizar un programa que maneje la parte gráfica de una red de distribución de agua de la magnitud de la Ciudad de México. Esto es necesario para poder manejar toda la información relacionada con el proceso de solución y rápidamente poder detectar las zonas aisladas del sistema de abastecimiento y experimentar con medidas de operación que aumenten su serviciabilidad.

e) Con base en los resultados finales de las simulaciones, se pueden preparar curvas de fragilidad que relacionen el porcentaje de la demanda satisfecha contra la intensidad sísmica. De igual manera preparar mapas que muestren las zonas probables en las que la demanda no será satisfecha o zonas que permanezcan aisladas de flujo en caso de presentarse un evento sísmico de intensidad dada.

f) Por último, podemos afirmar que la red de distribución primaria de agua potable de la Ciudad de México es altamente vulnerable a sufrir daño después de un sismo, y esto afecta grandemente a la serviciabilidad de la misma.

8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Rascón, O.A. y Muñoz, C., "Análisis sísmico de tuberías enterradas", Instituto de Ingeniería, N° 494, México, Nov.1985.
- 2.- Flores, B.R. "El efecto de los sismos en las tuberías subterráneas para agua potable", Revista de Ingeniería, Colegio de Ingenieros Civiles, Noviembre-Diciembre 1985.
- 3.- Ayala, G. y Rascón O.A., "Evaluación sísmica del acueducto dañado durante el sismo del 14 de Marzo de 1979", Ingeniería Sísmica, N° 21, México, Agosto 1980.
- 4.- Gelman, O., Sierra, G. y otros., "Organización y Planeación para la salvaguarda del sistema de acueductos del sur oriente de la Ciudad de México", Volumen 3, Informe a la DGCOH del D.D.F, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1989.
- 5.- Newmark, N.M. y Rosenblueth, E., "Fundamentos de Ingeniería Sísmica", Editorial Diana, México 1978.
- 6.- Kuesel, T.R., "Earthquake Design Criteria for Subways", Jnl of the structural división, ASCE, Junio 1979.
- 7.- O'Rourke, M. y Wang, L.R.L., "Seismic Vulnerability, Behavior and Design of Underground Piping Systems II", Resnsselaer Polytechnic Institute", Julio 1981.
- 8.- Hindy, A. y Novark, M., "Earthquake Response of Underground

Pipelines", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 7, 451-476 (1979).

- 9.- Kubo, K., "Behavior of Underground Water Pipes During an Earthquake", Fifth world conference on earthquake engineering, Roma 1979.
 - 10.- Ayala, G. y O'Rourke, M.J., "Effects of the 1985 Michoacan Earthquake on Water Systems and other burier Lifelines in Mexico", Tecnical Report NCEER-89-0009, State University of New York at Buffalo, Marzo 1989.
 - 11.- Ayala, G., Correa, M. y López, J. "Vulnerabilidad y servicia-bilidad de los sistemas de distribución de agua ante sismos", Informe presentado al CONACYT, Proyecto 0741 del Instituto de Ingeniería, Octubre 1992.
 - 12.- Brater, E. y King, H., "Handbook of Hydraulics", McGraw-Hill Book Company, sexta edición 1976, pp. 4-1,4-38.
 - 13.- Russell, G., "Hydraulics", Ed. Holt, Rinehart y Winston, Quinta edición 1965, pp. 103-179.
 - 14.- Wood, J., "Computer Analysis of Flow in Pipe Networks Including Extended Period Simulations", University of Kentucky, Kentucky, 1980.
- * ASCE, "Advisory Notes on Lifeline Earthquake Engineering"; Technical Comittees of the ASCE Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, 1983.
- * ASCE, "Lifeline Seismic Risk Analysis-case studies", Proceedings of the Session Sponsored by the Technical Council of Lifeline Earthquake Engineering of the ASCE, April 1986.