

TESIS DEFENDIDA POR
Ena del Carmen Gámez Balmaceda
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

MC. José Guadalupe Acosta Chang
Director del Comité

MC. Luis Humberto Mendoza
Garcilazo
Miembro del Comité

MC. José Douglas Frez Cárdenas
Miembro del Comité

MC. Moisés Castro Delgado
Miembro del Comité

MC. Francisco Suárez Vidal
Miembro del Comité

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar

*Coordinador del programa de
posgrado en Ciencias de la Tierra*

Dr. David Hilario Covarrubias
Rosales

Director de Estudios de Posgrado

27 de noviembre de 2008

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**SISMOTECTÓNICA Y EFECTOS DE SITIO EN LA EVALUACIÓN DE LA
RESPUESTA SÍSMICA EN MEXICALI, BAJA CALIFORNIA**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

ENA DEL CARMEN GÁMEZ BALMACEDA

Ensenada, Baja California, México, noviembre de 2008.

RESUMEN de la tesis de **Ena del Carmen Gámez Balmaceda**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA con orientación en SISMOLOGÍA. Ensenada, Baja California, noviembre de 2008.

SISMOTECTÓNICA Y EFECTOS DE SITIO EN LA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA EN MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

Resumen aprobado por:

MC. José Guadalupe Acosta Chang
Director de Tesis

La ciudad de Mexicali, Baja California, México, se encuentra sujeta a un elevado peligro sísmico como consecuencia de su posición en la zona de interacción de las placas Pacífico y Norteamérica. En este trabajo se aplicaron métodos empíricos para evaluar la respuesta sísmica de los suelos y de las estructuras críticas y estratégicas en la ciudad de Mexicali, durante la ocurrencia de los dos terremotos fuertes con mayor probabilidad de ocurrir dentro de los próximos 50 años: $M_w=6.5$ en la falla Imperial y $M_w=6.5$ en la falla Cerro Prieto, de acuerdo a Anderson y Bodin (1987). Los resultados incluyen: 1) La microzonificación de la respuesta sísmica con métodos de ecuaciones empíricas predictivas, expresada en mapas con los valores pico de la aceleración y velocidad del suelo y del espectro de respuesta de seudovelocidad y pseudoaceleración, así como de isosistas. 2) La estimación de los daños para un conjunto de estructuras críticas y estratégicas, mediante el método de matrices de vulnerabilidad (ATC-13, 1985). 3) La estimación de la seguridad sísmica de un subconjunto de estructuras importantes con el método de inspección visual rápida (FEMA-154, 2002).

El efecto de sitio fue incorporado mediante la velocidad de propagación de ondas de corte en los primeros 30 m del subsuelo, determinada mediante inversión de ondas superficiales. El escenario para los terremotos propuestos presenta intensidades IMM entre VI y IX para el área de Mexicali, con la mayor parte de la ciudad sometida a intensidades entre VIII y IX. La estimación de daños de las 88 estructuras analizadas resultó en 18 estructuras sin daños, 12 con daños ligeros, 53 con daños moderados, 4 con daños fuertes y 1 con daños mayores. Estos escenarios de daños pueden ser utilizados para delinear programas efectivos de reducción del riesgo sísmico urbano, para la educación y concientización de la comunidad y sus líderes, y para preparar planes y ejercicios de respuesta a la emergencia.

Palabras clave: riesgo sísmico, escenario, estructuras críticas, Mexicali.

ABSTRACT of the thesis presented by **Ena del Carmen Gámez Balmaceda** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in EARTH SCIENCES with orientation in SEISMOLOGY. Ensenada, Baja California, México, November 2008.

SEISMO-TECTONIC AND SITE EFFECTS IN THE ASSESSMENT OF THE SEISMIC RESPONSE IN MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

The city of Mexicali in Baja California, Mexico, is exposed to high seismic hazard due to its location on the region of interaction between the Pacific and North-American Plates. Applying empirical methods, this study evaluates the seismic response of ground and the damage to critical structures in Mexicali. Two major earthquakes with high probability of occurrence in the next 50 years (Anderson & Bodin, 1987) were adopted to prepare seismic scenarios: a $M_w=6.5$ earthquake at the Imperial Fault, and a $M_w=6.5$ earthquake at the Cerro Prieto Fault. The results include: 1) Spatial distribution of ground peak acceleration, velocity, and response spectra, and isoseismal maps, calculated using empirical predictive equations, 2) Expected damage for a group of critical structures, calculated by applying vulnerability relations proposed by the ATC-13 (1985), and 3) Seismic safety factors for a sample of critical structures, estimated through a rapid visual screening method (FEMA-154, 2002).

The representative value of shear wave velocity for the top 30 m, determined through surface waves inversion, was utilized to incorporate local site effects. The resulting IMM intensities ranged from VI to IX in the study region, with most of the urban area subjected to intensities of VIII and IX. The estimated damage for the 88 critical structures analyzed included: 18 with no damage, 12 with light damage, 53 with moderate damage, 4 with severe damage and 1 with major damage. Earthquake damage scenarios can be used to delineate effective programs for urban earthquake risk reduction, to educate and raise awareness of the community and its leaders, and to prepare contingency plans and simulation exercises based on a clear understanding of probable damages.

Keywords: Seismic risk, damage scenarios, critical structures, lifelines, Mexicali.

Dedicatorias

Dedico este trabajo a mi fiel amigo Jesucristo que me ha acompañado siempre y me ha iluminado el camino para seguir adelante.

A mis padres Bayardo Gámez y Ena Balmaceda, correspondiendo a su amor, a ellos que me apoyan siempre en mis ideales, confían en mí y se alegran con mis logros.

A mis hermanos, Bayardo Gámez y Carmen Gámez como muestra de mi amor por ellos, y agradeciendo su confianza y apoyo.

A todos mis sobrinitos: Jenny Hernández, José Esteban Chávez, Kelly Gámez, Karolina Gámez, Alejandra Gámez, Dérek Gámez, Alejandra Gámez, Leonardo Gámez y a mi hermano Harry Gámez, para que crezcan siempre con la confianza que todo se puede lograr con fe y esfuerzo. Un futuro mejor para ellos y para el país está al alcance de sus manos. Solo necesitan desear ese futuro y luchar por él.

A la memoria de mi querida hermana Karla Elizabeth, que cada día está presente en mi vida y me anima a seguir adelante.

A mi abuelita Miriam por su amor, apoyo y confianza en mí.

Finalmente quiero dedicar este trabajo con el corazón a mi gran amigo del alma Carlos Villacís, que posee un corazón inmenso, lleno de bondad. A él que siempre ha confiado en mí, ha hecho posible el que yo alcance esta meta, y ha estado presente en cada día de esta jornada. Para él este trabajo como mi mejor muestra de agradecimiento y la expresión sincera de todo lo que él inspira en mí. Gracias a Dios por todas las personas que a lo largo de mi vida me han ayudado a crecer, a amar, a luchar, a dar lo mejor de mí por los demás, a creer en los cambios que hacen faltan para mejorar el mundo y trabajar para lograrlo. Hay personas que dedican toda su vida a darse a los demás con el deseo de ayudar a ser mejor cada día y construir un mundo mejor, esas personas son el tesoro más valioso que podamos encontrar y yo he encontrado ese tesoro, esa amistad que quisiera conservar toda mi vida e imitar su ejemplo, él es *Carlos Villacís*, le agradezco todo lo que ha hecho por mí.

Agradecimientos.

A Dios por alcanzar esta meta, a mi familia por su apoyo y esfuerzo para que yo llegara al final de este trabajo y a Carlos Villacís por toda su ayuda para que yo alcanzara esta meta.

Agradezco en México:

Al CICESE por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y por las becas que me otorgó a través los proyectos en los que participé.

A mi asesor y amigo MC. José Acosta Chang por su apoyo, confianza, enseñanza, buena dirección, consejos y paciencia en el desarrollo de esta tesis y en los cursos que tomé con él.

A mi sinodal y amigo MC. Luis Mendoza, por haber creído en mí, por toda su ayuda desde siempre en la maestría para que yo culminara esta meta, por su enseñanza, apoyo y buenos consejos para que yo siga adelante y por inspirarme con su ejemplo de persona.

A mis sinodales y amigos: MC. José Frez por su confianza, apoyo, buena enseñanza, paciencia en el desarrollo de esta tesis y cursos y, por darme la oportunidad de trabajar juntos en la elaboración de un artículo sobre sismotectónica en mi país. MC. Francisco Suárez y MC. Moisés Castro por sus consejos y ayuda en la elaboración de esta tesis y cursos.

A todos los profesores de Ciencias de la Tierra por su enseñanza especialmente a: Dr. Antonio Vidal y familia, Dr. Víctor Wong, Dr. Alejandro Nava, MC. Miguel Rodríguez, MC. Juan Madrid, MC. Alejandro Hinojosa, Dr. Carlos Flores, Dra. Margarita López, Dr. Luis Delgado, Dr. Edgardo Cañón, Dr. Isabel Ramírez, Lic. Martha Pedrín y Lic. Norma Herrera.

A todos los técnicos de Ciencias de la Tierra por haberme brindado su ayuda a lo largo de la maestría, especialmente a mis amigos: Ana María Frías, Ernesto Rocha, Rogelio Reyes, Gustavo Arellano, Euclides Ruiz, Susana Álvarez, Miguel Ángel García, Sergio Vásquez, Francisco Farfán y familia, Ignacio Méndez, Luis Inzunza, Luis Orozco, Jesús Oscar Gálvez y Luis Antonio Mendoza. Al personal administrativo de Ciencias de la Tierra por haberme ayudado siempre, especialmente a: Martha Elva Barrera, Ana Rosa Soto, Irma Gabriela Hernández y Enid Morán.

A protección Civil del Estado de Baja California por toda la información brindada y datos que necesitaba para este trabajo, por su ayuda y hospitalidad las veces que fui a campo, muy especialmente a la Arq. Estela Martínez y Ricardo Robles. Así mismo en Protección Civil de Tijuana al MC. Víctor Manuel González por la información y ayuda en SIG sobre datos de Mexicali.

A mis buenas amigas: Rosalía García Arthur por su ayuda, apoyo en todo, su confianza y su amistad incondicional. Catalina López y a su familia por abrirme las puertas de su casa y hacerme sentir parte de su familia, por su amistad, por todo su apoyo y amor. Claudia Rodríguez y familia, Patricia Juárez y familia, Sonia Flores y familia, Cristina García con quienes me tocó compartir casa y parte de mi vida, por su amistad y experiencias. A Betty Dimler, Alba Cofel y Rosario Rodríguez y familia por la buena amistad, cultura que nos une y las experiencias. A todas ellas por abrir su vida y su corazón conmigo y por los inolvidables momentos compartidos.

A mis amigos: Fr. Fernando Rodríguez y Pbro. Jesús Rodríguez, quienes me abrieron su corazón y confianza, sus sabios consejos me ayudaron a superar los tropiezos que he tenido a lo largo que mi estancia en Ensenada, al Dr. Luis Calderón por su amistad, confianza y por brindarme la oportunidad de trabajar en uno de sus proyectos. A mis amigos José Luis, Armando, Orlando, Emiliano, Irwin, Porfirio y a mis compañeros del CICESE por los momentos compartidos. Al grupo de Alianza de Amor de que me han abierto su corazón y comparten este momento conmigo.

Gracias México por todos mis amigos que hicieron que me sintiera en familia, por todas las puertas y corazones que se me han abierto, por todo lo bueno que he aprendido en este país. Mi estancia en Ensenada ha sido mejor de lo que pude haber imaginado.

Agradezco en Nicaragua:

A la hermana Rosario, mi primera guía espiritual, quien sembró principios y valores que me ayudaron mucho a crecer como persona. Al grupo de Movimiento Teresiano de Apostolado, con ellos aprendí a luchar por los sueños. A mis hermanos de comunidad que con sus experiencias y consejos me ayudaron a vivir en cualquier ambiente.

A mi gran amiga Margine García por abrirme las puertas de su casa y su corazón, por su apoyo, acompañamiento, confianza y sobre todo por esta gran amistad de tantos años.

A mis amigos que me han acompañado en toda la maestría: Edgar Somarriba, Aknaton Palacios, Sonia Vega, Mayra Largaespada, Dora Arauz, José Esteban Chávez, Mario Mongalo, Jessenia Montenegro, Byron Silva, Eilleen Cáceres, Dionisio Rodríguez, Manuel Traña, Alvaro Amador, Marisol Echeverría, Vladimir Gutiérrez, Guillermo Chávez, Antonio Álvarez, Angélica Muñoz, Marco Córdoba y Osmara Rodríguez.

CONTENIDO

	Página
Resumen español.....	i
Resumen inglés.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	vi
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	xii
Capítulo I. Introducción.....	1
I.1 Descripción del área de estudio.....	1
I.2 Planteamiento del problema y justificación.....	8
I.3 Objetivos.....	10
I.4 Antecedentes.....	11
Capítulo II. Métodos y datos.....	14
II.1 Geología regional.....	16
II.2 Sismicidad histórica del Valle de Mexicali-Imperial.....	17
II.3 Ecuaciones predictivas.....	23
II.4 Estimación de las intensidades de Mercalli esperadas.....	33
II.5 Estimación de la velocidad de ondas de corte.....	32
II.6 Clasificación de estructuras críticas.....	36
II.7 Funciones de vulnerabilidad.....	41
II.8 Método de inspección visual rápida para la determinación de la seguridad sísmica de las estructuras críticas.....	44
Capítulo III. Procesamiento de datos.....	48
III.1 Medición de velocidades y determinación de las condiciones locales del suelo.....	48
III.2 Cálculo y distribución de la intensidad del movimiento del terreno.....	54
III.3 Aplicación de matrices de vulnerabilidad y cálculo de daños esperados.....	63
III.4 Subcatálogo de estructuras críticas y evaluación de daños.....	68

CONTENIDO (continuación)

	Página
Capítulo IV. Resultados	74
IV.1 Microzonificación de la respuesta sísmica.....	74
IV.2 Daños estimados para las estructuras críticas consideradas en el estudio.....	81
IV.4 Análisis individual de la seguridad sísmica de una muestra de estructuras críticas seleccionadas.....	87
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones	89
Referencias	93
Apéndice A: Tipo de construcción en Mexicali.....	102
Apéndice B: Inspección de estructuras críticas con el método ATC – 21.....	105
Apéndice C: Escala de intensidad sísmica de Mercalli Modificada (IMM).....	117

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.a	Ubicación de la región de estudio dentro de la zona de interacción de las placas del Pacífico y Norteamericana. El cuadro rojo representa el área del marco de tectónico de Baja California (Tomado de Wallace, 1990).	2
1.b	Marco tectónico de la región de Baja California, la estrella representa la ciudad de Mexicali.	3
2	Geología de Mexicali, tomada de INEGI y completada con Gastil (1975).	4
3	Distribución epicentral de la sismicidad con magnitud ≥ 3.0 , reportada por RESNOM para el territorio de México y Caltech para el territorio de EE. UU. Desde 1976 hasta julio de 2008.	6
4	Figura 4. Localizaciones epicentrales de terremotos $M > 5.5$ instrumentales e históricos ocurridos dentro del marco tectónico donde se encuentra el área de estudio. La figura resulta de una actualización del catálogo usado por Frez y González (1991); el que se basó en el Catálogo del Sur de California, el del National Earthquake Information Center, además de relocalizaciones y recopilaciones hechas por Leeds (1979), Doser y Kanamori (1986), y Anderson y Bodin (1987). La estrella indica la ubicación de la ciudad de Mexicali.	7
5	Elementos para la creación de un escenario sísmico. (Villacís y Kaneko, 1994)	16
6	Daño en el canal que atraviesa el Valle Imperial. (Sylvester 1979)	18
7	Colapso de un tanque de agua de 100,000 Gal en el Valle Imperial. (Ulrich, 1941)	18
8	Deslizamiento de 0.76 m en la carretera. (Ulrich, 1941)	18
9	Vías del tren dobladas, cerca de Cucapah México. (Sylvester, 1979)	18
10	a) Distrito de negocios en Imperial, cuatro personas murieron por el colapso de las paredes. b) Colapso de columna soportando un balcón. Norte de Brawley. (Ulrich, 1941)	18
11	Columnas que fallaron en el edificio Imperial County Service en El Centro. (Reagor <i>et al.</i> , 1982)	19

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
12	Localización de las fracturas indicadas en el área este de Mexicali causadas por el terremoto de 1979. Los puntos A hasta E muestran evidencia de fisuras y desplazamientos: A presenta fisuras sobre la vía, B presenta fisuras en una autopista pavimentada y C presenta una fisura y un levantamiento vertical en la acera de un cementerio recién revestido de adoquines en 1979 (Modificado de Vonder, 1982).	20
13	Localización de daños en el sureste de Mexicali causados por el terremoto de 1980. El punto A muestra un desplazamiento vertical en Saltillo, el punto B muestra la fractura más larga encontrada a 2 kilómetros de la planta geotérmica Cerro Prieto. El punto C muestra los daños en las vías del tren y un puente en Pescaderos (Modificado de Sharp, 1982b con información de Suárez <i>et al.</i> , 1982).	22
14	Ilustración del proceso de correlación cruzada realizado con las 24 trazas de un perfil de sensores verticales, con separación constante de 3 m, en el sitio PO3, en la zona urbana de Mexicali.	34
15	Transformación del ensamble de correlaciones mostradas en la figura anterior, al el plano C-T. El polígono blanco encierra a los puntos elegidos como representativos de la dispersión de velocidad de fase para el modo fundamental (modo 0) de las ondas Rayleigh; esa curva se comporta de la manera esperada: velocidades de fase bajas para frecuencias altas, que se incrementan hacia las bajas frecuencias.	35
16	Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de corte, en el sitio PO3. A la izquierda, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha, aparecen las observaciones para la dispersión de velocidad de fase (círculos) y de grupo (triángulos) y sobrepuestas, con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.	36
17	Ubicación de estructuras críticas de Mexicali. Los números representan la identificación de cada estructura y los colores en el mapa representan la geología descrita en el capítulo I.	37
18	Formato utilizado en la evaluación de estructuras críticas de Mexicali (proporcionado por ATC-21).	47
19	Ubicación de los sitios donde se estimaron las velocidades de ondas sísmicas de corte.	49

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
20	Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de cortante en el sitio PO3. A la izquierda, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha está la dispersión de velocidad de fase (círculos) y de grupo (triángulos) observadas y, sobrepuestas con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.	50
21	Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de cortante, a) en el sitio BPE y b) en el sitio DIF. A la izquierda de cada figura, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha, aparecen las observaciones para la dispersión de velocidad de fase (círculos) y sobrepuestas, con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.	51
22	Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de cortante, a) en el sitio PO1 y b) en el sitio RAY. A la izquierda de cada figura, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha, aparecen las observaciones para la dispersión de velocidad de fase (círculos) y de grupo (triángulos) y sobrepuestas, con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.	52
23	Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de cortante, a) en el sitio PO2 y b) en el sitio PCI. A la izquierda de cada figura, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha, aparecen las observaciones para la dispersión de velocidad de fase (círculos) y sobrepuestas, con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.	53
24	Rejilla utilizada para estimar, en cada nodo, la respuesta sísmica del suelo en Mexicali.	55
25	La línea recta representa la ecuación de Anderson y Luco (1983) que relaciona la magnitud y la longitud de ruptura. Los círculos abiertos son las observaciones de cuatro ocurridos en el Valle Mexicali-Imperial (Anderson y Bodin, 1987).	57
26	Número de secuencias de terremotos y años de ocurrencia en el norte de la falla Imperial y en el norte de la falla Cerro Prieto. La línea cortada muestra el ajuste de mínimos cuadrados de los datos (Anderson y Bodin, 1987).	57

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
27	Segmentos de fallas propensos a romper como son propuestos por Anderson y Bodin (1987), para la falla Imperial $M_w = 6.46$ y para la falla Cerro Prieto $M_w = 6.54$.	59
28	Localización de las ciudades donde hubo daños para los terremotos de El Centro 1940 y del Valle Imperial 1979.	62
29	Peligro sísmico determinado con los criterios del método ATC -21 para periodo corto (0.2 s). Las estrellas indican las ubicaciones de las once estructuras críticas del subcatálogo sometido a la inspección visual rápida.	70
30	Peligro sísmico determinado con criterios del método ATC -21 para periodo largo (1.0 s). Las estrellas indican las ubicaciones de las once estructuras críticas del subcatálogo sometido a la inspección visual rápida.	71
31	Determinación de la seguridad sísmica de estructuras críticas. Se muestra, como ejemplo, el llenado del formato del método de inspección visual rápida, aplicado al edificio de gobierno, en el centro cívico de Mexicali.	73
32	Distribución de valores de la velocidad máxima horizontal, para el análisis conjunto del rompimiento de segmentos de las fallas Imperial ($M=6.46$) y Cerro Prieto ($M=6.54$).	76
33	Distribución de valores de aceleración máxima horizontal para el análisis conjunto del rompimiento de segmentos de las fallas Imperial ($M=6.46$) y Cerro Prieto ($M=6.54$).	77
34	Distribución de valores del espectro de seudovelocidad para el análisis conjunto del rompimiento de segmentos de las fallas Imperial ($M=6.46$) y Cerro Prieto ($M=6.54$).	78
35	Distribución de valores del espectro de pseudoaceleración para el análisis conjunto del rompimiento de segmentos de las fallas Imperial ($M=6.46$) y Cerro Prieto ($M=6.54$).	79
36	Mapa de intensidades en la escala de Mercalli Modificada para el análisis conjunto del rompimiento de segmentos de las fallas Imperial ($M=6.46$) y Cerro Prieto ($M=6.54$).	80

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Sismicidad histórica del Valle de Mexicali: se indica la fecha, las coordenadas de los epicentros y la longitud de ruptura. Con magnitudes mayores o iguales a 6.0. Mb: Magnitud de ondas de cuerpo; M_w : Magnitud de momento y LR: longitud de ruptura (Frez <i>et al.</i> , 1989).	23
II	Coefficientes suavizados usados en la ecuación (2) para estimar espectros de respuesta de pseudoaceleración (g) en componentes horizontales aleatorias con 5% de amortiguamiento. Los valores para $T=0.00$ son los coeficientes para la aceleración horizontal máxima (Boore <i>et al.</i> , 1997).	28
III	Parámetros de la ecuación (5) para estimar el máximo del componente horizontal orientado al azar del espectro de respuesta de pseudovelocidad (cm/s) con un amortiguamiento de 5%. Al final, se encuentran los coeficientes para calcular el valor pico de la velocidad horizontal en cm/s (Joyner y Fumal, 1985).	30
IV	Tipos de construcción en las estructuras críticas de Mexicali.	38
V	Catálogo de estructuras críticas. ID: identificación de la estructura en el mapa. TC: tipo de construcción.	39
VI	Clasificación de los intervalos del factor de daño (FD) y factor central de daño (FCD).	41
VII	Descripción del estado de daño.	42
VIII	Matriz de probabilidad de daño para edificios bajos de concreto reforzado.	43
IX	Comparación de las intensidades de Mercalli modificada (IMM) observadas en el Valle Mexicali-Imperial para los terremotos de El Centro 1940 y del Valle Imperial 1979.	61
X	Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras de marco de concreto reforzado.	64
XI	Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras de marcos de acero.	65

LISTA DE TABLAS (continuación)

Figura		Página
XII	Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras de marcos de acero arrostrados.	65
XIII	Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras de mampostería reforzada.	65
XIV	Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras con lámina.	66
XV	Matriz de vulnerabilidad para puentes.	66
XVI	Matriz de vulnerabilidad para subestaciones eléctricas.	66
XVII	Matriz de vulnerabilidad para tuberías.	67
XVIII	Matriz de vulnerabilidad para carreteras.	67
XIX	Matriz de vulnerabilidad para tanques de agua.	67
XX	Factor Central de daño promedio para los tipos de construcción de Mexicali, usando matrices originales del ATC-13.	68
XXI	Factor Central de daño promedio para los tipos de construcción de Mexicali con las matrices ajustadas.	68
XXII	Subcatálogo de estructuras críticas y estratégicas en Mexicali.	69
XXIII	Criterios para determinar el peligro sísmico de la región.	69
XXIV	Daños esperados, en términos del factor de daños (FCD), en las estructuras críticas para el escenario sísmico propuesto. ID: identificación de la estructura en el mapa. TC: tipo de construcción, e IMM: intensidad de Mercalli Modificada.	82
XXV	Resultados de inspección visual rápida de una muestra de estructuras críticas con el método del ATC-21.	88
XXVI	Resumen de la respuesta sísmica del suelo en Mexicali.	90
XXVII	Resumen de la distribución del daño estimado a las estructuras críticas con el ATC-13 (1985).	91

Capítulo I

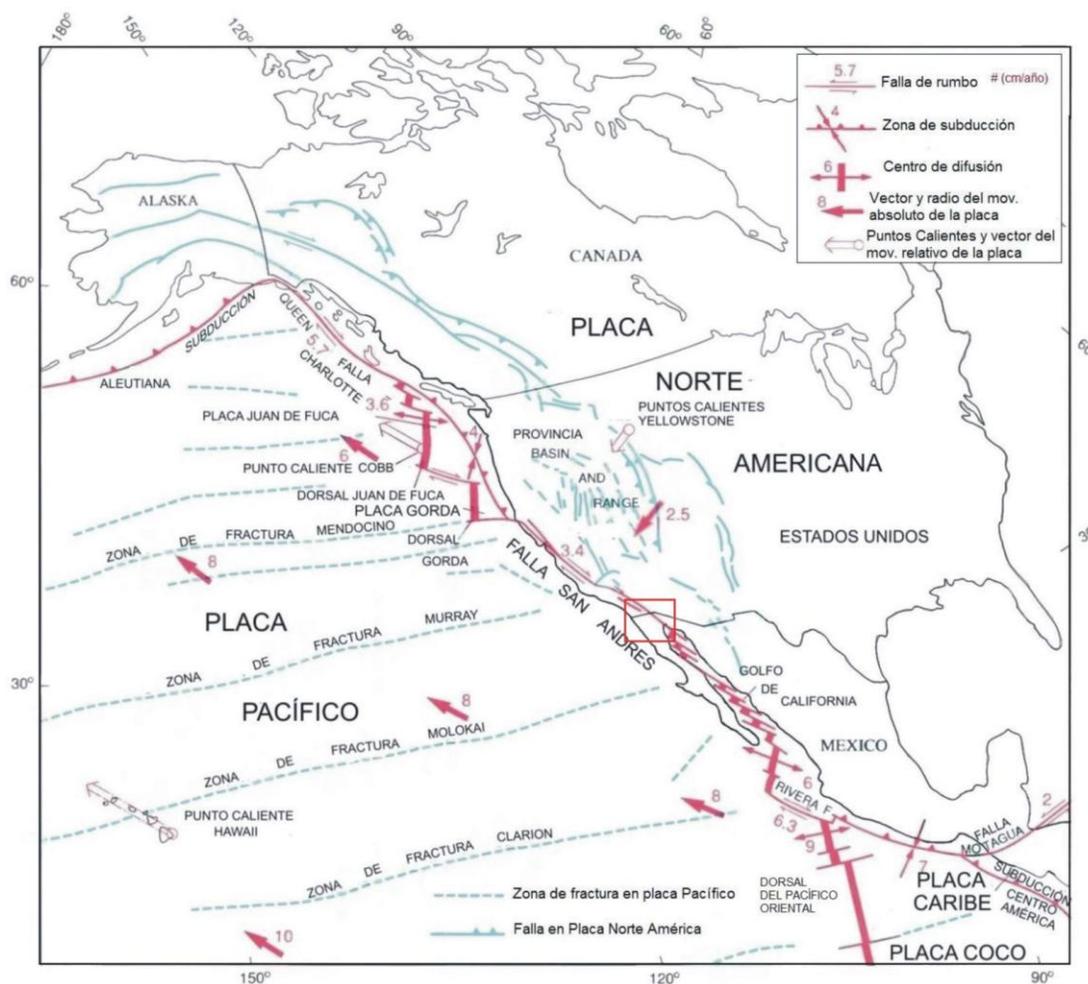
INTRODUCCIÓN

I.1 Descripción del área de estudio

La zona de estudio se ubica en el norte de Baja California, México, entre las coordenadas 115.33^o y 115.60^o oeste y 32.50^o y 32.70^o norte. Fisiográficamente, Baja California consiste de un litoral en el Océano Pacífico, estrecho y discontinuo, una espina dorsal montañosa y la provincia extensional del Golfo de California; geológicamente, estos dominios fisiográficos corresponden a la plataforma continental, a la cordillera peninsular, y a la depresión del Golfo de California, respectivamente. Tectónicamente, las primeras dos provincias son producto de la colisión, sucedida en el cretácico, de la placa Norteamericana con la farallón del Pacífico; mientras que la última está directamente relacionada con la apertura del Golfo de California (Minch *et al.*, 1998). La cordillera peninsular está constituida por rocas ígneas intrusivas predominantemente félsicas (granito, granodiorita y diorita), ígneas extrusivas andesitas y metamórficas (pizarra, gneiss, esquisto y esquisto-gneiss). Al este, en la depresión del golfo, se ubican las cuencas, de la Laguna Salada, del Valle Mexicali-Imperial y de San Felipe (Gastil *et al.*, 1975).

La región de estudio se encuentra sujeta a un elevado peligro sísmico debido a su ubicación en la frontera de las placas tectónicas Norteamericana y del Pacífico, que tienen un significativo movimiento relativo (~5 cm/año), lo cual produce grandes concentraciones de esfuerzos en la corteza terrestre (Legg y Kennedy, 1991). Baja California, desde el punto de vista sismotectónico, se encuentra dentro de la provincia denominada “zona de cizalla del sur de California” (Suárez *et al.*, 1991; Suárez, 1999), caracterizada por un complejo

sistema de fallas que transmiten el movimiento principal de cizalla entre las placas Norteamericana y del Pacífico; mientras que otras funcionan como fallas de ajuste de movimientos en otras direcciones (Suárez Vidal, *et al.*, 1991; Barnard, 1968; Lomnitz *et al.*, 1970; Frez *et al.*, 2000). La figura 1.a muestra la ubicación de la región norte de Baja California, en relación a la tectónica global. La figura 1.b presenta el marco tectónico de la región norte de Baja California y muestra las principales fallas asociadas al movimiento relativo de placas.



Figuras 1.a. Ubicación de la región de estudio dentro de la zona de interacción de las placas del Pacífico y la Norteamericana. El cuadro rojo representa el área del marco de tectónico de Baja California (Tomado de Wallace, 1990).

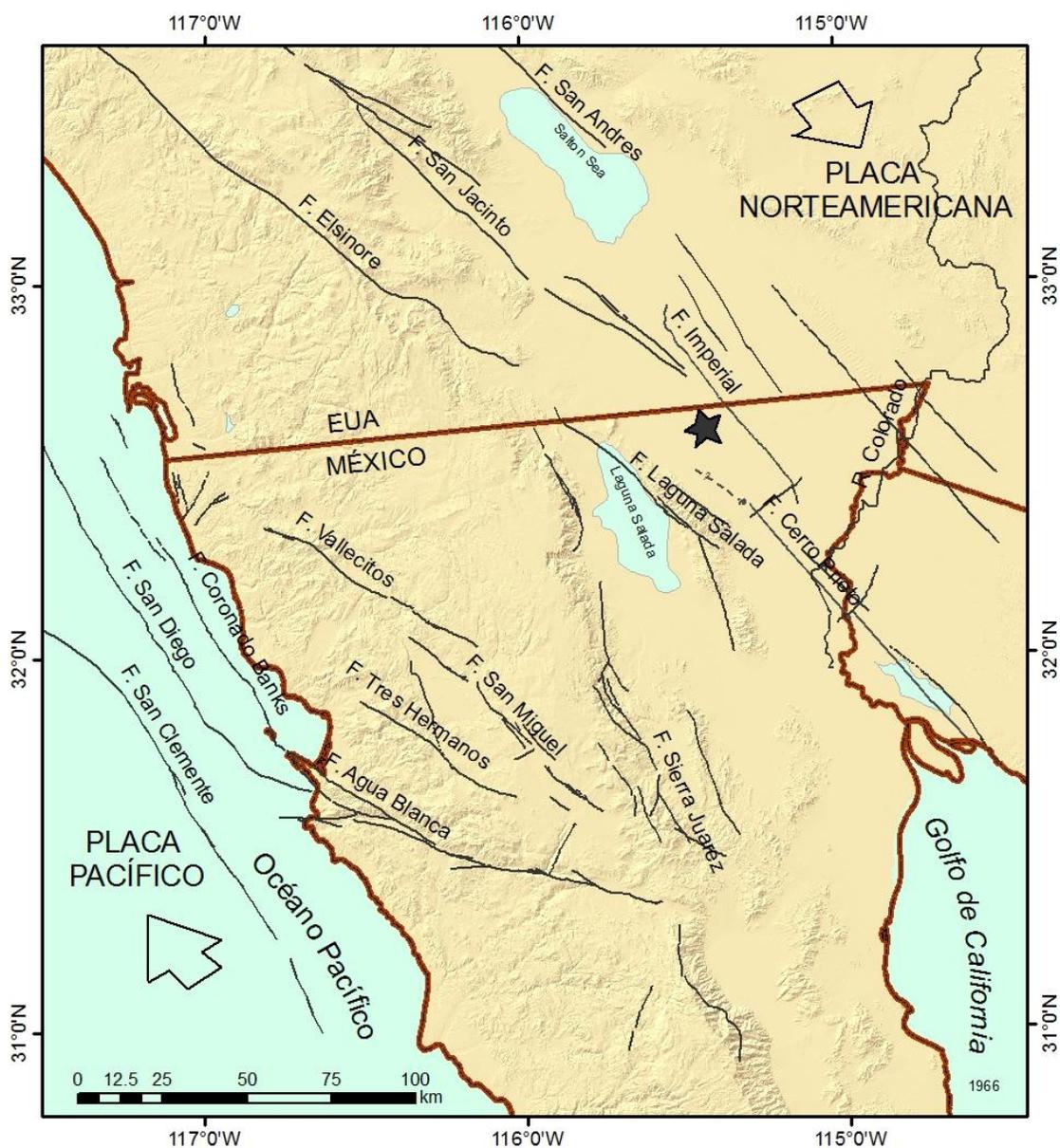


Figura 1.b. Marco tectónico de la región de Baja California, la estrella representa la ciudad de Mexicali.

El Valle de Mexicali-Imperial se caracteriza por ser una cuenca rellena de sedimentos de origen marino y continental. Dentro del Valle, se localiza la zona urbana de Mexicali, de principal interés en este trabajo; ésta se encuentra asentada sobre una mezcla de aluvión y sedimentos recientes, consistentes en depósitos limosos, arenosos, pobremente

consolidados; transportados por el río Colorado como se muestra en la figura 2 (Gastil *et al.*, 1975).

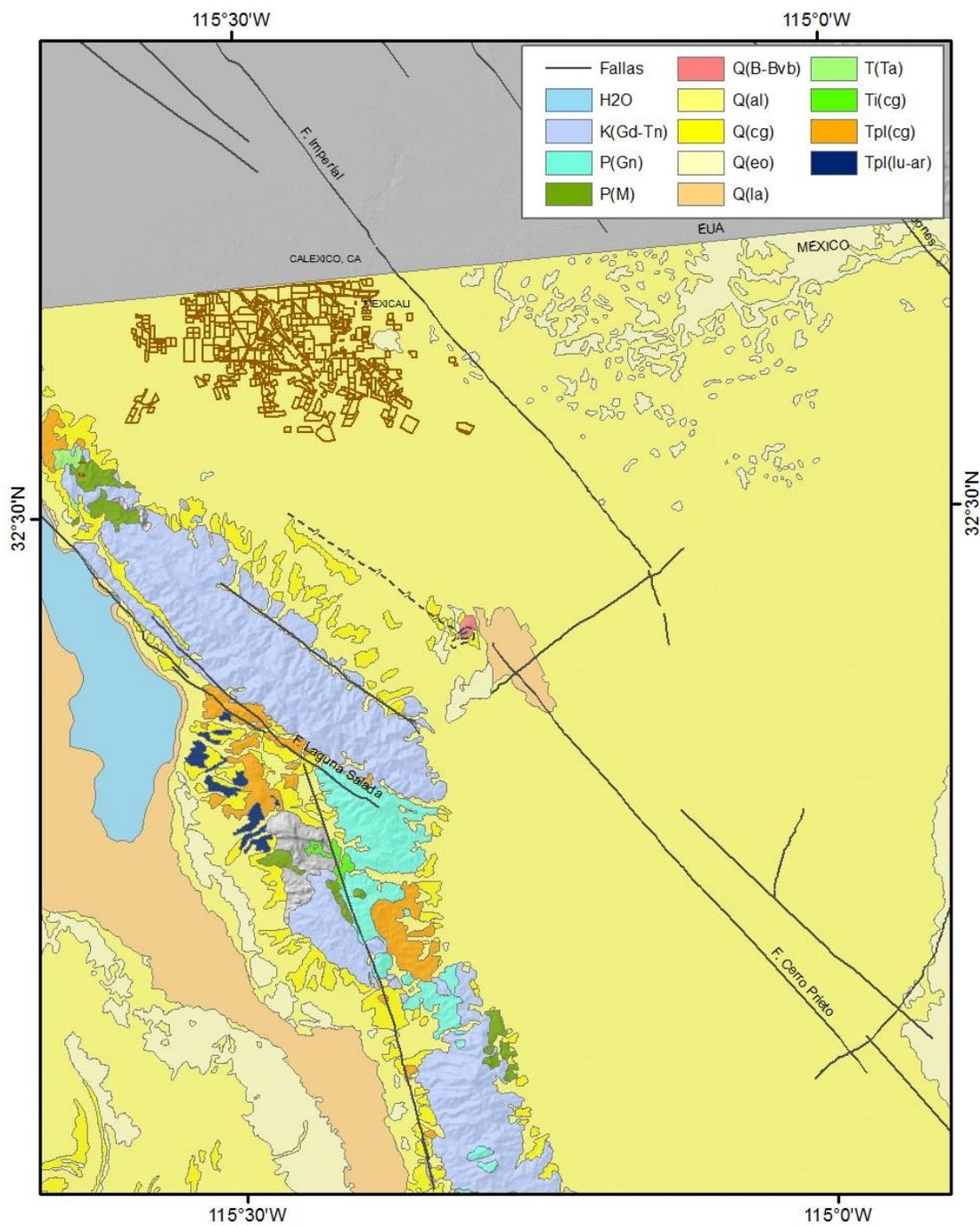


Figura 2. Geología de Mexicali, tomada de INEGI y completada con Gastil (1975).

La actividad sismotectónica en el norte de Baja California se correlaciona con tres grupos de fallas activas (Suárez Vidal *et al.*, 1991). El primer grupo se encuentra en el este de la provincia extensional del Golfo y forma parte del sistema de fallas de San Andrés (Raines *et al.*, 1991), ubicado a lo largo del Valle Mexicali-Imperial; incluye las fallas activas: Imperial, de Cerro Prieto, de Cucapá y de Laguna Salada a las que se agrega, en el estado de California, las fallas de Elsinore, Brawley y Superstition Hill. Este grupo de fallas, con gran actividad sísmica, constituyen la principal fuente de peligro sísmico para la zona urbana de Mexicali. El segundo grupo, formado por las fallas de San Pedro Mártir, Sierra Juárez y el lineamiento de San Felipe, están asociados al escarpe del Golfo. El sistema de fallas de Sierra Juárez es particularmente activo en su segmento central con dos cúmulos localizados en los extremos de este segmento (Frez y Frías, 1998). El tercer grupo, que comprende los sistemas de fallas de Agua Blanca y de San Miguel-Vallecitos-Calabazas atraviesan la cordillera peninsular. Existen otras fallas en la periferia de la provincia como las del área extensional sureste del escarpe de San Pedro Mártir en el área de Puertecitos, fallas submarinas del borde continental del Pacífico (Coronado Banks, las depresiones de San Diego y la falla de San Clemente, Stock *et al.*, 1991) y del Golfo de California.

Prácticamente, todas las fallas del primer grupo son activas sísmicamente, como se puede apreciar en la figura 3, donde se muestra la distribución epicentral de los sismos de magnitudes mayores o iguales a 3, ocurridos durante el período de 1976 a julio de 2008, de acuerdo a los catálogos de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM, operada por el CICESE, <http://sismologia.cicese.mx/resnom>) y del California Institute of Technology (operada por CALTECH, http://www.data.scec.org/catalog_search/date_mag_loc.php).

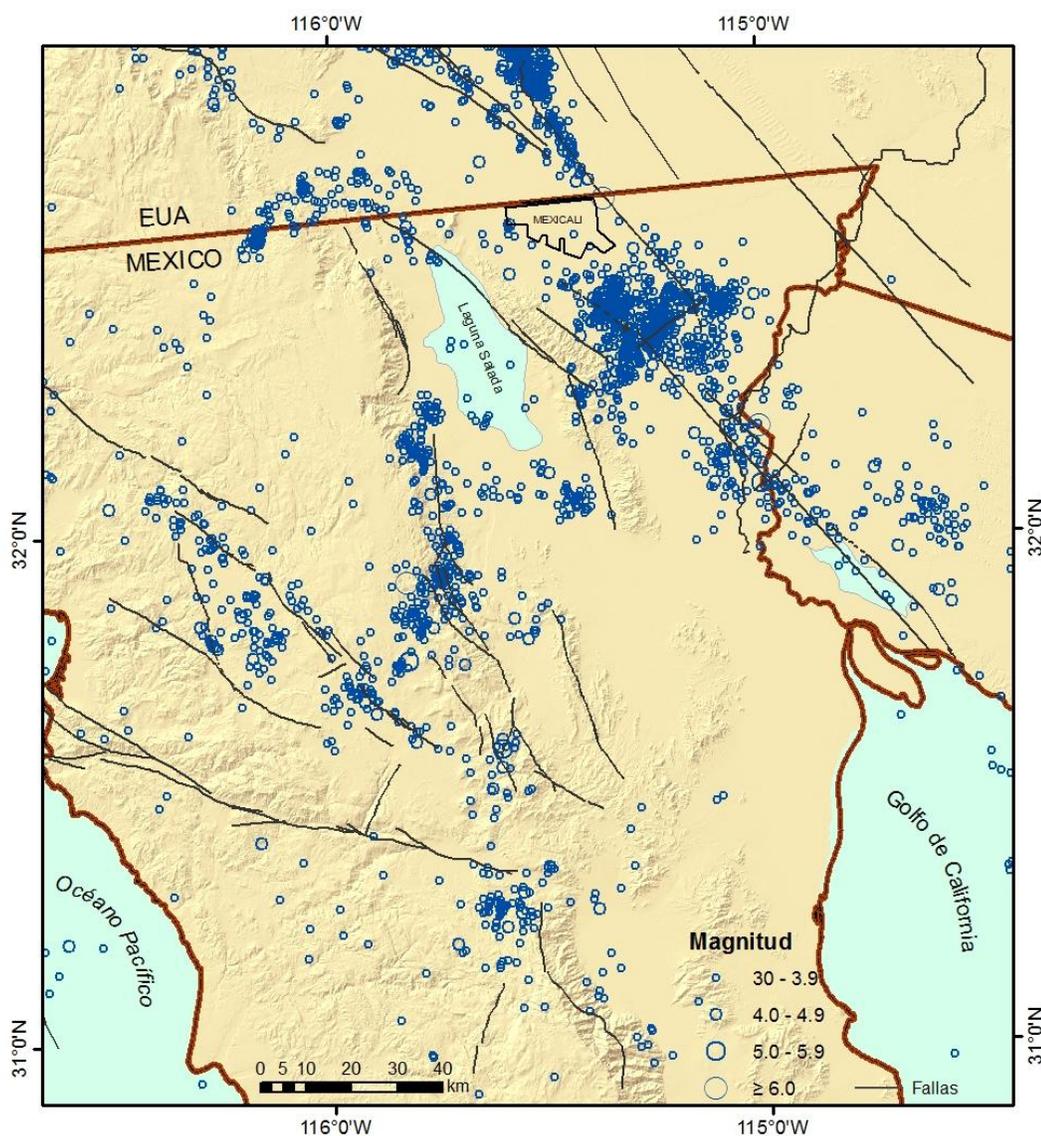


Figura 3. Distribución epicentral de la sismicidad con magnitud ≥ 3.0 , reportada por RESNOM para el territorio de México y Caltech para el territorio de EE. UU. Desde 1976 hasta julio de 2008.

La sismicidad histórica en la región se muestra en la figura 4, para sismos con magnitudes mayores de 5; las características de los eventos ocurridos antes de la existencia de redes sísmicas se obtuvieron a partir de reseñas y notas periodísticas. Los sismos de magnitud $M_L > 6$ fueron generados por las fallas de Cerro Prieto, Imperial y de San Miguel (Frez y González, 1991). En particular, la ciudad de Mexicali se ha visto sujeta a varios terremotos que han causado daños en estructuras civiles, como los sismos de El Centro

1940 (M= 7.1); Imperial 1979 (M= 6.6) (Chávez *et al.*, 1982) y Victoria 1980 (M= 6.1) (Frez y González 1989; Wong *et al.*, 1997).

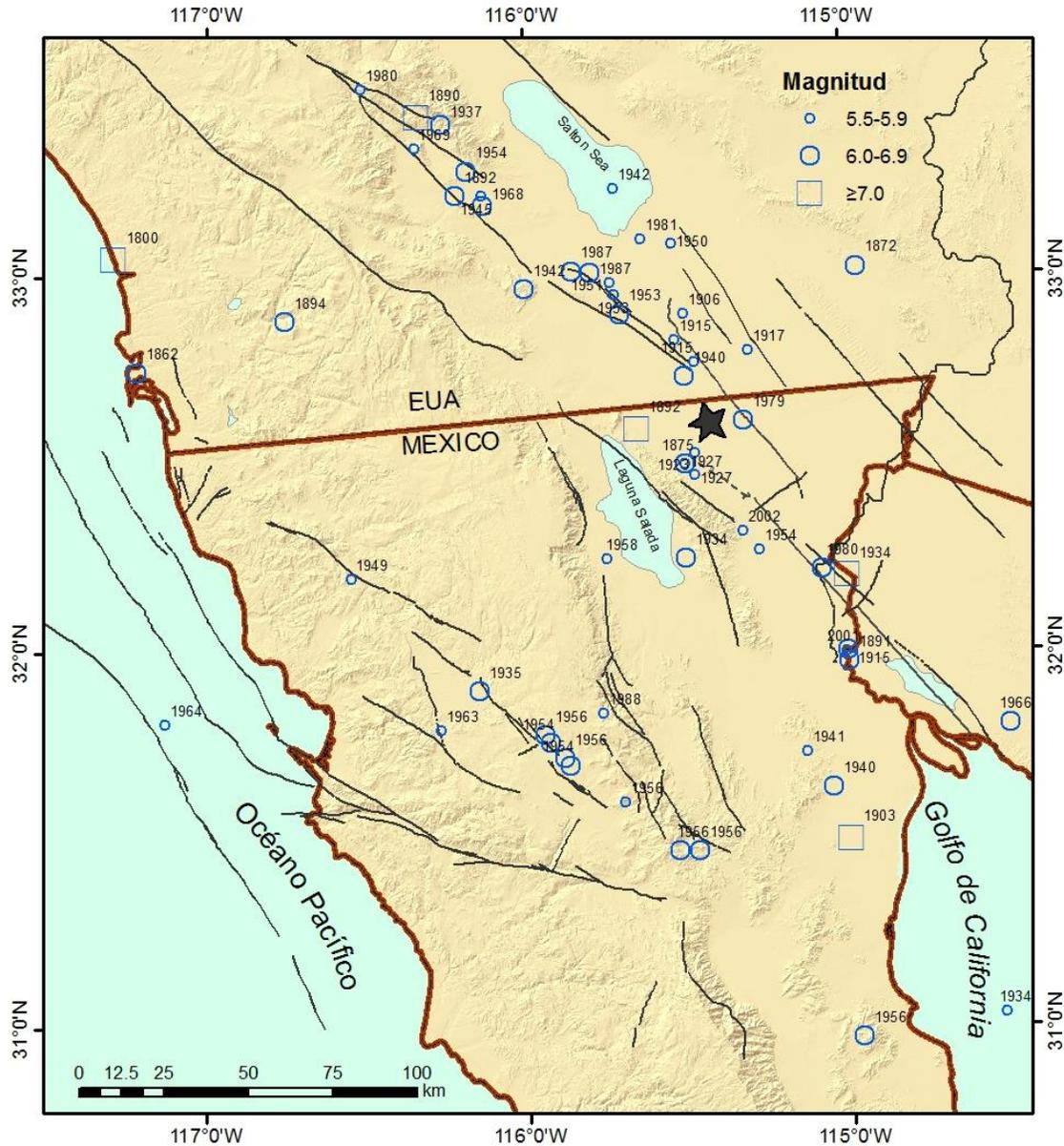


Figura 4. Localizaciones epicentrales de terremotos $M > 5.5$ instrumentales e históricos ocurridos dentro del marco tectónico donde se encuentra el área de estudio. La figura resulta de una actualización del catálogo usado por Frez y González (1991); el que se basó en el Catálogo del Sur de California, el del National Earthquake Information Center, además de relocalizaciones y recopilaciones hechas por Leeds (1979), Doser y Kanamori (1986), y Anderson y Bodin (1987). La estrella indica la ubicación de la ciudad de Mexicali.

Es claro, que las ciudades del norte de Baja California, en particular la ciudad de Mexicali, están localizadas en una región donde existe una actividad sísmica significativa que se manifiesta por la ocurrencia de sismos de magnitudes moderadas y fuertes. Por ello, dentro del proceso para determinar y entender las pérdidas potenciales que dicha actividad sísmica causaría en la región y definir medidas de reducción de las mismas, es imprescindible dedicar esfuerzos a conseguir la caracterización de la respuesta sísmica de los suelos donde están asentados los principales núcleos de población del Estado.

I.2 Planteamiento del problema y justificación

Los efectos de los sismos se manifiestan no sólo en los daños físicos a las estructuras y sistemas de líneas vitales, sino también pérdidas significativas de vidas humanas y un impacto negativo en la economía. Para implementar medidas de gestión y reducción del riesgo sísmico se debe tener un buen entendimiento del medio sísmico expresado a través de mapas de peligro sísmico.

La Secretaría de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastre (EIRD) de las Naciones Unidas (<http://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>) presenta las definiciones sobre los elementos del riesgo sísmico: *Amenaza o peligro sísmico* se refiere a la probabilidad de ocurrencia de un sismo que pueda causar pérdida de vida o daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental durante cierto periodo; *Vulnerabilidad* es la incapacidad de resistencia cuando se presenta un fenómeno amenazante, o la incapacidad para reponerse después de que ha ocurrido un desastre; *Riesgo* es la probabilidad de consecuencias perjudiciales económicas, sociales o ambientales en un sitio en particular como resultado de la interacción de peligro con la vulnerabilidad de los elementos expuestos (EIRD, Villacís y Kaneko, 1994).

Es imprescindible dedicar esfuerzos a conseguir la caracterización de la *respuesta sísmica de los suelos* donde están asentados los principales núcleos de población dentro de zonas con peligro sísmico. La elaboración de mapas de microzonación de la respuesta sísmica de los suelos, es un paso primordial en el proceso de incrementar la seguridad de los diseños antisísmicos de estructuras civiles nuevas o de los reforzamientos de estructuras ya existentes. El objetivo a largo plazo de la microzonación sísmica de una zona urbana implica la creación de varios tipos de mapas, con la información de los diferentes parámetros de interés a la ingeniería sísmica, como son: máximas aceleraciones, velocidades y desplazamientos del movimiento del suelo y sus frecuencias dominantes, así como mapas de intensidades sísmicas, y de valores máximos de los espectros de respuesta.

La microzonación sísmica de una región urbana es un proyecto que involucra una amplia variedad de datos y métodos de análisis e interpretación. Asimismo, es un proceso cuyos resultados requieren de continuas actualizaciones a la luz de nuevos datos o nuevas técnicas de análisis. Al producir mapas de peligro sísmico que reflejen el movimiento esperado del suelo en parámetros de velocidad y aceleración del suelo e intensidad sísmica, combinados con la vulnerabilidad de infraestructura habitacional y de servicios, se produce un escenario de daños sísmicos esperados para estructuras críticas y sistemas de líneas vitales. Este trabajo de tesis contribuye parcialmente al proyecto amplio de microzonación sísmica de Baja California, aplicando lo anterior a la ciudad de Mexicali. Sus resultados, aún cuando son componentes de un objetivo más amplio, son productos completos en sí mismos y utilizables directamente por la comunidad científica y la de ingeniería. Esta información es de importancia en la determinación de nuevos criterios de diseño antisísmico para considerarse en los reglamentos de construcción de Baja California.

I.3 Objetivos

El objetivo de esta tesis es determinar el efecto esperado de los sismos sobre las estructuras civiles críticas y/o estratégicas de la ciudad de Mexicali, Baja California. Se analizan los terremotos con mayor probabilidad de ocurrencia en los próximos 20 años. Se incluyen las estructuras consideradas más críticas de acuerdo con los organismos de protección civil competentes. La determinación de los daños esperados permite un mejor entendimiento del impacto negativo de los sismos; tanto en término humano como físico, social y económico; además servirá de base para la elaboración de una primera versión de un escenario sísmico para esta ciudad.

El objetivo se logra mediante una combinación de los mapas de la respuesta sísmica de los suelos con la distribución y características físicas de la infraestructura habitacional y de servicios. Este proceso genera una serie de productos que también son útiles por sí mismos:

1. Mapas de distribución de la respuesta sísmica de los suelos, expresable como aceleración y velocidad máximas del movimiento del suelo y máximos de los espectros de respuesta
2. Mapas de isosistas esperadas
3. Catálogo de las estructuras civiles críticas dentro de la zona urbana
4. Obtención o adaptación de una relación entre la intensidad sísmica y el daño estructural (funciones de vulnerabilidad)
5. Tablas y mapas con las distribuciones de daños esperados

6. Recomendaciones para la reducción del riesgo así como la prevención y atención de daños.

I.4 Antecedentes

En la zona tectónica de cizalla sísmica del sur de California y norte de Baja California, dentro de la cual se sitúa la zona de estudio de esta tesis, se han llevado a cabo estudios similares al presente, tanto en aspectos relacionados con el marco sismotectónico, como con la fabricación de mapas de microzonación, y en la estimación de daños estructurales esperados. Esos estudios han permitido el desarrollo e implantación de técnicas de adquisición de datos, así como el procesamiento, análisis e interpretación de éstos, lo que posibilita su aplicación en la región de este estudio.

En la ciudad de Tijuana se hicieron estudios de microzonación utilizando parámetros tales como aceleraciones y velocidades máximas del suelo, máximos de los espectros de respuesta, períodos dominantes, energía, intensidades sísmicas y factores sísmicos de estabilidad de laderas (Mendoza *et al.*, 1992; Acosta *et al.*, 1994; Alvarez *et al.*, 1994a; Alvarez *et al.*, 1994b; Alvarez *et al.*, 1995; Acosta *et al.*, 1995; Montalvo *et al.*, 1995a; Montalvo *et al.*, 1995b, Montalvo, 1996). El trabajo de microzonificación de Acosta y Montalvo (1997), en términos de la intensidad de Mercalli modificada, sirvió de base para la elaboración de escenarios sísmicos por Winckell *et al.* (2000) y Rosquillas y Mendoza (2002). Reichle *et al.* (1990), realizaron un escenario sísmico para la ciudad de San Diego California, y de manera mucho más simplificada para la ciudad de Tijuana.

En la ciudad de Ensenada, Soares (2003) contiene un estudio que consiste en: a) La elaboración de mapas de microzonación de la respuesta sísmica mediante la aplicación de ecuaciones empíricas predictivas; b) La realización de un catálogo de las estructuras críticas y estratégicas de la ciudad; c) La utilización de matrices de vulnerabilidad para elaborar dictámenes preliminares sobre los daños esperados en estructuras por la ocurrencia de

terremotos fuertes. Este escenario incluye aceleraciones de hasta 680 cm/s^2 e intensidades de Mercalli de hasta X.

En el Valle de Ojos Negros, Jasso (2003) hizo microzonificaciones basadas en amplificaciones relativas del movimiento sísmico registrado en el suelo y en movimientos máximos esperados para el rompimiento de un segmento de 20 km de la falla San Miguel. Las amplificaciones espectrales encontradas son de hasta 11 veces y las aceleraciones de hasta 550 cm/s^2 relativas a suelos aluviales.

En la zona urbana de Mexicali el trabajo más reciente es el de Acosta *et al.* (2007), quienes caracterizaron la respuesta sísmica mediante mapas con las distribuciones espaciales de los siguientes parámetros: periodos dominantes del movimiento del suelo (PD), velocidades de propagación de ondas de corte en los primeros 30 m del subsuelo (β_{30}), factores de amplificación respecto a roca (FA), envolventes del espectro de respuesta (ER), además de aceleración, velocidad e intensidad de Mercalli esperadas para el terremoto con mayor probabilidad de ocurrencia en los siguientes 20 años (mapas predictivos). Los PD se estimaron con la técnica de Nakamura (Nakamura, 1989) y con registros de microtemores en 95 sitios. Las β_{30} fueron obtenidas mediante la inversión de curvas de dispersión de ondas superficiales y perfiles de refracción sísmica. Los FA resultaron de acelerogramas digitales en 8 estaciones acelerométricas triaxiales. Los ER provienen de la respuesta de una estructura de un grado de libertad. Los mapas predictivos se elaboraron con una ecuación predictiva apropiada para la región sismotectónica dentro de la cual se encuentra la ciudad de Mexicali, suponiendo el rompimiento de un segmento de 42 km de la porción sur de la falla Imperial y expresando el efecto de sitio mediante la β_{30} . La aceleración máxima obtenida es de 430 cm/s^2 ; la velocidad, de 95 cm/s ; y la intensidad, de IX.

Existe también un estudio de vulnerabilidad sísmica y protección civil de los centros educativos de Mexicali (Meneses, *et al.*, 2004). Este estudio analiza la seguridad sísmica de

las escuelas públicas de la ciudad, identifica las estructuras más vulnerables y prepara los diseños de refuerzo para una muestra de las escuelas más vulnerables a la actividad sísmica.

Los estudios del peligro sísmico en el norte de Baja California han incluido, por parte del CICESE, el despliegue de redes acelerométricas y sismométricas en las ciudades de Tijuana, Ensenada, Mexicali, Valle de Ojos Negros, regiones centro y sur del sistema de fallas San Miguel, región norte de Ojos Negros, región costera de Ensenada, falla Agua Blanca y falla Vallecitos (Acosta *et al.*, 1995, Arellano *et al.*, 1999; Frez *et al.*, 2000). La microzonificación basada en periodos dominantes del suelo ha sido llevada a cabo en las principales ciudades del norte de Baja California: Ensenada, Tijuana, Tecate y Mexicali (Alvarez *et al.*, 1997; Ibarra, 2004; Acosta *et al.*, 2007).

Capítulo II

MÉTODOS Y DATOS

Existen dos aproximaciones a la caracterización de la respuesta sísmica de los suelos; una hace uso de registros de terremotos obtenidos sobre los tipos de suelos representativos de la región de estudio; mientras la otra emplea estimaciones empíricas de amplificación del movimiento del suelo desarrolladas para condiciones similares a las existentes en el área de estudio. Hasta la fecha no existen en la zona urbana de Mexicali suficientes registros de terremotos como para realizar una microzonación basada enteramente en datos observados, aunque ya se ha comenzado la formación de una base de acelerogramas digitales (Acosta *et al.*, 2007). Aki (1988) afirma que “la aproximación más realista a la microzonación sísmica es la determinación de las correlaciones empíricas entre los factores de amplificación y los parámetros geotécnicos de sitio”, lo que implica la preparación de mapas de la respuesta sísmica con el empleo de ecuaciones empíricas que incluyan el efecto de sitio mediante alguna correlación con un parámetro físico de los materiales del suelo.

El desarrollo de este trabajo incluye la identificación de las posibles fuentes sísmicas, la selección tanto del terremoto a usarse en los escenarios, como del método óptimo para evaluar el efecto de la propagación de ondas y de la amplificación local; además se agrega la distribución de intensidades en el nivel superficial. Estas intensidades son utilizadas en combinación con las funciones de vulnerabilidad apropiadas, para hacer el análisis del comportamiento sísmico de las estructuras civiles críticas. El esquema general consiste en tres etapas, con varios procesos en cada una, como se aprecia a continuación:

Etapa a) Preparación de los mapas de respuesta sísmica esperada en la zona urbana de Mexicali.

- a.1. Determinación de los sismos hipotéticos que se deben considerar para el análisis del riesgo sísmico.
- a.2. Selección de una ecuación de atenuación apropiada para las condiciones sismotectónicas y geológicas de la región de estudio, para estimar la respuesta sísmica esperada en la superficie.
- a.3. La inclusión apropiada de los efectos de la geología superficial local en la estimación de la respuesta sísmica.

Etapa b) Creación de un catálogo de las estructuras críticas y estratégicas de Mexicali.

- b.1. Recopilación de información de tipos estructurales, ubicación de estructuras y delimitación de áreas de influencia.
- b.2. Creación de un subcatálogo con las estructuras consideradas más importantes desde el punto de vista de reacción ante un sismo fuerte.
- b.3. Elección del conjunto de matrices de vulnerabilidad más apropiadas a los tipos de construcción de la región

Etapa c) Evaluación del daño esperado en las estructuras críticas y estratégicas de la ciudad.

- c.1. Determinación del daño estructural mediante la aplicación de matrices de vulnerabilidad.

c.2. Aplicación del método de inspección visual rápida sobre el subcatálogo de la etapa b.2.

Los procesos (a) y (b) se representan esquemáticamente en la figura 5.

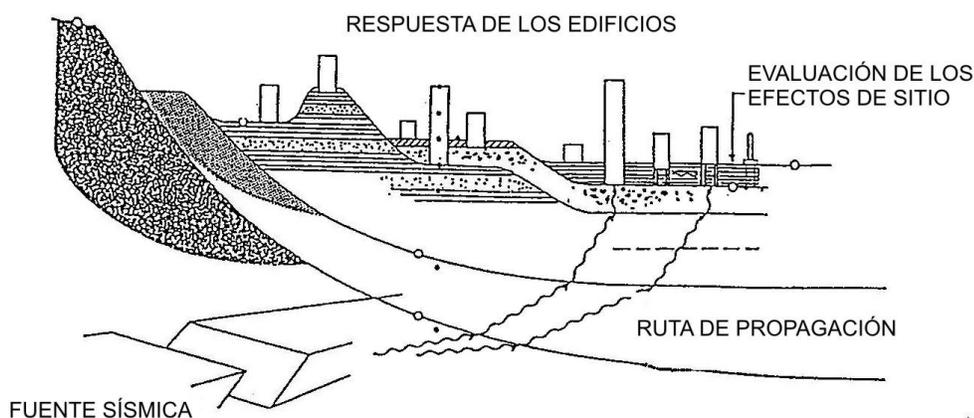


Figura 5. Elementos para la creación de un escenario sísmico. (Villacís y Kaneko, 1994)

II.1 Geología regional

El Valle de Mexicali es parte de la provincia tectónica del Salton Sea. Topográficamente, el Valle se caracteriza por una superficie plana sobre la que se eleva el volcán inactivo de Cerro Prieto, con una elevación de 225 metros. Sedimentariamente, el Valle es parte del sistema del Delta del Río Colorado y contiene sedimentos cuaternarios semiconsolidados de origen deltaico y piedemonte. Estos sedimentos se diferencian por su forma de sedimentación y se han depositado intermitentemente sobre sedimentos cenozoicos bien consolidados. Estos sedimentos cenozoicos, a su vez, descansan de manera discordante sobre metasedimentos y rocas graníticas del cretácico superior. Entre zonas porosas y permeables de sedimentos cenozoicos se encuentran acuíferos termales (Puente y de la Peña, 1978).

Estructuralmente, el Valle se caracteriza por una serie de grabens y horsts asociados con las fallas de rumbo NW-SE: San Jacinto, Superstition Hill, Cerro Prieto, Imperial, Brawley y San Andrés. Estas fallas forman parte del sistema de San Andrés – Golfo de California, que continúa en el Golfo de California como una serie de fallas en escalón. Este sistema es a su vez el resultado del movimiento de las placas de Norte América y del Pacífico. (Puente y de la Peña, 1978)

II.2 Sismicidad histórica del Valle Mexicali-Imperial

En la sismicidad instrumental y empírica del Valle de Mexicali-Imperial, el mayor terremoto es de magnitud Mw 7.1 en diciembre de 1934 asociado a la falla de Cerro Prieto (Anderson y Bodin, 1987). Durante los últimos 70 años, se han generado tres terremotos importantes: el 18 de mayo de 1940 (ML=7.1) y el 15 de octubre de 1979 (ML=6.6), asociados a la falla Imperial (Chávez *et al.*, 1982); y el 8 de Junio de 1980 (ML=6.1), generado por la falla de Cerro Prieto (Frez y González, 1989; Wong *et al.*, 1997). Estos sismos se muestran en la figura 4.

En el terremoto de El Centro de 1940 hubo intensidades de V a X en el Valle Imperial en la escala modificada de Mercalli. Se reportaron 8 personas muertas y 20 gravemente heridas (Ulrich, 1941). Además de las pérdidas humanas, se reportaron daños en canales de riego (figura 6), tanques de agua (figura 7), puentes, carreteras (figura 8), líneas de teléfonos y telégrafos, vías del tren (figura 9) y edificios (figuras 10a y b) (Ulrich, 1941). Estos daños produjeron escasez de agua, pérdidas en los cultivos, interrupción en los servicios de comunicación y pérdidas económicas de cinco o seis millones de dólares causados por daños directos. Los canales sufrieron grandes daños, principalmente en la región oeste y sur de Holtville y en México aproximadamente 8 kilómetros al este del volcán de Cerro Prieto. Los daños en las vías del tren fueron observados en tres puntos: en Grape (entre Brawley e Imperial), en Melolan (entre El Centro y Holtville) y en Cocapah en

México. En Caléxico hubo un edificio con apreciables daños y otros mostraron las paredes agrietadas y el emplaste caído. En Mexicali no se reportaron daños grandes, pero un corto circuito ocasionó un incendio en un hotel y murieron dos personas. Otras ciudades del Valle Imperial sufrieron daños menores como ventanas caídas, paredes agrietadas y caída de emplastes. Algunos tanques elevados de agua de 50,000 Gal en Holtville, 100,000 Gal en el Valle Imperial y un tanque en Brawley fueron dañados. Las carreteras presentaron muchas fracturas. El canal Solfatara, en Baja California, fue completamente destruido en el km 23 (Sylvester, 1979).



Figura 6. Daño en el canal que atraviesa el Valle Imperial. (Sylvester 1979)



Figura 7. Colapso de un tanque de agua de 100,000 Gal en el Valle Imperial (Ulrich, 1941).

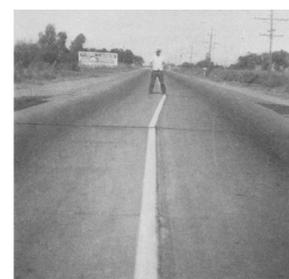


Figura 8. Deslizamiento de 0.76 m en la carretera (Ulrich, 1941).



Figura 9. Vías del tren dobladas, cerca de Cucapah México (Sylvester, 1979).

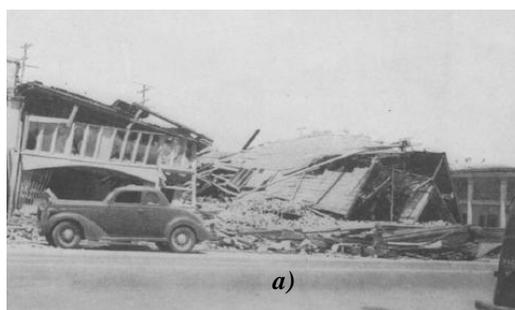


Figura 10. a) Distrito de negocios en Imperial, cuatro personas murieron por el colapso de las paredes. b) Colapso de columna soportando un balcón. Norte de Brawley (Ulrich, 1941).

En el terremoto del 15 de octubre de 1979 hubo intensidades de VII a IX en algunas ciudades de California en la escala modificada de Mercalli (Algermissen *et al.*, 1979). Hubo daños en Brawley, Calexico, El Centro e Imperial para edificios bajos de ladrillos no reforzados construidos antes del terremoto de 1940 del Centro. Los daños consistieron en el colapso parcial de paredes de ladrillos no reforzadas, columnas rotas, grietas en paredes, caídas de cornisas, parapetos, algunas chimeneas dañadas, ventanas rotas o destrozadas, emplaste roto o caído, suspensión de cielos rasos, techo con tejas caído, estantes, mostradores desplazados, mercancías de las tiendas lanzadas de los estantes. Todo tipo de muebles se desplazaron, lámparas y mesas se volcaron, se cayeron y rompieron cuadros, espejos, objetos de vidrio, platos y un número considerable objetos pequeños. El edificio moderno más dañado fue el edificio Imperial County Services en El Centro, de seis pisos de concreto reforzado, con muros de corte, diseñado para el código de 1967. Este edificio experimentó una intensidad de IX (figura 11) (Reagor B.G *et al.*, 1982).



Figura 11: Columnas que fallaron en el edificio Imperial County Service en El Centro (Reagor *et al.*, 1982).

En Mexicali, el edificio del aeropuerto fue extensamente dañado y se reportaron daños menores en algunos edificios de gobierno; cayeron paredes de algunas casas, ladrillos de las fachadas de las tiendas y rupturas de ventanas (Reagor B.G *et al.*, 1982). Además de los daños en los edificios, hubo derrumbes y fisuras en la carretera. Mucho de

este derrumbe de tierra fue hasta de 10 m^3 con fisuras de 4 metros de longitud, las cuales se muestran en la figura 12 (Vonder, 1982).

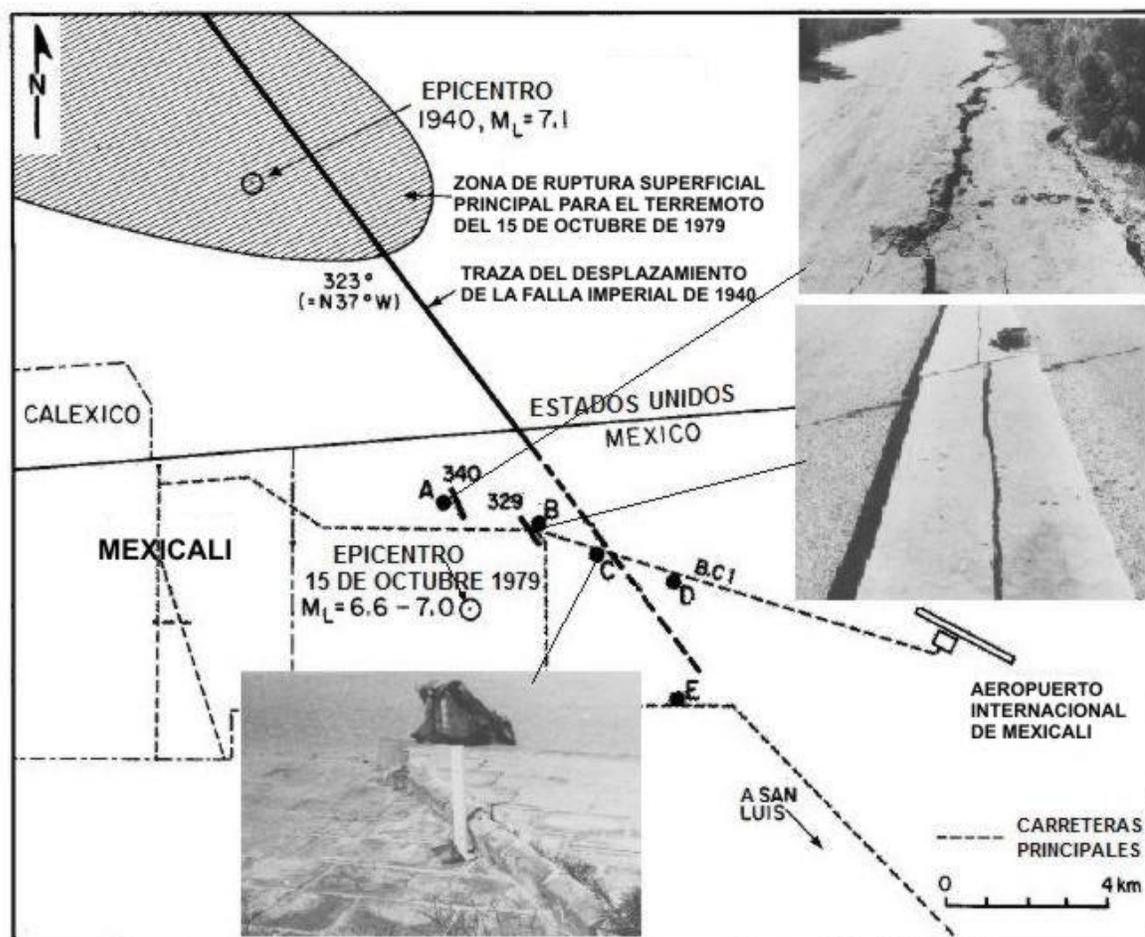


Figura 12. Localización de las fracturas indicadas en el área este de Mexicali causadas por el terremoto de 1979. Los puntos A hasta E muestran evidencia de fisuras y desplazamientos: A presenta fisuras sobre la vía, B presenta fisuras en una autopista pavimentada y C presenta una fisura y un levantamiento vertical en la acera de un cementerio recién revestido de adoquines en 1979 (Modificado de Vonder, 1982).

En el terremoto del 8 de junio de 1980 se reportaron daños en casas, cultivos, carreteras, vías del tren, puentes, canales de riego y grietas en el suelo con deslizamientos horizontales y verticales (Prince *et al.*, 1982; Sharp, 1982b; Suarez *et al.*, 1982). En general, el daño causado por el terremoto creció substancialmente desde Olachea hasta Pescaderos y decreció al sur de Pescaderos (figura 13); no se observaron daños severos en Coahuila y Mesa (Suarez *et al.*, 1982). La mayoría de los daños de obras de ingeniería se

concentraron en un área relativamente pequeña de unos 30 km de largo por 6 a 8 kilómetros de ancho, siguiendo el trazo de la falla de Cerro Prieto, empezando cerca de 2 km al sureste del campo geotérmico de Cerro Prieto (figura 13). En esta zona, la estructura más alta dañada fue la torre de una iglesia de concreto que tuvo que ser demolida pocos días después del terremoto (Prince *et al.*, 1982).

El mayor daño en las áreas de cultivo fue en Pescaderos donde la destrucción fue muy alta; también en esta zona, las casas de adobe fueron destruidas. En una escuela de un piso con marcos de acero, se encontraron fisuras, grietas en las paredes y una sección no reforzada se colapsó (Prince *et al.*, 1982). Las vías del tren fueron deformadas (punto C de la figura 13) y los puentes se vieron afectados a tal punto que el tráfico ferroviario fue interrumpido por varios días (Suárez *et al.*, 1982).

Se formaron grietas en el suelo cerca de los pueblos de Delta, de Pescaderos, Murguía y en el ejido Saltillo, las cuales se muestran en la figura 13 (Prince *et al.*, 1982). En el Ejido Saltillo hubo desplazamientos horizontales y verticales (punto A de la figura 13). En la carretera Pascualitos–Pescaderos, una grada en el pavimento tuvo un desplazamiento vertical de al menos dos metros de ancho (Sharp, 1982b). En Delta aparecieron grietas de aproximadamente 100 m de longitud y 65m de separación entre cada grieta encontrada; además hubo daños en el canal de riego Delta Número Uno. La fractura más larga encontrada se muestra en el punto B de la figura 13 que está cerca de los canales de riego o drenaje (Prince *et al.*, 1982).

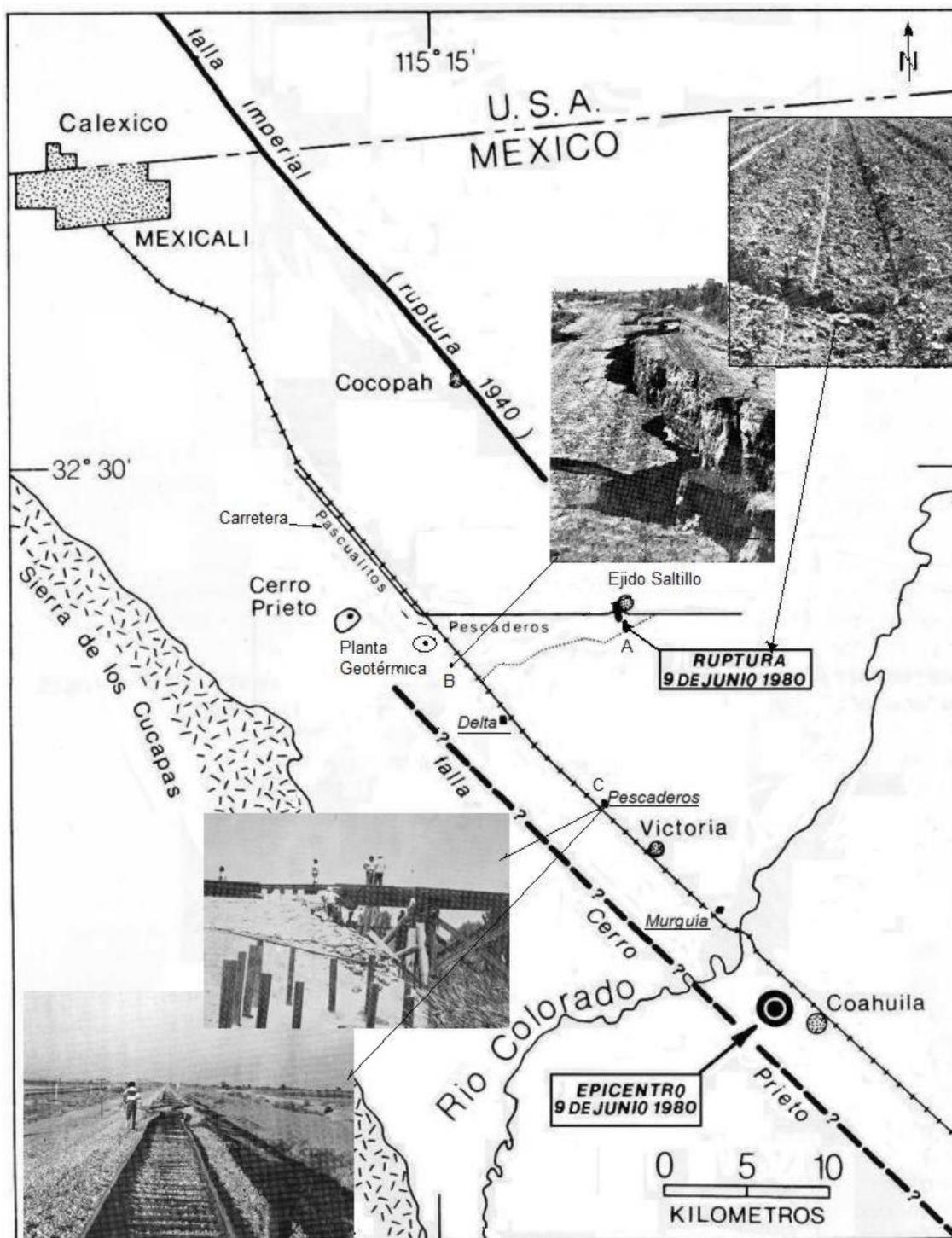


Figura 13. Localización de los daños en el sureste de Mexicali causados por el terremoto de 1980. El punto A muestra un desplazamiento vertical en Saltillo, el punto B muestra la fractura más larga encontrada a 2 kilómetros de la planta geotérmica Cerro Prieto. El punto C muestra los daños en las vías del tren y un puente en Pescaderos (Modificado de Sharp, 1982b con información de Suárez et al., 1982).

Los terremotos en el Valle Mexicali-Imperial, son causados por una frontera de rumbo, llamada así por el tipo de movimiento relativo entre las placas de Norte América y del Pacífico (Anderson y Bodin, 1987). En este Valle, los terremotos más importantes están asociados a la fallas de Cerro Prieto e Imperial. Un resumen de estos sismos se presenta en la tabla I y en la figura 4 (Anderson y Bodin, 1987; Ebel *et al.*, 1978; Archuleta *et al.*, 1982; Frez, 1982). En la última década han ocurridos muchos sismos con menores magnitudes asociados a la falla de Cerro Prieto (Suárez *et al.*, 2001)

Tabla I. Sismicidad histórica del Valle de Mexicali: se indica la fecha, las coordenadas de los epicentros y la longitud de ruptura. Con magnitudes mayores o iguales a 6.0. Mb: Magnitud de ondas de cuerpo; Mw: Magnitud de momento y LR: longitud de ruptura (Frez *et al.*, 1991).

Fecha	Latitud	Longitud	Mb	Mw	LR (km)
1852-11-29	32.50	-115.00	-	6.5	-
1875-11-15	32.50	-115.50	-	6.2	-
1906-04-19	32.90	-115.50	-	6.2	-
1915-06-23	32.80	-115.50	-	6.0	-
1915-11-21	32.00	-115.00	6.6	7.1	50
1934-12-31	32.20	-115.00	7.1	7.1	100
1940-05-19	32.73	-115.50	6.7	7.0	65
1966-08-07	31.80	-114.50	6.3	6.3	30
1979-10-15	32.64	-115.30	6.6	6.5	50
1980-06-09	32.21	-115.00	6.1	6.4	32

II.3 Ecuaciones predictivas

El efecto de un terremoto sobre un punto en la superficie de la tierra que describimos como la respuesta sísmica del suelo, depende básicamente de tres factores: la fuente, la trayectoria y el sitio. Donde no se dispone de registros de las vibraciones inducidas por terremotos fuertes, como es el caso de la zona urbana de Mexicali, es necesario recurrir a métodos de predicción de los máximos movimientos del suelo con el propósito de valorar la respuesta sísmica. Estos métodos se basan en el empleo de *ecuaciones predictivas*, en las que suelen combinarse los tres factores mencionados arriba,

mediante una ecuación paramétrica cuyos coeficientes son determinados mediante el análisis estadístico de grandes conjuntos de registros de terremotos en alguna región particular. Suelen ser también empleadas en otras regiones con características sismotéctonicas similares a las de la región donde se originaron (Acosta *et al.*, 2007). Las ecuaciones predictivas permiten estimar el movimiento del suelo en términos de la magnitud, la distancia y las condiciones de sitio. Dependiendo del proceso seguido para derivarlas, estas ecuaciones pueden estimar el movimiento del terreno en el nivel superficial externa o a nivel de roca, es decir, debajo de los sedimentos.

En las ecuaciones predictivas más usuales, la fuente es expresada por la magnitud del terremoto; la trayectoria por medio de las leyes de atenuación inelástica y expansión geométrica, y el efecto de sitio por medio de funciones de algún parámetro físico del material cercano a la superficie, tal como la velocidad de las ondas sísmicas de corte en la estratigrafía somera, β_{30} , (Joyner y Fumal, 1985). Los detalles de la inclusión de estos tres factores en las ecuaciones predictivas empleadas en este trabajo son discutidos a continuación.

La magnitud más apropiada para expresar el efecto de fuente es la de momento (Hanks y Kanamori, 1979), ya que tiene la ventaja de corresponder a una propiedad física bien definida de la fuente y no presenta problemas de saturación de la escala (Choy y Boatwright, 1995)

La atenuación y la expansión geométrica incorporan una distancia como variable independiente. Los estudios sobre ecuaciones predictivas consideran esta distancia medida de diferentes maneras: del hipocentro a la estación, del epicentro a la estación, de la zona de radiación de mayor energía a la estación, de la ruptura en superficie de la falla a la estación, de la proyección de la ruptura en la superficie a la estación (Shakal y Bernreuter, 1981; Boore y Joyner, 1982). Campbell (1981) considera la distancia más corta de la estación a la zona de ruptura en superficie ya que representa una definición físicamente significativa para terremotos que tienen zonas de ruptura extensas. Joyner y Boore (1981) consideran

esta distancia como la distancia más corta desde la estación a la proyección en superficie de la ruptura de la falla. Debido a que la ruptura en superficie de la falla puede extenderse por decenas de kilómetros, la distancia medida por Campbell (1981) es válida para magnitudes grandes. Sin embargo, para magnitudes más pequeñas, la ruptura de la falla puede estar debajo de la superficie, en cuyo caso la medida de la distancia propuesta por Joyner y Boore (1981) es la más adecuada y la más utilizada para las ecuaciones predictivas.

Al propagarse la señal sísmica, ésta recibe la influencia de los materiales cercanos a la superficie; esto es conocido como el *efecto de sitio* y su principal manifestación, desde el punto de vista de los daños a las estructuras civiles, es la amplificación del movimiento del suelo en los materiales terrestres blandos. Numerosos estudios han confirmado la fuerte influencia que las condiciones geológicas locales tienen sobre esa amplificación (Darragh y Shakal, 1991; Bard, 1995; Chávez-García y Cuenca, 1998; Riepl *et al.*, 1998).

Las condiciones locales del suelo deben ser caracterizadas de una manera apropiada y consistente para calcular el efecto de sitio. Los investigadores del efecto de sitio han propuesto varias clasificaciones de los suelos para explicar las diferencias observadas en las amplificaciones del movimiento de la superficie terrestre. Estas clasificaciones incluyen las siguientes:

- Clasificaciones simples de roca y suelo (Trifunac y Brady, 1976),
- Clasificaciones basadas en la compactación y grosor de los depósitos sedimentarios someros (Abrahamson y Shedlock, 1997),
- Clasificaciones basadas en la edad de las formaciones geológicas superficiales (Joyner y Fumal, 1984; Aki, 1988),
- Clasificaciones más recientes que proponen relaciones cuantitativas, generalmente empíricas, entre la amplificación de sitio y algún parámetro físico de los materiales del suelo.

Entre estas últimas relaciones, se encuentran las basadas en el parámetro de *razón de vacío* (Rogers *et al.*, 1985), módulo de corte, o valor de la velocidad de propagación de

ondas de corte en la estratigrafía somera (Fumal y Tinsley, 1985; Abrahamson y Silva, 1997). Joyner y Fumal (1985) expresan el efecto de sitio mediante la expresión:

$$S = C_6 \log\left(\frac{V_s}{V_0}\right) \quad (1)$$

Donde V_0 es una velocidad de referencia con respecto a la cual se mide el efecto de sitio. V_s es la velocidad promedio de la onda sísmica de corte en la capa superficial, con un grosor de $\frac{1}{4}$ de longitud de la onda sísmica incidente o aproximadamente, dentro de los primeros 30 m del subsuelo. C_6 es un parámetro determinado por regresión, mostrado en la tabla III. Esta es la aproximación empleada en este trabajo.

El efecto de amplificación de la señal sísmica en depósitos aluviales comparados con la amplitud en roca puede ser muy significativo y constituir el principal responsable de los daños a las estructuras civiles (Joyner *et al.*, 1981). Esta consideración es muy importante para el suelo de la ciudad de Mexicali, conformada principalmente por aluvión, lo cual se aprecia en la figura 2.

Diferentes autores han desarrollados ecuaciones empíricas para las diferentes partes del mundo de acuerdo a las distintas regiones tectónicas activas. Para el oeste de Norteamérica, Campbell (1981) desarrolló ecuaciones empíricas para sismos que tienen mecanismos de fallas inversas, utilizando datos de distintas partes del mundo que fueran similares a los sismos de intraplaca que ocurrieron en el oeste de Norteamérica. Joyner y Boore (1981) desarrollaron relaciones empíricas con datos del oeste de Norteamérica. Boore *et al.* (1997) mejoraron las ecuaciones propuestas en Joyner y Boore (1981 y 1994) con datos del oeste de Norteamérica para fallas inversa de rumbo y mecanismos no identificados. Estos autores incluyeron en sus estudios datos del sismo de 1979 del Valle Imperial.

Para la región del presente estudio, se buscaron ecuaciones predictivas que fuesen válidas para su régimen sismotectónico. Las ecuaciones predictivas encontradas fueron las desarrolladas por Boore *et al.* (1997) y Joyner y Fumal (1985); estas ecuaciones son apropiadas para esta región ya que fueron obtenidas con análisis de regresión de datos sísmicos del oeste de Norteamérica. Estas ecuaciones consideran únicamente los movimientos horizontales del suelo, ya que éstos son los más peligrosos para las estructuras civiles debido a que los esfuerzos verticales son relativamente sencillos de disipar hacia la cimentación.

La ecuación predictiva de Boore *et al.* (1997) sirve para estimar los valores máximos horizontales de la aceleración y del espectro de respuesta de pseudoaceleración. Esta ecuación es:

$$\ln Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \ln(r) + b_v \ln\left(\frac{V_s}{V_0}\right) \quad (2)$$

$$\text{donde: } r = \sqrt{d^2 + h^2} \quad \text{y} \quad b_1 = \begin{cases} b_{1SS} & \text{Mecanismo de rumbo} \\ b_{1RS} & \text{Mecanismo inverso} \\ b_{1ALL} & \text{Si el mecanismo no es identificado} \end{cases} \quad (3)$$

Y : es el parámetro del movimiento del suelo a determinar, aceleración en cm/s^2 , o espectro de respuesta de pseudoaceleración en g .

M : magnitud de momento adimensional.

d : distancia al punto más cercano sobre la proyección de la falla en la superficie, en km .

h : profundidad obtenida en análisis de regresión (tabla 2).

V_s : promedio de la velocidad de onda de corte a 30 m, en m/s .

La tabla II contiene los coeficientes b_1 , b_2 , b_3 , b_5 , b_v , V_0 y h de la ecuación (2). Para determinar la aceleración horizontal máxima se utilizan los coeficientes correspondientes al $T=0.0$. Para determinar las amplitudes máximas de los espectros de respuesta, la ecuación (2) se usará para periodos de 0.1 a 2 segundos y un amortiguamiento de 5%. Esta ecuación no puede ser usada para predecir movimientos a distancias mayores de 80 km , o magnitudes menores de 5.5 o mayores de 7.5.

Tabla II. Coeficientes suavizados usados en la ecuación (2) para estimar espectros de respuesta de pseudoaceleración (g) en componentes horizontales aleatorias con 5% de amortiguamiento. Los valores para T=0.00 son los coeficientes para la aceleración horizontal máxima (Boore *et al.*, 1997).

<i>Período</i>	b_{ISS}	b_{IRS}	b_{IALL}	b_2	b_3	b_5	b_V	V_0	h
0.00	-0.313	-0.117	-0.242	0.527	0.000	-0.778	-0.371	1396	5.57
0.10	1.006	1.087	1.059	0.753	-0.226	-0.934	-0.212	1112	6.27
0.11	1.072	1.164	1.130	0.732	-0.230	-0.937	-0.211	1291	6.65
0.12	1.109	1.215	1.174	0.721	-0.233	-0.939	-0.215	1452	6.91
0.13	1.280	1.246	1.200	0.711	-0.233	-0.939	-0.221	1596	7.08
0.14	1.135	1.135	1.208	0.707	-0.230	-0.938	-0.228	1718	7.18
0.15	1.128	1.264	1.204	0.702	-0.228	-0.937	-0.238	1820	7.23
0.16	1.112	1.257	1.192	0.702	-0.226	-0.935	-0.248	1910	7.24
0.17	0.090	1.242	1.173	0.702	-0.221	-0.933	-0.258	1977	7.21
0.18	1.063	1.222	1.151	0.705	-0.216	-0.930	-0.270	2037	7.16
0.19	1.032	1.198	1.122	0.709	-0.212	-0.927	-0.281	2080	7.10
0.20	0.999	1.170	1.089	0.711	-0.207	-0.924	-0.292	2118	7.02
0.22	0.925	1.104	1.019	0.721	-0.198	-0.918	-0.315	2158	6.83
0.24	0.847	1.033	0.941	0.732	-0.189	-0.912	-0.338	2178	6.62
0.26	0.764	0.958	0.861	0.744	-0.180	-0.906	-0.360	2173	6.39
0.28	0.681	0.881	0.780	0.758	-0.168	-0.899	-0.381	2158	6.17
0.30	0.598	0.803	0.700	0.769	-0.161	-0.893	-0.401	2133	5.94
0.32	0.518	0.725	0.619	0.783	-0.152	-0.888	-0.420	2104	5.72
0.34	0.439	0.648	0.540	0.794	-0.143	-0.882	-0.438	2070	5.50
0.36	0.361	0.570	0.462	0.806	-0.136	-0.877	-0.456	2032	5.30
0.38	0.286	0.495	0.385	0.820	-0.127	-0.872	-0.472	1995	5.10
0.40	0.212	0.423	0.311	0.831	-0.120	-0.867	-0.487	1954	4.91
0.42	0.140	0.352	0.239	0.840	-0.113	-0.862	-0.502	1919	4.74
0.44	0.073	0.282	0.168	0.852	-0.108	-0.858	-0.516	1884	4.57
0.46	0.005	0.217	0.102	0.863	-0.101	-0.854	-0.529	1849	4.41
0.48	-0.058	0.151	0.036	0.873	-0.097	-0.850	-0.541	1816	4.26
0.50	-0.122	0.087	-0.025	0.884	-0.090	-0.846	-0.553	1782	4.13
0.55	-0.268	-0.063	-0.176	0.907	-0.078	-0.837	-0.579	1710	3.82
0.60	-0.401	-0.203	-0.314	0.928	-0.069	-0.830	-0.602	1644	3.57
0.65	-0.523	-0.331	-0.440	0.946	-0.060	-0.823	-0.622	1592	3.36
0.70	-0.634	-0.452	-0.555	0.962	-0.053	-0.818	-0.639	1545	3.20
0.75	-0.737	-0.562	-0.661	0.979	-0.046	-0.813	-0.653	1507	3.07
0.80	-0.829	-0.666	-0.760	0.992	-0.041	-0.809	-0.666	1476	2.98
0.85	-0.915	-0.761	-0.851	1.006	-0.037	-0.805	-0.676	1452	2.92
0.90	-0.993	-0.848	-0.933	1.018	-0.035	-0.802	-0.685	1432	2.89
0.95	-1.066	-0.932	-1.010	1.027	-0.032	-0.800	-0.692	1416	2.88
1.00	-1.133	-1.009	-1.080	1.036	-0.032	-0.798	-0.698	1406	2.90
1.10	-1.249	-1.145	-1.208	1.052	-0.030	-0.795	-0.706	1396	2.99
1.20	-1.345	-1.265	-1.315	1.064	-0.032	-0.794	-0.710	1400	3.14
1.30	-1.428	-1.370	-1.407	1.073	-0.035	-0.793	-0.711	1416	3.36
1.40	-1.495	-1.460	-1.483	1.080	-0.039	-0.794	-0.709	1442	3.62
1.50	-1.552	-1.538	-1.550	1.085	-0.044	-0.796	-0.704	1479	3.92
1.60	-1.598	-1.608	-1.605	1.087	-0.051	-0.798	-0.697	1524	4.26
1.70	-1.634	-1.668	-1.652	1.089	-0.058	-0.801	-0.689	1581	4.62
1.80	-1.663	-1.763	-1.720	1.087	-0.067	-0.804	-0.679	1644	5.01
1.90	-1.685	-1.763	-1.720	1.087	-0.074	-0.808	-0.667	1714	5.42
2.00	-1.699	-1.801	-1.743	1.085	-0.085	-0.812	-0.655	1795	5.85

Si sustituimos en la ecuación (2) los coeficientes correspondientes a la estimación de la aceleración máxima horizontal, corregida por efecto de sitio, resulta la siguiente ecuación:

$$\ln A = -0.242 + 0.527(M - 6) - 0.778 \ln(r) - 0.371 \ln\left(\frac{V_s}{1396}\right) \quad (4)$$

La ecuación (4) no tiene el término cuadrático correspondiente al efecto de fuente. También se observa que el efecto de sitio (último término) desaparece para una velocidad promedio dentro de los primeros 30 m, $V_s=1396$ m/s, lo que significa que, desde el punto de vista sísmico, la roca del basamento está caracterizada por esa velocidad; para velocidades menores que 1396, se produce una contribución positiva a la aceleración, o sea, una amplificación.

Para estimar la velocidad pico de la componente horizontal, en cm/s, y el máximo del espectro de respuesta de pseudovelocidad, en cm/s, se utiliza la ecuación que Joyner y Fumal (1985) obtuvieron con registros de movimientos fuertes someros en el oeste de Norteamérica. La ecuación es la siguiente:

$$\log V = C_0 + C_1(M - 6) + C_3 \log(r) + C_4(r) + C_6 \log\left(\frac{V_s}{V_o}\right) \quad (5)$$

donde

$$r = \sqrt{d^2 + h^2} \quad (6)$$

V : es el parámetro del movimiento del suelo a determinar, velocidad o pseudovelocidad, en cm/s.

M : magnitud de momento.

d : distancia al punto más cercano sobre la proyección de la falla en superficie, en km.

h : profundidad obtenida en análisis de regresión (tabla 3).

V_s : promedio de la velocidad de onda de corte a 30 m, en m/s.

La tabla III contiene los coeficientes C_0 , C_1 , C_3 , C_4 , C_6 , V_0 y h de la ecuación (5). Los coeficientes C_6 y V_0 no se incluyen para los primeros períodos porque estadísticamente no son significativos; es decir, no hay suficientes datos para una conclusión significativa.

Tabla III. Parámetros de la ecuación (5) para estimar el máximo de la componente horizontal orientada al azar del espectro de respuesta de pseudovelocity (cm/s) con un amortiguamiento de 5%. Al final, se encuentran los coeficientes para calcular el valor pico de la velocidad horizontal en cm/s (Joyner y Fumal, 1985).

<i>Período (s)</i>	C_0	C_1	h (km)	C_3	C_4 (km-1)	V_0 (m/s)	C_6
Espectro de respuesta de pseudovelocity							
0.10	2.16	0.25	11.3	-1.00	-0.0073	-	-
0.15	2.40	0.30	10.8	-1.00	-0.0067	-	-
0.20	2.46	0.35	9.6	-1.00	-0.0063	-	-
0.30	2.47	0.42	6.9	-1.00	-0.0058	590	-0.28
0.40	2.44	0.47	5.7	-1.00	-0.0054	830	-0.33
0.50	2.41	0.52	5.1	-1.00	-0.0051	1020	-0.38
0.75	2.34	0.60	4.8	-1.00	-0.0045	1410	-0.46
1.00	2.28	0.67	4.7	-1.00	-0.0039	1580	-0.51
1.50	2.19	0.74	4.7	-1.00	-0.0026	1620	-0.59
2.00	2.12	0.79	4.7	-1.00	-0.0015	1620	-0.64
3.00	2.02	0.85	4.7	-0.98	0.0000	1550	-0.72
4.00	1.96	0.88	4.7	-0.95	0.0000	1450	-0.78
Velocidad pico							
	2.09	0.49	4.0	-1.00	-0.0026	1190	-0.45

Como ejemplo del empleo de la tabla III, a continuación se muestra la ecuación para la velocidad pico horizontal, corregida por el efecto de sitio:

$$\log V = 2.09 + 0.49(M - 6) - \log(r) - 0.0026(r) - 0.45 \log\left(\frac{V_s}{1190}\right) \quad (7)$$

II.4 Estimación de las intensidades de Mercalli esperadas

Además de los movimientos máximos del suelo, también es de interés obtener la estimación de la intensidad sísmica, ya que ésta guarda una relación más estrecha con los

daños estructurales provocados por los terremotos. La intensidad sísmica, generalmente la de Mercalli modificada (IMM), se estima con la velocidad y la aceleración máxima del suelo. En la literatura, existen varias ecuaciones empíricas para este fin; una de las más tradicionales es la propuesta por Esteva y Rosenblueth (1964) y por Rosenblueth (1964), que utiliza como parámetro la velocidad máxima del suelo:

$$\text{donde:} \quad IMM = \frac{\log(14V)}{2V} \quad (8)$$

La ecuación (8) ha sido utilizada en otros estudios realizados en México como, por ejemplo, Soares (2003) en la aplicación de la microzonación sísmica a la seguridad de estructuras críticas en la ciudad de Ensenada; Montalvo (1996) y Acosta y Montalvo (1997), en la microzonificación sísmica de Tijuana. Trifunac y Brady (1975) correlacionaron tanto la aceleración máxima del suelo como la velocidad máxima del suelo con la IMM:

$$IMM = \frac{\log V_H + 0.63}{0.251} \quad (9)$$

donde V_H es la velocidad pico horizontal del suelo (cm/s). Esta ecuación es válida para $IMM \geq VII$.

$$IMM = \frac{\log A_H - 0.014}{0.30} \quad (10)$$

donde A_H es la aceleración pico horizontal del suelo (cm/s^2). Válida para $IMM < VII$.

Wald *et al.* (1999) encontraron que una combinación de las ecuaciones (9) y (10) es la más adecuada para reproducir distribuciones observadas en IMM. Esta combinación utiliza velocidades máximas para estimar intensidades mayores que VII y aceleraciones máximas para estimar intensidades menores que VII. Esto es consistente con el hecho de que las intensidades altas son determinadas, principalmente, a partir de la observación de daños (proporcionales a la velocidad del suelo); en tanto que las estimaciones de intensidades bajas dependen de cómo fueron sentidas por las personas, que son más sensibles a aceleraciones del suelo.

Durante la etapa de procesamiento, se prueban las tres ecuaciones anteriores para determinar cuál es la relación que reproduce mejor las IMM observadas en el Valle Mexicali-Imperial durante sismos fuertes del pasado.

II.5 Estimación de la velocidad de las ondas de corte

En el proyecto dentro del cual está inscrito este trabajo de tesis, *Microzonificación sísmica de la zona urbana de Mexicali*, se realizó un estudio para obtener la distribución de los valores de la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 m del subsuelo (V_S , en las ecuaciones (2) a (5), dentro de la ciudad de Mexicali (Acosta *et al.*, 2007). Aquí se describe sucintamente el procedimiento.

Los pozos geotécnicos son caros y los métodos tradicionales de prospección (refracción/reflexión) de velocidad de las ondas de corte tienen fuertes limitaciones cuando se trata de actuar en zonas urbanas donde se prefiere métodos no destructivos. Por ello, existe gran interés en alternativas de prospección rápidas y de bajo costo que puedan operar en sitios con niveles de ruido sísmico alto. Los métodos sismológicos que utilizan ruido sísmico como señal significativa han mostrado ser útiles en esas condiciones (Louie, 2001; Shapiro *et al.*, 2005; Weaver y Lobkis, 2001, 2004; Campillo y Paul, 2003; Stephenson *et al.*, 2005; Aki, 1957); estos métodos intentan conocer las propiedades dispersivas del medio mediante un registro adecuado de ondas superficiales y, de ahí, inferir la estructura de las velocidades de onda de corte.

En este trabajo se ha empleado el método que utiliza las medidas de dispersión de ondas superficiales (Shapiro *et al.*, 2005) con registros de microtemores. Esta es una extensión afortunada (Weaver y Lobkis, 2001, 2004; Campillo y Paul, 2003) del trabajo pionero de Aki (1957), quien propuso la medición de microtemores simultáneamente en varias estaciones, y la obtención de la curva de dispersión de la velocidad de fase de ondas

de Rayleigh o de Love, mediante el cálculo del coeficiente de correlación espacial. El método aplicado tiene los siguientes pasos:

Paso 1). En cada sitio de estudio, se registra la componente vertical de la velocidad del suelo, con un arreglo lineal de 24 sensores con separación constante, duración de 1200 segundos e intervalo de muestreo de 4 milisegundos.

Paso 2). Se estiman las funciones de correlación entre pares de estaciones, para todas las combinaciones de distancias lo que produce un promedio para cada distancia posible dentro del arreglo lineal de sensores. La duración de las ventanas de correlación es de 20 segundos; el promedio para la distancia más corta, por ejemplo, está formado por 1380 funciones de correlación. La figura 14 ilustra la aplicación de este paso en la estación PO3 de Mexicali.

Paso 3). La dispersión de las ondas Rayleigh resulta de la aplicación de la técnica descrita por McMechan y Yedlin (1981) y por Mokhtar *et al.* (1988), la cual crea un plano de amplitudes de apilamiento para intervalos de velocidades de fase y de frecuencias, definidos de acuerdo a la escala del problema estratigráfico (plano C-T), aplicada mediante el programa SACPOM96 del paquete de Computer Programs in Seismology (Herrmann y Ammon, 2004a). Esta técnica de apilamiento es aplicada sobre el conjunto de series de correlación cruzada de microtemores, descrito en el paso anterior. La figura 15 presenta el plano C-T correspondiente al ensamble de correlaciones de la figura 14. Los puntos que forman la curva de dispersión son fácilmente identificables como alineaciones de puntos de máxima amplitud (color rojo en los gráficos de los planos), que corresponden a la forma 'común' de dispersión de velocidad de fase.

Paso 4). Para obtener un modelo estratigráfico a partir de la curva de dispersión, se emplea el programa SURF96 del paquete de Computer Programs in Seismology (Herrmann y Ammon, 2004b), el cual tiene implantado un esquema iterativo de inversión pesada. La figura 16 muestra el resultado de la inversión de la curva de dispersión obtenida en el paso

previo: a la izquierda se encuentra el modelo estratigráfico final de velocidad de onda de corte (línea roja), junto al modelo inicial propuesto (línea azul); a la derecha, se aprecia la curva de dispersión teórica correspondiente al modelo final, sobrepuesta a las observaciones.

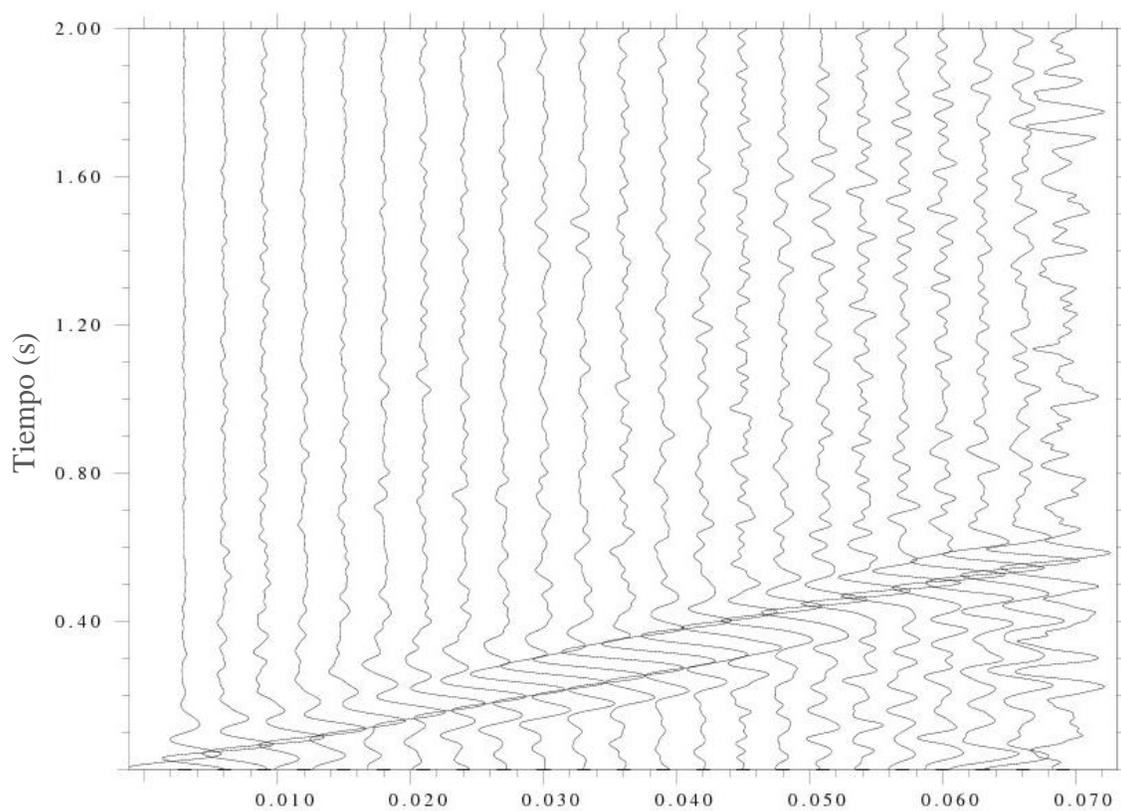


Figura 14. Ilustración del proceso de correlación cruzada realizado con las 24 trazas de un perfil de sensores verticales, con separación constante de 3 m, en el sitio PO3, en la zona urbana de Mexicali.

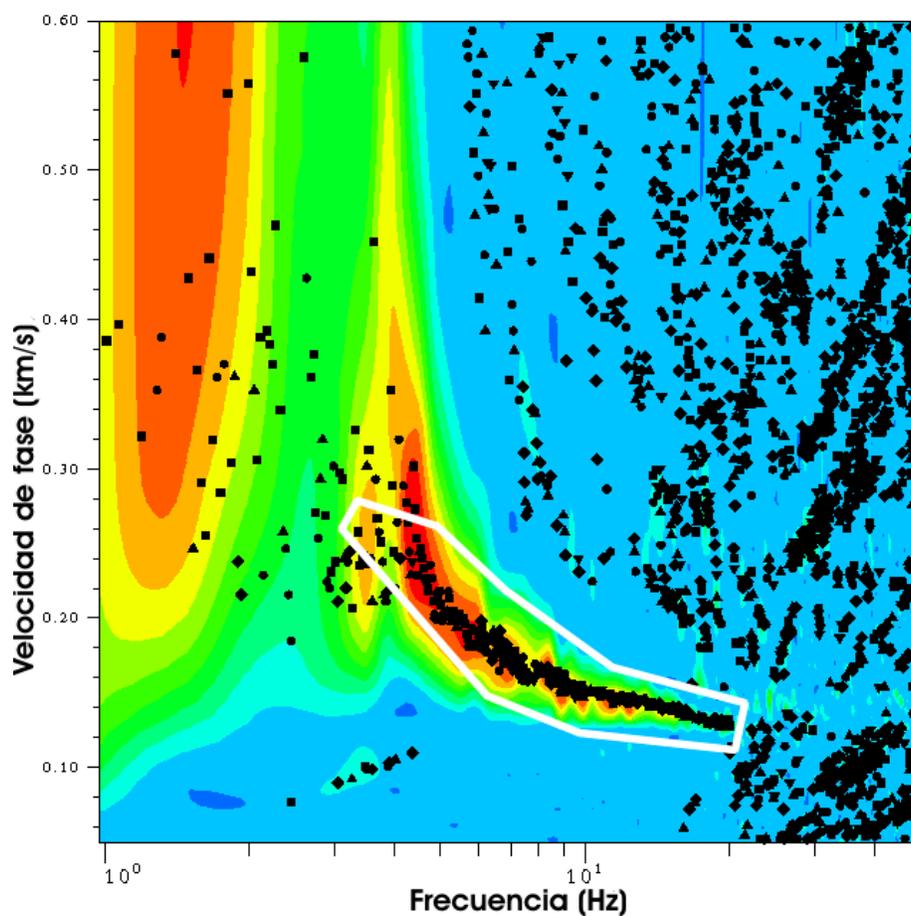


Figura 15. Transformación del ensamble de correlaciones mostradas en la figura anterior, al plano C-T. El polígono blanco encierra los puntos elegidos como representativos de la dispersión de velocidad de fase para el modo fundamental (modo 0) de las ondas Rayleigh; esa curva se comporta de la manera esperada: velocidades de fase bajas para frecuencias altas que se incrementan hacia las frecuencias bajas.

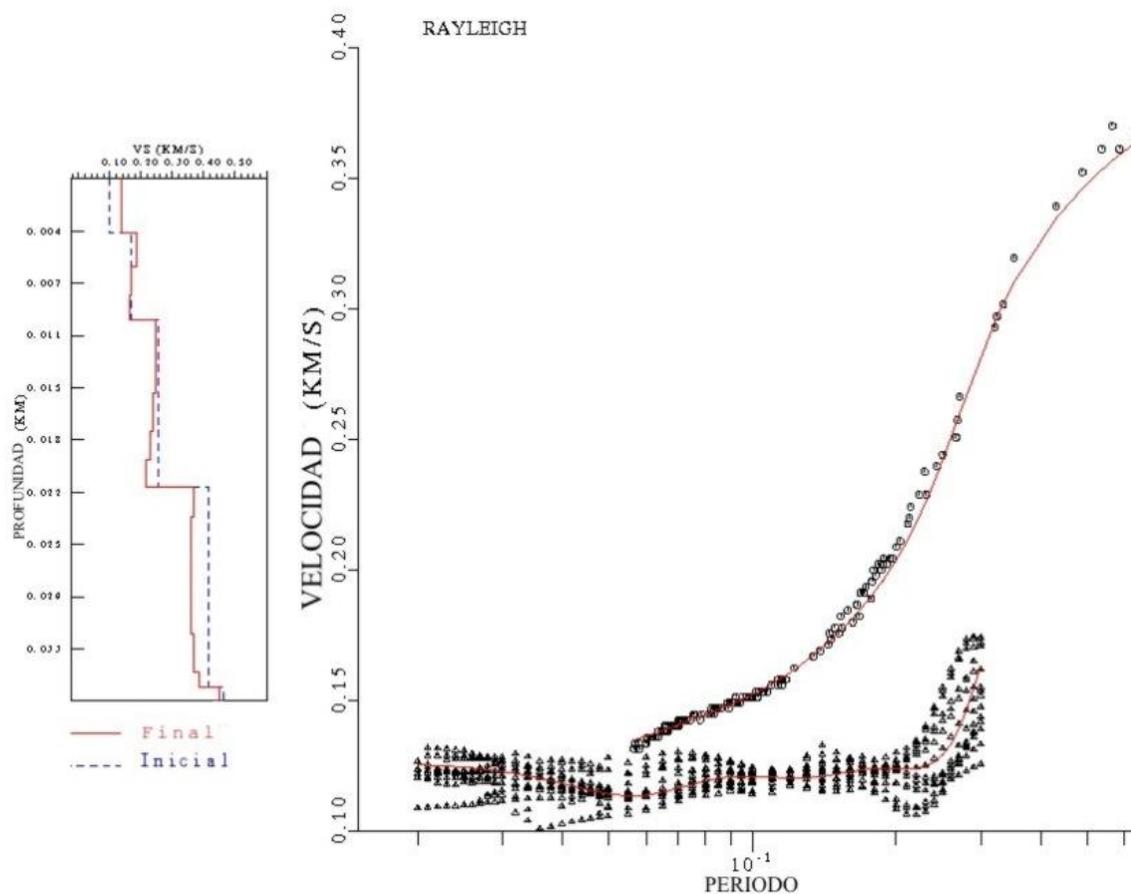


Figura 16. Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de corte, en el sitio PO3. A la izquierda, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha, aparecen las observaciones para la dispersión de velocidad de fase (círculos) y de grupo (triángulos) y sobrepuestas, con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.

II.6 Clasificación de estructuras críticas

Las estructuras críticas y estratégicas son aquellas que son imprescindibles para el funcionamiento de un centro urbano, tanto antes como después de un terremoto. También quedan incluidas aquellas estructuras cuyo desperfecto por un sismo pudieran acarrear peligro adicional sobre la población o el medio ambiente. En esta clasificación, están incluidos los edificios según su funcionamiento como: aeropuertos, albergues, edificios de gobierno, estaciones de bomberos, de policía o de seguridad pública, hospitales, industrias,

y líneas vitales. Dentro de estas últimas se consideran las carreteras, plantas potabilizadoras, puentes, red de acueductos, subestaciones eléctricas y de telecomunicaciones. Se hizo un catálogo de estas estructuras que se clasificaron de acuerdo a su funcionamiento. La ubicación de las estructuras se muestra en la figura 17.

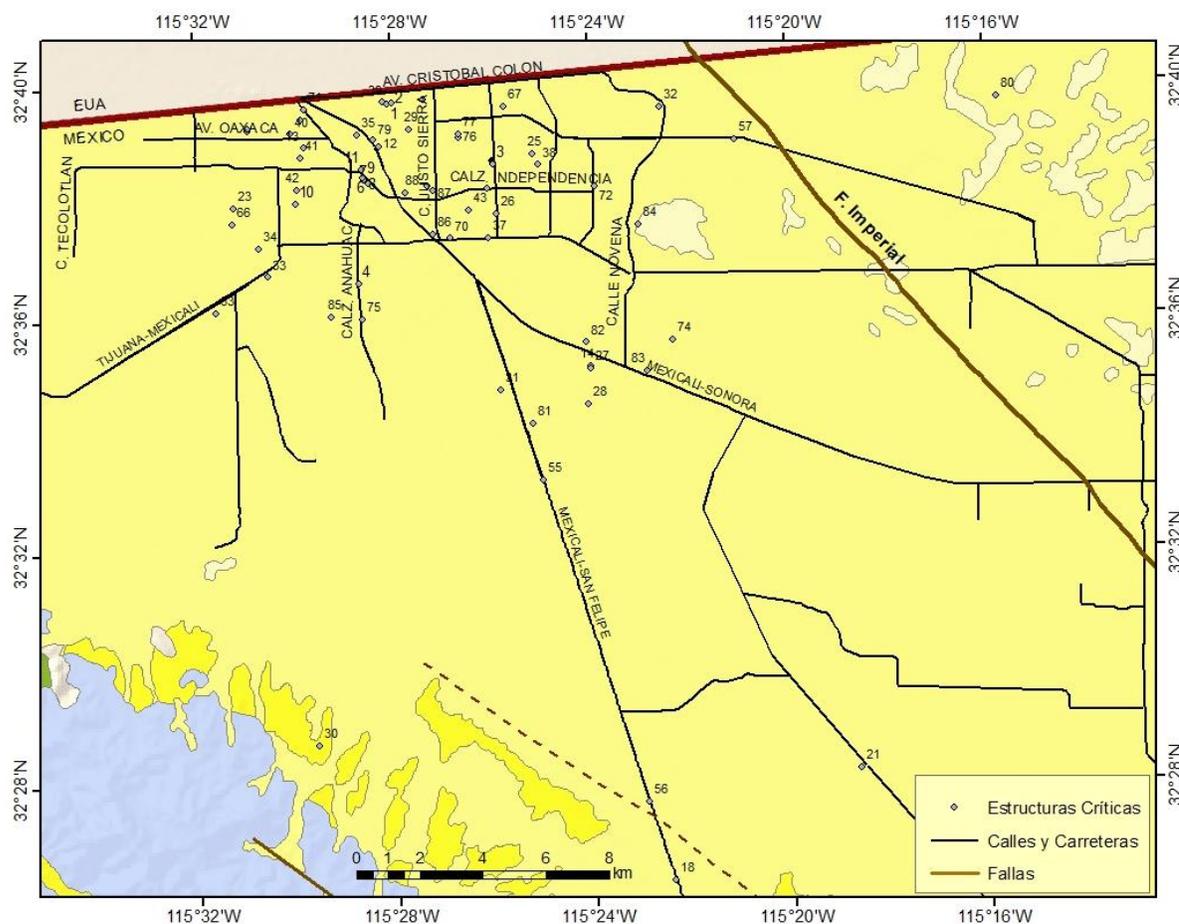


Figura 17: Ubicación de estructuras críticas de Mexicali. Los números representan la identificación de cada estructura y los colores en el mapa representan la geología descrita en el capítulo I.

Las estructuras son diseñadas usando principios de ingeniería para soportar los impactos ambientales, los cuales están indicados en un código de construcción para cada ciudad. El tipo de construcción de cada estructura incluye los siguientes parámetros: materiales de construcción, suelo de cimentación, cimentación de la estructura, peso que debe soportar, sistema estructural de marcos, columnas y vigas, edad, calidad de diseño y

construcción y proximidad con otras estructuras (ATC-13, 1985). El manual ATC-13 (1985) contiene una clasificación de 78 estructuras de acuerdo al tipo de construcción existente en California, estos tipos de construcción son similares a otras ciudades del mundo, pero también existen otros tipos que se adecúan a las necesidades de cada ciudad. La clasificación estructuras críticas de Mexicali de acuerdo a su tipo de construcción y funcionamiento fue obtenida con ayuda de las autoridades de Protección Civil del Estado de Baja California y con el método ATC-13. Esta clasificación aparece en las tablas IV y V.

Tabla IV. Tipos de construcción en las estructuras críticas de Mexicali.

No	TIPO DE CONSTRUCCIÓN	DESCRIPCIÓN
1	CR	Marco dúctil de concreto reforzado
2	CR y MA con MR	Marco dúctil de concreto y marco de acero con mampostería reforzada
3	MA	Marco dúctil de acero
4	MAA	Marco de acero arriostreado
5	MA10% y 90%CR	Marco de acero y marco de concreto reforzado
6	MA con MR y lámina	Marco de acero con paredes de mampostería o lámina
7	MR	Mampostería reforzada
8	MR-Ma	Mampostería reforzada con marcos de acero de refuerzo

Tabla V. Catálogo de estructuras críticas. ID: identificación de la estructura en el mapa. TC: tipo de construcción.

ID	CLASIFICACIÓN	NOMBRE	T.C	LONGITUD	LATITUD
1	Hospitales	Clínica 30	CR	-115.4679	32.6619
2	Hospitales	Clínica 31	CR	-115.4663	32.6622
3	Potabilizadoras	PO1 R Culiacán	CR	-115.4323	32.6444
4	Policía	Seguridad Pública	CR	-115.4782	32.6106
5	Edif. De Gob.	Poder Ejecutivo	CR	-115.4759	32.6407
6	Edif. De Gob.	Palacio Municipal	CR	-115.4749	32.6396
7	Edif. De Gob.	Palacio Federal	CR	-115.4746	32.6394
8	Edif. De Gob.	Poder Legislativo	CR	-115.4759	32.6405
9	Edif. De Gob.	Poder Judicial	CR	-115.4760	32.6403
10	Hospitales	ISSSTECALI	CR	-115.4991	32.6336
11	Hospitales	ISSSTE	CR	-115.4766	32.6433
12	Bomberos	Est. de bomberos #1	MR	-115.4709	32.6499
13	Bomberos	Est. de bomberos # 2	MR	-115.4963	32.6499
14	Bomberos	Est. de bomberos # 3	MR	-115.4002	32.5862
15	Bomberos	Est. de bomberos # 4	MR	-115.4343	32.6375
16	Bomberos	Est. de bomberos # 5	MR	-115.5152	32.6547
17	Bomberos	Est. de bomberos # 14	MR	-115.1638	32.2377
18	Bomberos	Est. de bomberos # 19	MA	-115.3739	32.4387
19	Bomberos	Est. de bomberos # 20	MR	-115.3739	32.4387
20	Bomberos	Est. de bomberos # 21	MR	-115.3228	32.2887
21	Bomberos	Est. de bomberos # 22	MR	-115.3108	32.4704
22	Policía	Est. de policía Baja California	MR	-115.5151	32.6553
23	Policía	Est. de policía Nacionalistas	MR	-115.5201	32.6326
24	Policía	Est. de policía km 43	MR	-115.1027	32.2865
25	Policía	Est. de policía Col. Miraflores	MR	-115.4189	32.6473
26	Policía	Est. de policía Col. Indep.	MR	-115.4314	32.6300
27	Policía	Comand. del policía Z. Oriente	MR	-115.4004	32.5857
28	Policía	Est. de policía Col. Robledo	MR	-115.4013	32.5755
29	Policía	Est. de policía Col. Industrial	MR	-115.4608	32.6548
30	Policía	Est. de policía Col. Esperanza	MR	-115.4935	32.4785
31	Policía	Est. de policía Rivera Campestre	MR	-115.4307	32.5798
32	Policía	Est. de policía Compuertas	MR	-115.3757	32.6603
33	Policía	Est. de policía Papago	MR	-115.5087	32.6128
34	Policía	Est. de policía Virreyes	MR	-115.5119	32.6210
35	Policía	Est. de policía Zona Centro	MR	-115.4782	32.6532
36	Cruz roja	Cruz Roja Poniente	CR	-115.4972	32.6575
37	Cruz roja	Cruz Roja Oriente	CR	-115.4341	32.6232
38	Rescate	Rescate Aguiluchos A.C.	MR	-115.4172	32.6441
39	Escuela	Sec # 1 18 de Marzo	MR-Ma	-115.4695	32.6625
40	Escuela	Sec # 4	MA10% y 90%CR	-115.5008	32.6536
41	Escuela	Primaria Vicente Guerrero	MA	-115.4973	32.6468
42	Escuela	Sec # 50 Primaria Patria	CR y MA con MR	-115.4988	32.6377
43	Deportivo	Gimnasio UABC	MAA	-115.4408	32.6314
44	Puentes		P	-114.8195	30.9818
45	Puentes		P	-114.8195	30.9818
46	Puentes		P	-115.1944	31.8992
47	Puentes		P	-115.2204	31.9795
48	Puentes		P	-115.2228	31.9865

Tabla V. (continuación) Catálogo de estructuras críticas. ID: identificación de la estructura en el mapa. TC: tipo de construcción.

ID	CLASIFICACIÓN	NOMBRE	T.C	LONGITUD	LATITUD
49	Puentes		P	-115.2095	31.9456
50	Puentes		P	-115.2172	31.9697
51	Puentes		P	-115.3300	32.3351
52	Puentes		P	-115.0538	32.2423
53	Puentes		P	-115.0512	32.2420
54	Puentes		P	-115.7688	32.5726
55	Puentes		P	-115.4169	32.5539
56	Puentes		P	-115.3824	32.4614
57	Puentes		P	-115.3509	32.6507
58	Puentes		P	-114.9232	32.5244
59	Puentes		P	-114.9283	32.5260
60	Puentes		P	-114.8472	32.5033
61	Puentes		P	-114.7912	30.9631
62	Puentes		P	-114.7912	30.9631
63	Subest. Eléct.	Ahumadita	SE	-115.5264	32.6027
64	Subest. Eléct.	Centro Cívico	SE	-115.6692	32.6451
65	Subest. Eléct.	Carretera Tijuana	SE	-115.6768	32.5952
66	Subest. Eléct.	Col. Nacionalista	SE	-115.5207	32.6280
67	Subest. Eléct.	Cuauhtemoc	SE	-115.4286	32.6608
68	Subest. Eléct.	Cuesta Rumorosa	SE	-115.9402	32.5663
69	Subest. Eléct.	FOVISSTE	SE	-115.4545	32.6383
70	Subest. Eléct.	Lázaro Cárdenas	SE	-115.4469	32.6233
71	Subest. Eléct.	Pueblo Nuevo	SE	-115.4958	32.6609
72	Subest. Eléct.	Xochimilco	SE	-115.3981	32.6376
73	Subest. Eléct.	Toros	SE	-115.4765	32.6409
74	Subest. Eléct.	Tecnológico	SE	-115.3724	32.5936
75	Albergues	Centro dep. Juventud 2000	MA	-115.4769	32.6005
76	Albergues	Auditorio del Estado	CR	-115.4440	32.6522
77	Albergues	Estadio Nido de las Águilas	CR	-115.4439	32.6530
78	Albergues	Museo UABC	CR	-115.4558	32.6632
79	Albergues	Teatro del Estado	CR	-115.4727	32.6516
80	Aeropuerto	Gral. Sánchez López Taboada	CR	-115.2619	32.6618
81	Industria	El Dorado	MA con MR y lám.	-115.4199	32.5701
82	Industria	El Vigía	MA con MR y lám.	-115.4015	32.5930
83	Industria	Nelson	MA con MR y lám.	-115.3812	32.5848
84	Potabilizadoras	PO2 Col. Calles	CR	-115.3833	32.6265
85	Potabilizadoras	PO3 Xochimilco	CR	-115.4876	32.6011
86	Puentes	Láz. Cárdenas y López Mateo	PM	-115.4528	32.6245
87	Puentes	Cal. Independ. López Mateo	PM	-115.4528	32.6369
88	Puentes	Cal. Independ. S. Ferrocarril	PM	-115.4619	32.6365

II.7 Funciones de vulnerabilidad

Las *funciones de vulnerabilidad* expresan de forma continua el nivel esperado de daños en función de algún parámetro que caracterice la acción o sollicitación sísmica. Para expresar el nivel de daños, se utiliza el *factor de daño* definido como el costo de reparación expresado como un porcentaje del costo total de la estructura o instalación considerada. La medida cuantitativa del *factor de daño* se define como:

$$\text{Factor de daño (FD)} = \frac{\text{Costo de reparación} \times 100}{\text{Valor de su reemplazo}} \quad (11)$$

Donde el *costo de reparación* es el monto total necesario para reparar los daños producidos y *valor de reemplazo* es el costo total de la estructura considerada.

El FD toma valores entre el 0% y el 100%, en que el 0% indica que no hay daños y el 100%, un daño total de la estructura. Los intervalos del valor del FD se utilizan para definir calificaciones discretas del daño denominadas *estados de daño*, como aparecen en las tablas VI y VII. Los valores centrales de esos rangos de daños (FCD), son los más probables de ocurrir en cada intervalo y se usan para caracterizar cada uno de los Estados de Daño.

Tabla VI. Clasificación de los intervalos del factor de daño (FD) y factor central de daño (FCD).

Daño	Estado de daño	Intervalo del factor de daño (%) (FD)	Factor central de daño (%) (FCD)
1	Ninguno	0	0
2	Leve	0 – 1	0.5
3	Ligero	1 – 10	5
4	Moderado	10 – 30	20
5	Fuerte	30 – 60	45
6	Mayor	60 – 100	80
7	Destruyivo	100	100

Tabla VII. Descripción del estado de daño.

Daño	Estado de daño	Descripción del daño
1	Ninguno	No existe daño alguno.
2	Leve	Daños menores bien localizados. No requiere reparación.
3	Ligero	Daño bien localizado y significativo de algunas componentes; generalmente no requiere reparación.
4	Moderado	Daño localizado y significativo de varias componentes; requiere reparación.
5	Fuerte	Daño extenso; requiere reparaciones fundamentales.
6	Mayor	Daño principal altamente distribuido que pudiera resultar en la demolición, reparación o modificación de la edificación.
7	Destruccion	Destrucción total de la mayor parte de la estructura.

Las probabilidades de ocurrencia de los *factores centrales de daño* para los diferentes valores de intensidades IMM sirven para construir las matrices de probabilidad de daño, también conocidas como matrices de vulnerabilidad (ATC-13, 1985). El Consejo de Tecnología Aplicada, (ATC-13, 1985) propone matrices de vulnerabilidad que evalúan los daños de terremotos para California. Esta propuesta fue desarrollada a través de un proceso de cuestionarios múltiples involucrando agencias privadas y 58 expertos en ingeniería sísmica. Cada experto respondió por separado, de acuerdo a su experiencia e ignorando las respuestas de los demás. Se desarrollaron matrices de vulnerabilidad para cada uno de los 78 tipos de construcción identificados en California utilizando distribuciones de probabilidades para determinar el grado probable de daños para estructuras sometidas a intensidades IMM de VI a XII. Estas matrices asignan una probabilidad de ocurrencia a cada valor del FCD en términos de la IMM. Las matrices de vulnerabilidad propuestas por el ATC-13 son ampliamente utilizadas para estimar los daños sísmicos esperados para diferentes tipos de estructuras.

El manual ATC-13 (1985) contiene una relación de los principales tipos estructurales, así como una descripción que facilita su identificación. Un ejemplo de estas matrices se muestra en la tabla VIII para edificios bajos de concreto reforzado. Para una intensidad sísmica determinada, el nivel de daño probable se estima combinando las

probabilidades de ocurrencia de cada FCD para dicho valor de intensidad. En el caso de la matriz de vulnerabilidad presentada en la tabla VIII, por ejemplo, para una intensidad VI, el 18.1% de los edificios bajos de concreto reforzado no presentará daño (FCD = 0), el 68.8% tendrá daños leves (FCD = 0.5) y el 12.1% presentará daños ligeros (FCD = 5.0). La suma de los porcentajes es, por supuesto, el 100% de las estructuras consideradas (edificios bajos de concreto reforzado). El *factor central de daño promedio* (FCDP) esperado para toda la población de edificios bajos de concreto se calcula sumando el producto de cada uno de los porcentajes por su correspondiente FCD. En el ejemplo adoptado,

$$\text{FCDP} = (0.0 \times 18.1/100) + (0.5 \times 68.8/100) + (5.0 \times 12.1/100) = 0.949\%, \text{ equivale a daños leves.}$$

Tabla VIII. Matriz de probabilidad de daño para edificios bajos de concreto reforzado.

FCD	IMM				
	VI	VII	VIII	IX	X
0.00	2.5	xx	xx	xx	xx
0.50	95.8	23.7	0.6	xx	xx
5.00	1.7	73.3	99.0	63.2	7.3
20.00	xx	xx	0.4	36.8	90.4
45.00	xx	xx	xx	xx	xx
80.00	xx	xx	xx	xx	xx
100.00	xx	xx	xx	xx	xx

El tiempo de restauración del funcionamiento de instalaciones críticas se estima con las matrices de recuperación propuestas por el ATC-13 (1985). Estas matrices fueron desarrolladas siguiendo un proceso similar al adoptado para desarrollar las matrices de vulnerabilidad. La integración sistemática de la experiencia de un número significativo de expertos familiarizados con los procesos de recuperación funcional de instalaciones críticas fue combinada con observaciones de procesos de recuperación en eventos sísmicos pasados. Entre los eventos reales utilizados para el desarrollo de las matrices de recuperación propuestas por el ATC-13 se incluyen, por ejemplo, los terremotos entre 1971

y 1979 en California y el de Managua, que generaron intensidades IMM entre VII y IX y que afectaron a estructuras construidas entre 1960 y 1970.

II.8 Método de inspección visual rápida para la determinación de la seguridad sísmica de las estructuras críticas

Las matrices de vulnerabilidad no consideran las características específicas de cada estructura sino que estiman los niveles de daños promedios encontrados estadísticamente para una población (cantidades grandes) de estructuras. Para considerar las características específicas de una estructura en la determinación de su resistencia sísmica se utiliza el método de inspección visual rápida de estructuras sugeridas por el ATC-21 (FEMA 154, 2002), el cual se aplica a un subcatálogo de estructuras críticas compuesto por 11 estructuras, consideradas como las más importantes para Mexicali. La elección de este subcatálogo se hizo con ayuda de la oficina de Protección Civil del Estado de Baja California. Se decidió usar este método porque es rápido, fácil de aprender y usar, no es caro, brinda una buena aproximación del daño de una estructura de acuerdo a sus condiciones físicas y puede aplicarse extensamente para todo tipo de estructura. Meneses, *et al.*, (2004) aplicó el mismo método en un estudio de vulnerabilidad sísmica para escuelas en Mexicali

El método ATC-21(Consejo de Tecnología Aplicada, ATC-21) fue desarrollado por la Agencia Federal de Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA) para determinar la seguridad sísmica de las estructuras civiles que ya están en uso (FEMA 154, 2002). El propósito de este método es la identificación de estructuras que deben ser sometidas a una investigación más detallada en su comportamiento sísmico. En la práctica, el ATC-21 consiste en hacer una inspección visual del edificio desde el exterior, y, cuando

fuese posible, desde el interior para verificar la presencia de una serie de factores que reducen su capacidad para resistir la sollicitación sísmica esperada.

La sollicitación sísmica esperada es expresable mediante una cota de *peligro sísmico* (baja, moderada o alta), en función de un parámetro físico del movimiento del suelo. Esa cota, en conjunto con el tipo estructural, determina una calificación en base a la capacidad sísmica de la estructura; calificación que el inspector va modificando conforme observa factores tales como condición, altura y edad de la estructura, así como el tipo de suelo. La figura 18 presenta un ejemplo de plantilla que facilita el trabajo de inspección. Este método puede ser usado, en evaluaciones rápidas, como primer paso para entender el riesgo sísmico al que están expuestas las estructuras importantes; aunque no reemplaza a un estudio detallado, representa una buena aproximación y puede aplicarse extensamente. La evaluación de un edificio específico sigue los siguientes pasos:

1. Identificación de la estructura (código, dirección)
2. Verificación visual de elevaciones y planta del edificio desde afuera.
3. Documentación fotográfica del edificio para identificar las características generales y específicas.
4. Identificación de datos básicos (número de pisos, sistemas y materiales estructurales, problemas significantes de diseño o construcción, etc.)
5. Determinación de la calificación estructural básica debido a las condiciones del edificio.

La calificación que se obtiene en cada estructura para determinar su capacidad sísmica está representada en el ATC-21 por la letra “S”. La puntuación final (S), es una estimación de la probabilidad de que el edificio colapsará si se tienen movimientos del suelo que igualen o excedan los movimientos sísmicos máximos considerados. Por ejemplo, un puntaje final de $S = 3$ implica una probabilidad de 1 en 10^3 , o de 1 en 1000 de que el edificio colapse si esa vibración del suelo ocurre; $S = 2$ implica una probabilidad de colapso de 1 en 10^2 , o de 1 en 100 y $S = 1$ implica la probabilidad de 1 en 10^1 , o 1 en 10

que el edificio colapse si se presenta la sollicitación sísmica esperada (FEMA 154, 2002). El valor de “S” aceptable depende de los costos para aumentar la *seguridad* comparados con los *beneficios* obtenidos. Los costos para aumentar la *seguridad* incluyen los costos de investigar cientos o miles de edificaciones para identificar aquellas que más se dañarían durante un sismo y los costos para reforzar aquellas estructuras que se encontraron ser inaceptablemente débiles. Los *beneficios* incluyen: reducir el daño material, prevenir pérdidas económicas, salvar vidas y prevenir heridos. La reducción del daño incluye no solo la reducción del daño material sino también la reducción de los impactos a la vida diaria y a la producción. Cada comunidad necesita tomar en cuenta todas las consideraciones de estos *costos-beneficios* y decidir el valor de *S* como límite apropiado a las condiciones de la ciudad (FEMA 154, 2002).

La Oficina Nacional de Normas de los Estados Unidos (NBS, 1980) ha considerado un valor *S* alrededor de 2 como razonable para usarse dentro del contexto de la inspección visual rápida, lo cual podría cambiar si la comunidad donde se aplica el método hace una mejor evaluación de los costos y beneficios. La utilización de un valor alto de *S* disminuye el riesgo de la ciudad pero aumentan los costos, y el uso de un *S* bajo aumenta el riesgo sísmico pero disminuye los costos para evaluaciones y reforzamiento de la estructura antes del terremoto. En este trabajo, la evaluación de las estructuras incluye un valor de *S* recomendado por NBS (1980).

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>																																																																																																																																																																																				Dirección Otra Identificación No de pisos Inspector : Ena Gámez Área total (m ²): Nombre del edif.: Uso:				Año construido: Fecha:			
Escala:																																																																																																																																																																																											
OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA																																																																																																																																																																																	
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.		A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																																																																																																																																																													
Comercial	Histórico	Residencia	0-10	11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro																																																																																																																																																																													
Serv. Emerge.	Industrial	Escuela	101-1000	1000 +																																																																																																																																																																																							
PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S																																																																																																																																																																																											
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5 (PRMNR)	C1 (MRM)	C2 (MC)	C3 (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR																																																																																																																																																																												
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4																																																																																																																																																																												
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4																																																																																																																																																																												
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A																																																																																																																																																																												
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5																																																																																																																																																																												
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5																																																																																																																																																																												
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4																																																																																																																																																																												
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A																																																																																																																																																																												
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4																																																																																																																																																																												
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8																																																																																																																																																																												
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6																																																																																																																																																																												
PUNTAJE FINAL S																																																																																																																																																																																											
COMENTARIOS														Requiere Evaluación Detallada																																																																																																																																																																													
														SI	NO																																																																																																																																																																												

A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
 C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
 M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura 18. Formato utilizado en la evaluación de estructuras críticas de Mexicali (proporcionado por ATC-21).

Capítulo III

PROCESAMIENTO DE DATOS

III.1 Medición de velocidades y determinación de las condiciones locales del suelo

Las velocidades de ondas de corte para los suelos de la zona urbana de Mexicali fueron medidas en los sitios indicados en el mapa de la figura 19. Estos sitios, corresponden a las estaciones de la red acelerométrica en las que se registraron los datos para obtener la amplificación del suelo mediante cocientes espectrales. Acosta *et al.* (2007) se describe en detalles el procedimiento para la captura de datos, procesamiento e interpretación de las velocidades sísmicas en los primeros 30 m del subsuelo. Las figuras 20 a 23 ilustran los resultados de la inversión de las funciones de dispersión de ondas superficiales, es decir la estructura de velocidad de corte en los diferentes sitios.

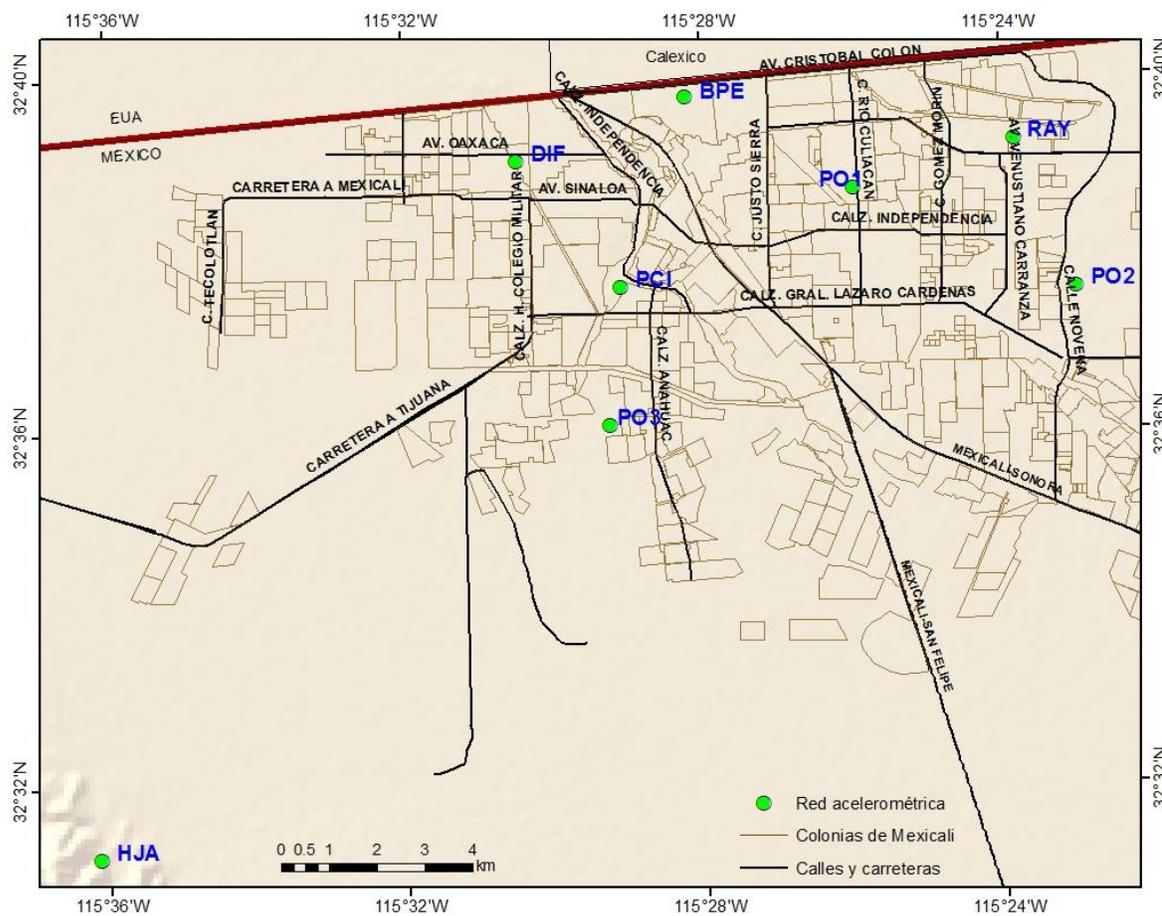


Figura 19. Ubicación de los sitios donde se estimaron las velocidades de ondas sísmicas de corte.

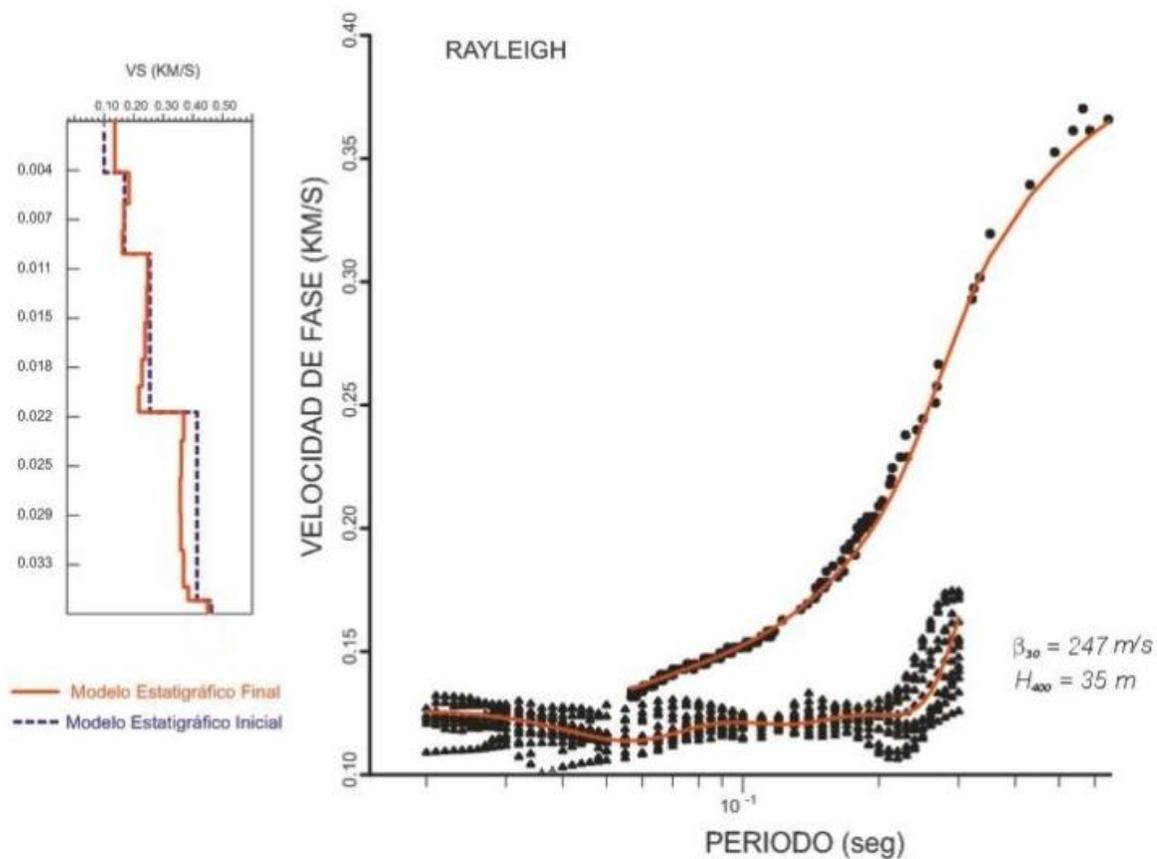


Figura 20. Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de cortante en el sitio PO3. A la izquierda, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha está la dispersión de velocidad de fase (círculos) y de grupo (triángulos) observadas y, sobrepuestas con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.

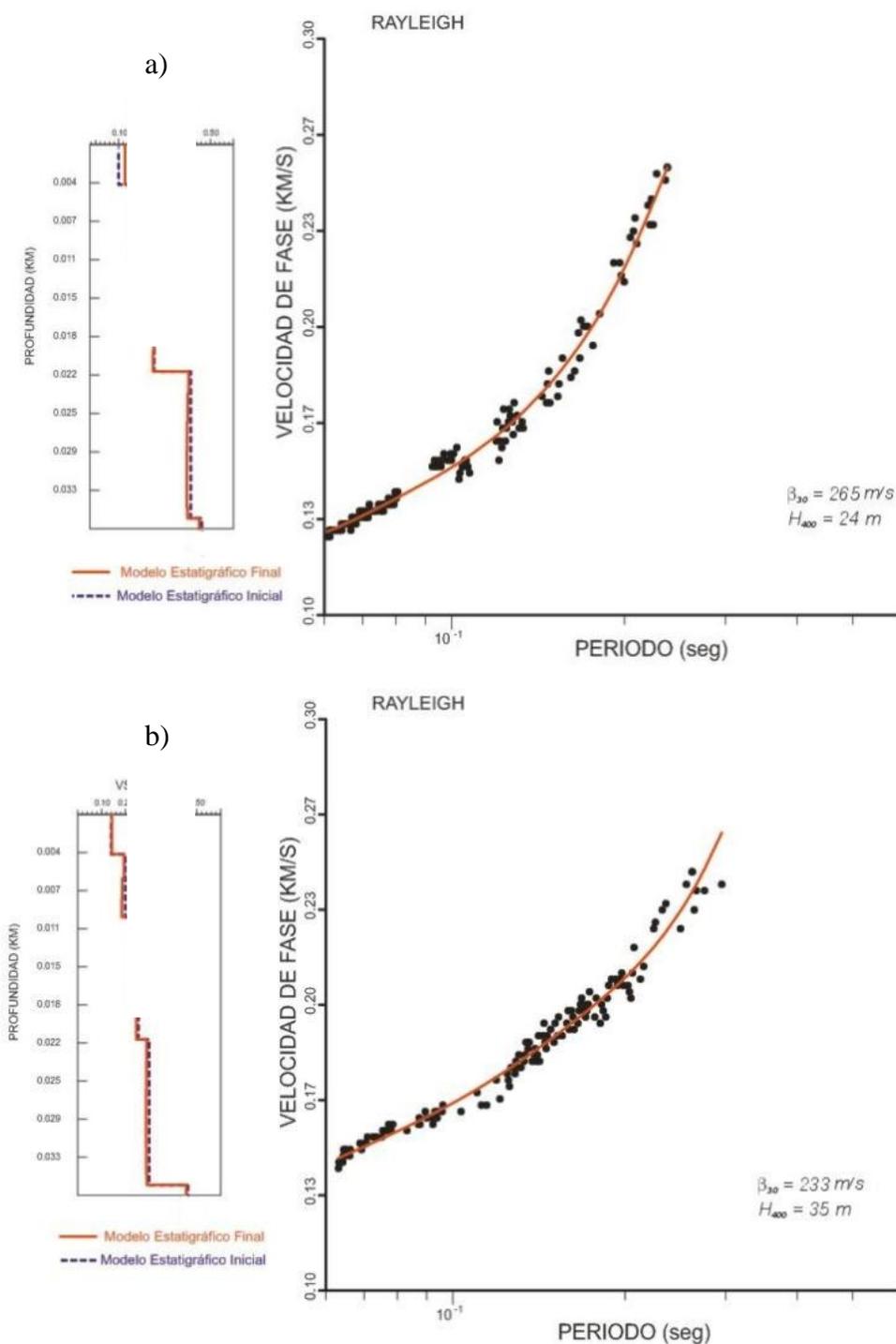


Figura 21. Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de cortante, a) en el sitio BPE y b) en el sitio DIF. A la izquierda de cada figura, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha, aparecen las observaciones de la dispersión de velocidad de fase (círculos) y sobrepuestas con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.

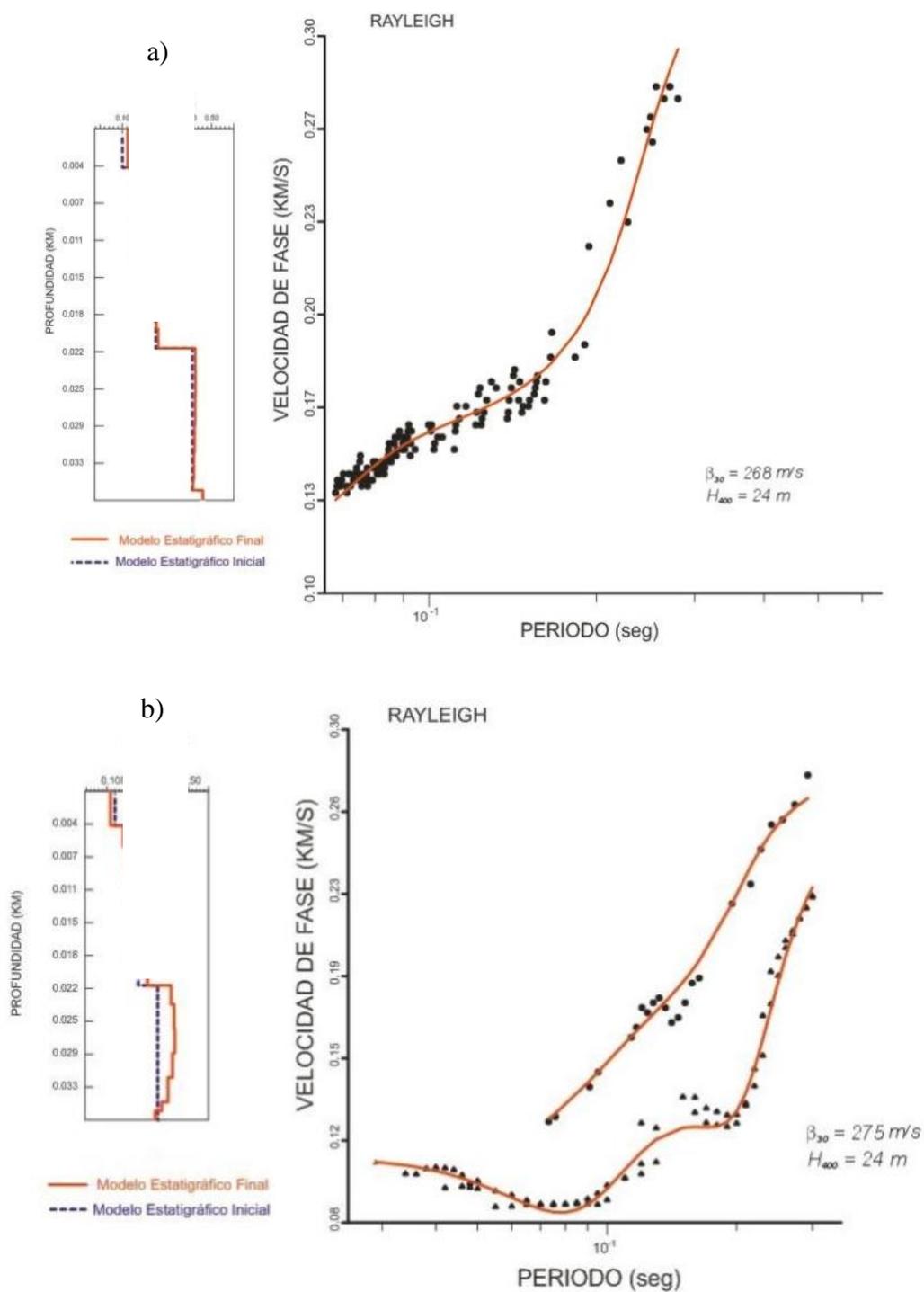


Figura 22. Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de cortante, a) en el sitio POI y b) en el sitio RAY. A la izquierda de cada figura, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha, aparecen las observaciones de la dispersión de velocidad de fase (círculos) y superpuestas con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.

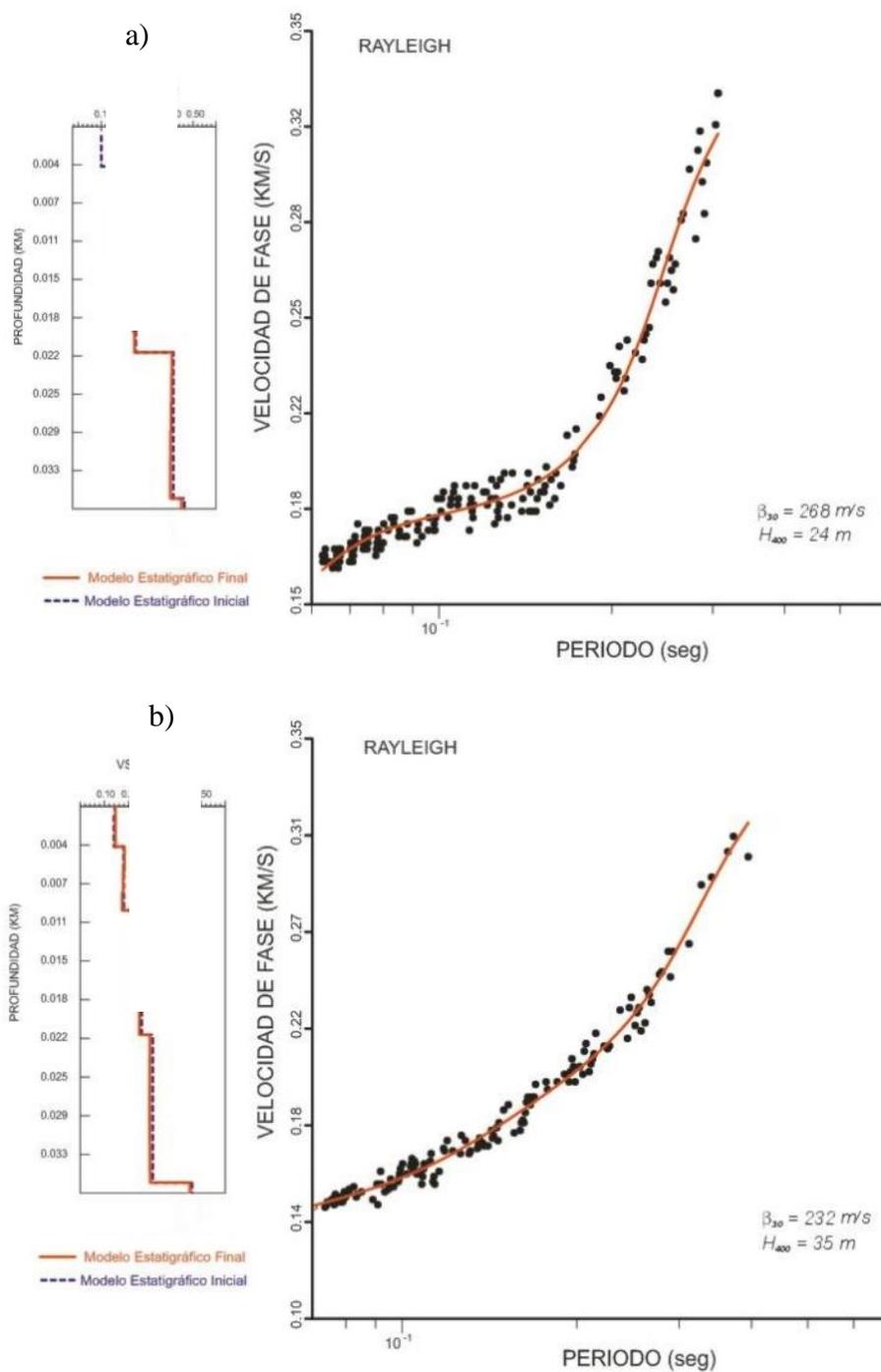


Figura 23. Aplicación del proceso de inversión de la estructura de velocidad de cortante, a) en el sitio PO2 y b) en el sitio PCI. A la izquierda de cada figura, se muestran el modelo invertido final (rojo continuo) y el inicial (azul). A la derecha, aparecen las observaciones de la dispersión de velocidad de fase (círculos) y sobrepuestas con líneas continuas, las curvas de dispersión ajustadas.

La variación de la velocidad de corte en los primeros 30 m del subsuelo para los distintos puntos de la ciudad es muy pequeña, según se aprecia en las figuras 20 a 23, así que se supone que la estructura geológica somera en Mexicali es lo suficientemente homogénea como para usar un promedio de las velocidades de corte en toda la zona urbana en la aplicación a las ecuaciones predictivas (ecuaciones 4 y 7) con ello resultan mapas del máximo movimiento del suelo, las velocidades y aceleraciones pico y las intensidades para los terremotos propuestos. El promedio de estas velocidades es de 256 m/s.

III.2 Cálculo y distribución de la intensidad del movimiento del terreno

La estimación de la respuesta sísmica de los suelos de la zona urbana de Mexicali se llevó a cabo en 30,000 sitios de la ciudad, distribuidos en una rejilla regular, con una separación de 0.15 km entre nodos, hasta cubrir el área mostrada en la figura 24. Se aplicaron las ecuaciones (4) a (7) para estimar en cada sitio a los siguientes parámetros:

1. Aceleración pico horizontal, con orientación aleatoria.
2. Velocidad pico horizontal, con orientación aleatoria.
3. Amplitud máxima del espectro de pseudoaceleración horizontal, para un amortiguamiento del 5%.

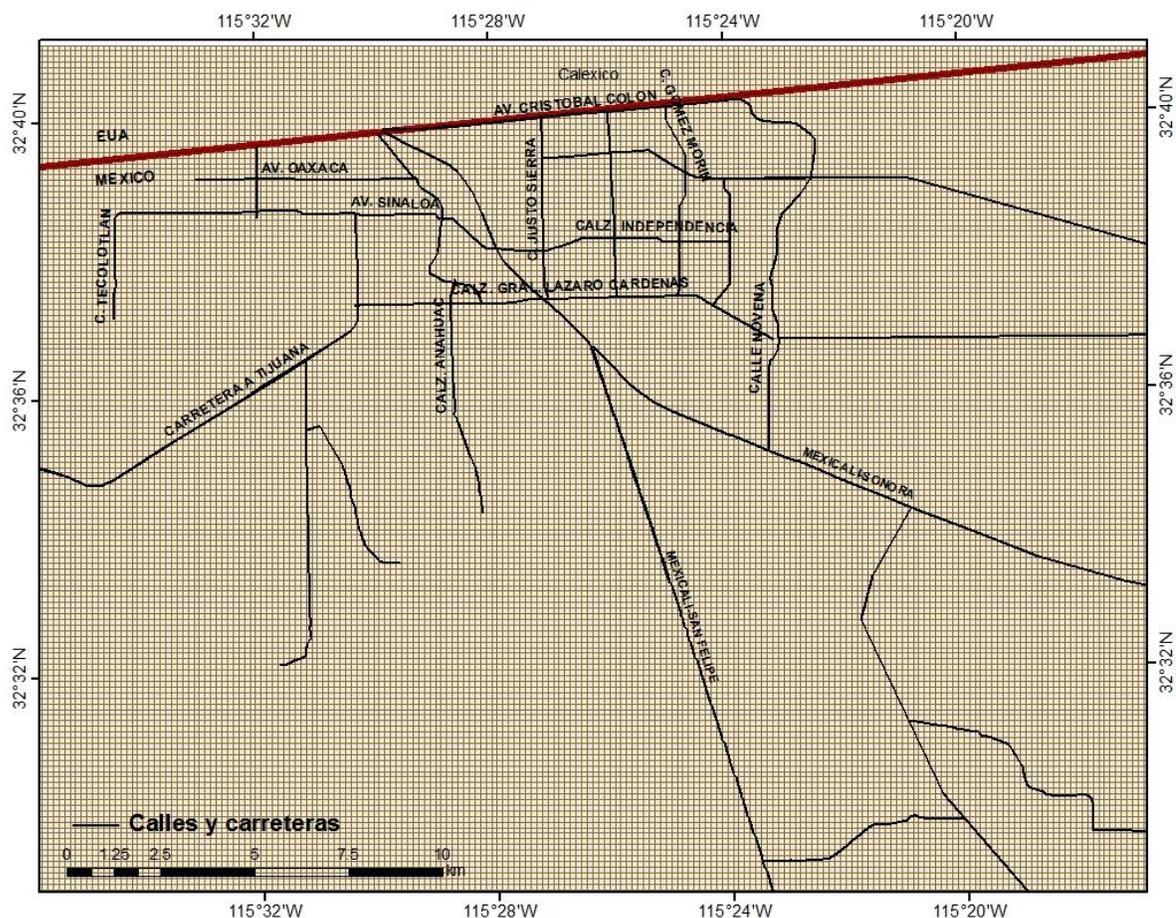


Figura 24. Rejilla utilizada para estimar, en cada nodo, la respuesta sísmica del suelo, en Mexicali.

La aplicación del método de ecuaciones predictivas implica, como primer paso, la determinación de las zonas sismogénicas con mayor probabilidad de generar terremotos peligrosos para la zona de estudio. Las zonas sismogénicas representadas en esta región tectónica por fallas geológicas, deben ser caracterizadas por medio de la magnitud del mayor terremoto que se puede generar y la longitud (o área) de ruptura esperable, así como por su ubicación respecto a la zona urbana de interés.

Anderson y Bodin (1987) examinaron la sismicidad histórica del Valle Mexicali-Imperial con el fin de proponer un modelo de recurrencia de terremotos para esta región, lo

cual incluye la predicción del tiempo en que ocurrirá un terremoto y la pronosticación del deslizamiento y longitud de ruptura de la falla. El modelo usa datos de 35 terremotos con magnitudes entre 5.1 y 7.1, incluyendo cuatro grandes: El Centro 1940, El Golfo de 1966, Imperial de 1979 y Cerro Prieto o Victoria de 1980. A partir de diagramas de espacio-tiempo concluyen que la distribución de magnitudes observadas es ajustada mediante una distribución log-normal de las caídas de esfuerzo, mientras que las longitudes de ruptura adoptan una distribución exponencial, resultado de adoptar un modelo de falla unidimensional, con barreras a la ruptura de resistencia y distribución aleatorias. Compararon las predicciones de la relación magnitud-longitud propuesta por Anderson y Luco (1983), mostrada en la ecuación (11), con los datos de los terremotos mejor documentados: Cerro Prieto 1980 (Prince, 1982) e Imperial en 1940 y 1979 (Trifunac y Brune, 1970; Sharp, 1982a), con el resultado mostrado en la figura 25.

$$L(\text{km}) = (5.2 \times 10^{-4}) 10^{0.75M} \quad (11)$$

donde:

L es la longitud de ruptura en kilómetros y M es la magnitud de momento. Si se conoce la longitud de ruptura, se obtiene de la ecuación (11) la magnitud de momento con:

$$M_w = \frac{\log(L) - \log(5.2 \times 10^{-4})}{0.75} \quad (12)$$

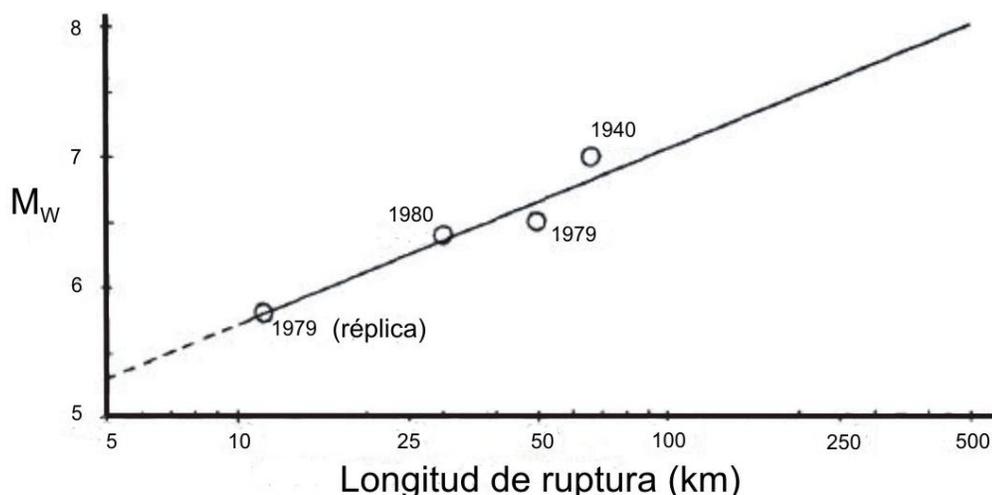


Figura 25. La línea recta representa la ecuación de Anderson y Luco (1983) que relaciona la magnitud y la longitud de ruptura. Los círculos abiertos son las observaciones de cuatro sismos ocurridos en el Valle Mexicali-Imperial (Anderson y Bodin, 1987).

Referente a los periodos de recurrencia de los sismos fuertes en el Valle, Anderson y Bodín (1987) encontraron comportamientos consistentes únicamente para dos segmentos de fallas en la región. Con los diagramas de espacio-tiempo, esos autores proponen dos segmentos como los más probables de romperse en un futuro cercano. Esto se ilustra en la figura 26.

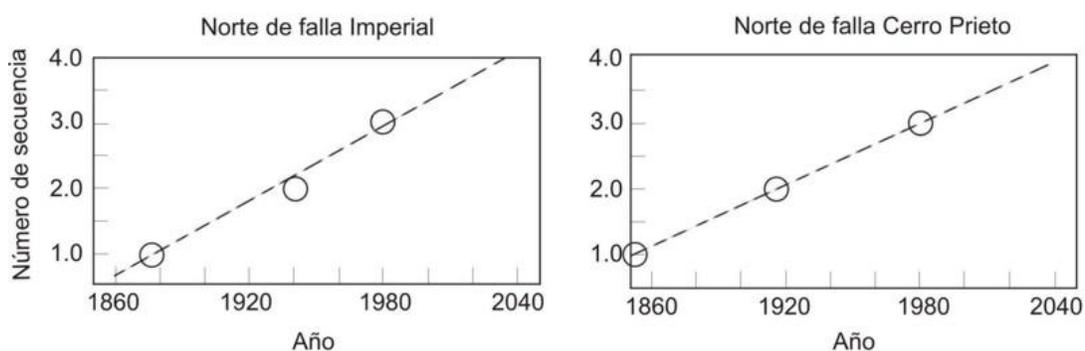


Figura 26. Números de secuencia de terremotos y años de ocurrencia en el norte de la falla Imperial y en el norte de la falla Cerro Prieto. La línea cortada muestra el ajuste de mínimos cuadrados de los datos (Anderson y Bodin, 1987).

- a) Segmento norte de la falla Imperial, desde Brawley, California, a la frontera de Estados Unidos con México; su longitud de ruptura es de 36.5 km y la magnitud probable es $M_w = 6.46$. La fecha probable de ocurrencia es estimada entre 2010 y 2050.

- b) Segmento norte de la falla Cerro Prieto, desde el volcán Cerro Prieto a Riito; su longitud de ruptura es de 42 km y la magnitud probable es $M_w = 6.54$. La fecha probable de ocurrencia entre 2020 y 2060.

Esta tesis utiliza ambos segmentos de falla para nuestros escenarios sísmicos, los cuales están indicados en la figura 27.

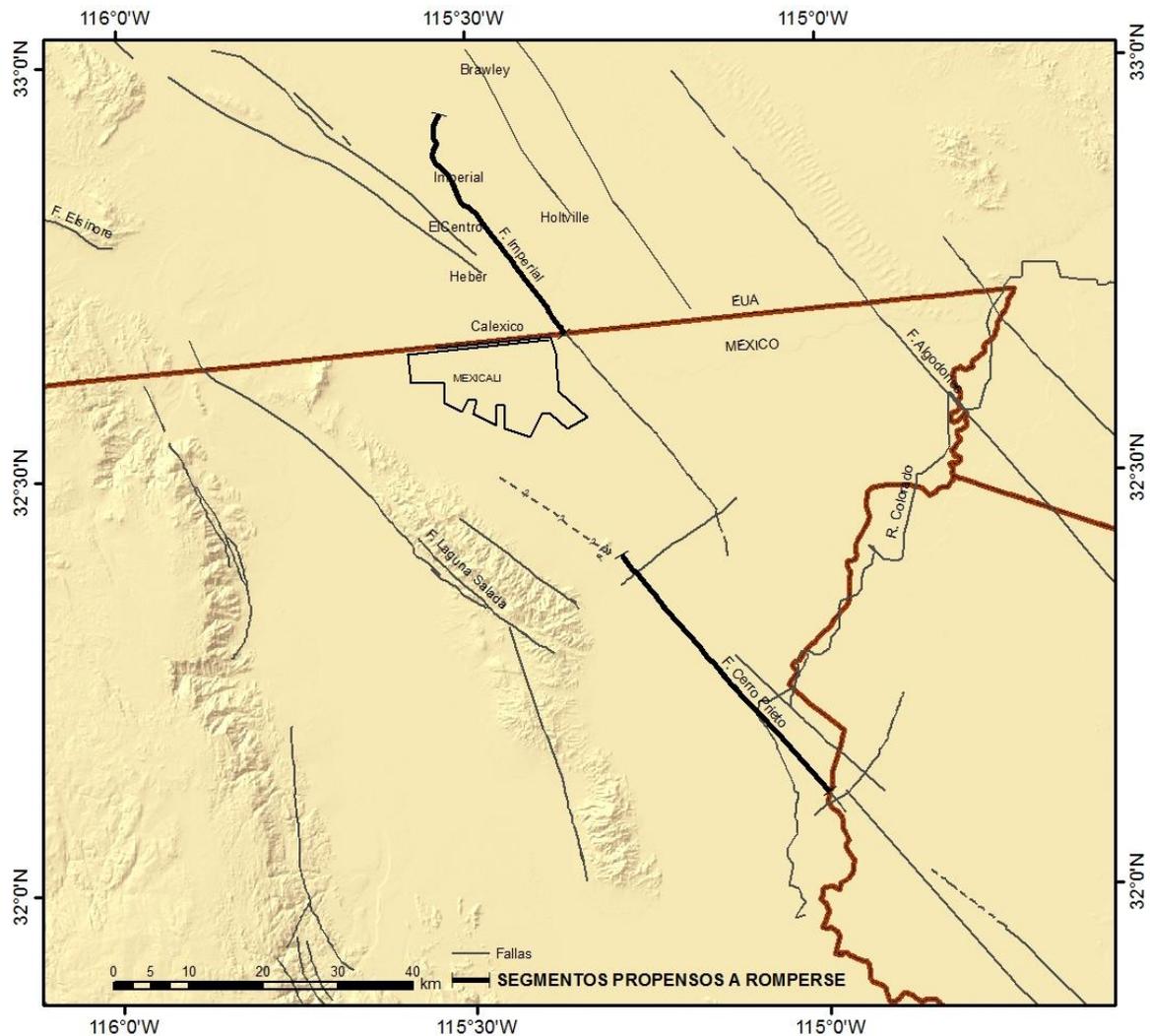


Figura 27. Segmentos de fallas propensos a romper como son propuestos por Anderson y Bodin (1987), para la falla Imperial $M_w = 6.46$ y para la falla Cerro Prieto $M_w = 6.54$.

Entonces, en las ecuaciones (4) y (7), se sustituyen los valores

$M_w=6.46$ y $V_s=256$ m/s para la falla Imperial, y

$M_w=6.54$ y $V_s=256$ m/s para la falla Cerro Prieto.

Ahora, la variable por especificar es la distancia (d) entre cada uno de los sitios en los que se estimará el movimiento del suelo y el segmento de falla cuyo rompimiento se postula. Como se explicó en la sección II.3, esta distancia es la que existe entre el sitio de

interés, es decir cada nodo de la rejilla mostrada en la figura 25, y el punto más cercano de la proyección en superficie del trazo del segmento de falla a romperse, el cual se representó por puntos discretos que tienen una separación promedio de 150 metros.

Para la determinación de los valores máximos de aceleración y velocidad, se utilizó el periodo de 0.0 s (por las propiedades de los espectros de respuesta). Para la determinación de los valores máximos del espectro de respuesta de aceleración y velocidad se utilizó el periodo de 0.5 s, valor que es representativo de las edificaciones típicas en muchas ciudades (Reglamento de la Ley de Edificaciones del Estado de Baja California, 1976; <http://earthquake.usgs.gov/research/hazmaps/haz101/faq/psha02.php>). El valor de 0.5 s está presente en los periodos dominantes del movimiento del suelo en algunas zonas, principalmente al sur de Mexicali (Acosta *et al.*, 2007). Entonces, se emplean en las ecuaciones (4) y (7) los coeficientes correspondientes a esos periodos que se encuentran en las tablas II y III.

La utilización de las matrices de vulnerabilidad para estimar los daños estructurales requiere la conversión de los máximos movimientos del suelo a la intensidad de Mercalli modificada (IMM). Ésto se consigue con las ecuaciones (8) a (10). Se hicieron pruebas con las tres ecuaciones para verificar su aplicabilidad en la región de estudio, comparando sus estimaciones con las observaciones de IMM para los terremotos de El Centro 1940 (Ulrich, 1941) y del Valle Imperial 1979 (Reagor *et al.*, 1982; Nason, 1982). La razón para hacer esta comparación es la similitud que hay entre los segmentos rotos por terremotos en el pasado y el segmento propenso a romperse para la falla Imperial propuesto por Anderson y Bodin (1987).

La máxima intensidad en la escala modificada de Mercalli para 1940 fue de X, (Ulrich, 1941). Reagor *et al.* (1982) reportó que la máxima intensidad para 1979 fue de VII, sin embargo para un edificio de El Centro fue asignada una intensidad IX en las primeras intensidades observadas; posteriormente, se encontró una gran perturbación, con una intensidad máxima de VIII en Brawley y otras ciudades (Nason, 1982). Estas intensidades

fueron presentadas en mapas de isosistas para el sureste de California hasta la frontera con México (Ulrich, 1941; Reagor *et al.*, 1982; Nason, 1982). La tabla IX muestra las comparaciones para los tres conjuntos de intensidades, para sitios en el Valle Mexicali-Imperial, que se muestran en la figura 28.

Tabla IX: Comparación de las intensidades de Mercali modificada (IMM) observadas en el Valle Mexicali-Imperial para los terremotos de El Centro 1940 y del Valle Imperial 1979.

Ciudades que reportaron daños	IMM para el terremoto de El Centro 1940 (Ulrich, 1941)	IMM para el terremoto de Valle Imperial 1979 (Reagor, 1982)	IMM para el terremoto de Valle Imperial 1979 (Nason, 1982)
Brawley	IX y X	VII	VII y VIII
Calexico	IX	VII	VII
Calipatria	VIII	V	VI
ElCentro	IX	VII (un edificio con IX)	VII y VIII (un edificio con IX)
Heber	IX	VI	VII
Holtville	IX y X	VI	VII y VIII
Imperial	IX y X	VII	VII y VIII
Mexicali	No hay reportes	VII	No hay reportes
Westmorland	VIII	V	VI

En Mexicali no hubo reportes de mapas de intensidades (IMM) sobre los terremotos de El Centro 1940 y de Valle Imperial 1979, pero con los datos de intensidades para las ciudades de California mostradas en la tabla VIII y reflejados en los mapas de isosistas de Ulrich (1941) y de Nason (1982), siguiendo el trazo de la falla imperial, se proyectaron líneas de isosistas hasta Mexicali y se estimó que las intensidades para esta ciudad en los terremotos de El Centro 1940 y de Valle Imperial 1979 pudieron ser las mismas que las reportadas para Calexico. Las isosistas para Mexicali en los terremotos de 1940 y 1979 fueron comparadas con las nuevas isosistas de los mapas generados con las ecuaciones (8) a (10) para el segmento propuesto por Anderson y Bodin (1987). Esta comparación produce un comportamiento similar de las isosistas de 1940 y 1979 al comportamiento de las isosistas generadas con la combinación de las ecuaciones (9) y (10). Por lo tanto, se decidió usar esta combinación de ecuaciones para calcular las intensidades a partir del movimiento del suelo estimado en los mapas predictivos (figuras 32 a 35). Estas intensidades se utilizan

para estimar el daño a las estructuras críticas con el empleo de las matrices de vulnerabilidad.

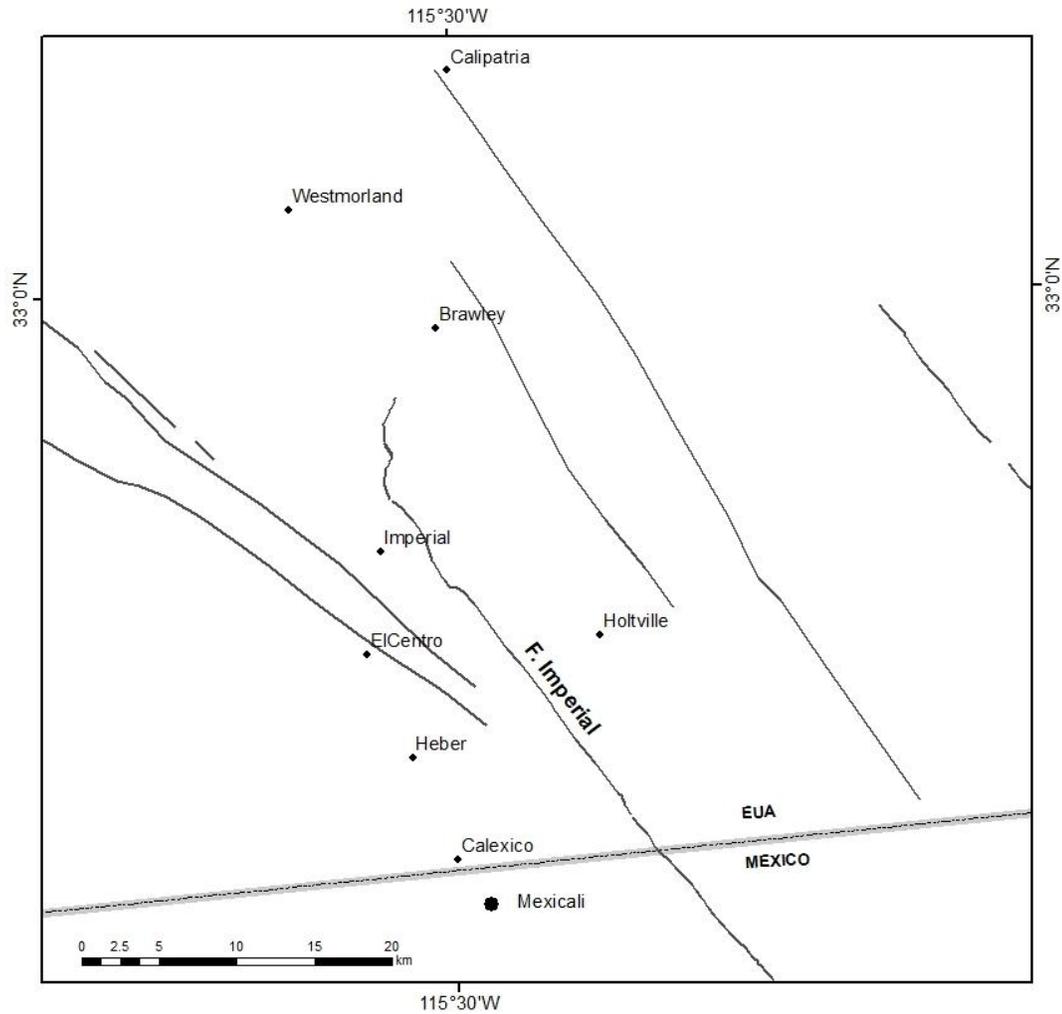


Figura 28. Localización de las ciudades donde hubo daños para los terremotos de El Centro 1940 y del Valle Imperial 1979.

III.3 Aplicación de las matrices de vulnerabilidad y cálculo de los daños esperados

En este punto del procesamiento de los datos se dispone de los mapas de isosistas esperadas para la zona de estudio, así es que se asigna una IMM a cada estructura de la tabla V, en función de su ubicación (figura 17). En seguida, se procede a la estimación de los daños para las estructuras críticas mediante la aplicación de las matrices de vulnerabilidad propuestas por el ATC-13. A lo anterior se agregan algunas modificaciones para adaptarlas a las características de diseño y construcción de la ciudad de Mexicali. Las modificaciones son de dos tipos:

1. Del resultado de las matrices se obtienen los niveles esperados de daños para diferentes tipos estructurales. Sin embargo, algunos edificios de Mexicali tienen tipos de construcción combinados. En tal caso, se calcula un *factor de daño* como el promedio pesado de los factores individuales. Por ejemplo, a un edificio que tiene el 10% construido con marcos de acero y el 90% de concreto reforzado, se le calcula el daño esperado total para una estructura de acero y el daño total para una estructura de concreto. El daño esperado de este edificio resulta de la suma del producto del *factor de daño* de la estructura de acero por el 10% mas el *factor de daño* de la estructura de concreto multiplicado por el 90%.
2. Las matrices de vulnerabilidad propuestas en el ATC-13 fueron elaboradas para California, EUA, donde posiblemente las condiciones de calidad de construcción, calidad de materiales, aplicación de códigos y control de calidad son mejores que las encontradas en Mexicali. Este estudio ajusta las matrices del ATC-13 a las condiciones locales mediante la reducción de los valores de intensidad en un grado. Por ejemplo, los valores para daños esperados de intensidad VIII en las matrices originales suponen una intensidad VII para las condiciones locales. Esta técnica de adaptación ha sido empleada en estudios similares realizados en otros lugares, como

el proyecto RADIUS Tijuana (RADIUS, 2000) y el Proyecto para la reducción del riesgo sísmico de Quito Ecuador (Chatelain *et al.*, 1999). Las estimaciones de daños para los diferentes tipos de estructuras, sin embargo, tomando en cuenta tanto las matrices de daños originales como las matrices ajustadas, como resultado, tenemos un rango de daños que incluye el mejor de los casos (matrices originales) y el peor de los casos (matrices ajustadas). Posiblemente el daño esperado real está dentro del rango presentado por estos dos extremos.

Es preciso indicar que estas modificaciones se han aplicado únicamente para los edificios pero no para infraestructuras tales como puentes y subestaciones eléctricas. La razón para esto es que las obras de infraestructura se hacen en gran medida con materiales y equipos importados y, por lo tanto, los factores como la calidad de trabajo y control de calidad local tienen menos influencia. Las matrices aplicadas se presentan en las tablas X a XIX, las cuales fueron tomadas directamente del ATC-13 sin ningún ajuste, el cual se hace posteriormente, al estimar el *factor de daño central* a cada estructura.

Tabla X: Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras de marco de concreto reforzado.

FCD	IMM					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0.00	2.5	xx	xx	xx	xx	0.00
0.50	95.8	23.7	0.6	xx	xx	0.50
5.00	1.7	73.3	99.0	63.2	7.3	5.00
20.00	xx	xx	0.4	36.8	90.4	20.00
45.00	xx	xx	xx	xx	xx	45.00
80.00	xx	xx	xx	xx	xx	80.00
100.00	xx	xx	xx	xx	xx	100.00

Tabla XI: Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras de marcos de acero

FCD	IMM					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0.00	18.90	0.60	xx	xx	xx	xx
0.50	60.40	29.20	2.60	xx	xx	xx
5.00	20.70	70.20	90.30	54.40	15.50	1.20
20.00	xx	xx	7.10	45.60	82.90	64.10
45.00	xx	xx	xx	xx	1.60	34.70
80.00	xx	xx	xx	xx	xx	xx
100.00	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Tabla XII: Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras de marcos de acero arrojados

FCD	IMM					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0.00	34.20	6.30	xx	xx	xx	xx
0.50	55.60	43.60	6.80	0.10	xx	xx
5.00	10.20	50.10	93.10	94.10	47.80	8.10
20.00	xx	xx	0.10	5.80	52.20	82.40
45.00	xx	xx	xx	xx	xx	9.50
80.00	xx	xx	xx	xx	xx	xx
100.00	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Tabla XIII: Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras de mampostería reforzada

FCD	IMM					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0.00	5.20	xx	xx	xx	xx	xx
0.50	38.80	3.20	0.70	xx	xx	xx
5.00	55.90	84.10	37.90	5.50	0.80	0.20
20.00	0.10	12.70	55.40	52.60	20.60	6.90
45.00	xx	xx	6	40.40	60.80	40.20
80.00	xx	xx	xx	1.50	17.80	51.70
100.00	xx	xx	xx	xx	xx	1.00

Tabla XIV: Matriz de vulnerabilidad para tipos de estructuras con lámina

FCD	IMM					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0.00	23.60	xx	xx	xx	xx	xx
0.50	70.90	47.80	11.50	0.40	xx	xx
5.00	5.50	52.20	88.50	93.70	31.90	3.40
20.00	xx	xx	xx	5.90	67.70	80.70
45.00	xx	xx	xx	xx	0.40	15.90
80.00	xx	xx	xx	xx	xx	xx
100.00	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Tabla XV. Matriz de vulnerabilidad para puentes

FCD	IMM					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0.00	3.00	xx	xx	xx	xx	xx
0.50	97.00	12.30	xx	xx	xx	xx
5.00	xx	85.70	70.90	xx	xx	xx
20.00	xx	xx	29.10	71.10	xx	xx
45.00	xx	xx	xx	28.90	82.40	xx
80.00	xx	xx	xx	xx	17.00	100.00
100.00	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Tabla XVI. Matriz de vulnerabilidad para subestaciones eléctricas

FCD	IMM					
	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0.00	0.50	0.20	xx	xx	xx	xx
0.50	25.40	10.30	1.80	xx	xx	xx
5.00	74.10	86.80	64.30	16.90	0.50	xx
20.00	xx	2.70	33.50	71.50	44.90	9.30
45.00	xx	xx	0.4	11.60	54.10	86.30
80.00	xx	xx	xx	xx	0.50	4.40
100.00	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Tabla XVII. Matriz de vulnerabilidad para tuberías

FCD	IMM				
	VI	VII	VIII	IX	X
0.00	100.00	99.80	20.90	8.70	xx
0.25	xx	0.20	54.10	34.20	1.30
0.75	xx	xx	17.20	36.10	7.90
5.50	xx	xx	7.80	21.90	89.50
15.00	xx	xx	xx	xx	1.10
30.00	xx	xx	xx	xx	0.20
40.00	xx	xx	xx	xx	xx

Tabla XVIII. Matriz de vulnerabilidad para carreteras

FCD	IMM				
	VI	VII	VIII	IX	X
0.00	93.30	18.80	2.80	1.00	xx
0.50	6.70	61.50	27.00	13.80	1.30
5.00	xx	19.70	68.80	75.40	59.00
20.00	xx	xx	1.40	9.80	39.10
45.00	xx	xx	xx	xx	0.60
80.00	xx	xx	xx	xx	xx
100.00	xx	xx	xx	xx	xx

Tabla XIX. Matriz de vulnerabilidad para tanques de agua

FCD	IMM				
	VI	VII	VIII	IX	X
0.00	94.00	2.50	0.40	xx	xx
0.50	6.00	92.90	30.60	2.1	xx
5.00	xx	4.90	69.00	94.60	25.70
20.00	xx	xx	xx	3.30	69.30
45.00	xx	xx	xx	xx	5.00
80.00	xx	xx	xx	xx	xx
100.00	xx	xx	xx	xx	xx

En seguida, se combinan la clasificación de las estructuras críticas (tabla V), con las intensidades sísmicas esperadas (figura 36), y, a partir de las matrices X a XIX, se obtiene el *factor central de daño promedio* (FCDP) para cada tipo de construcción. Este factor se ajusta a las condiciones locales mediante un ajuste, en que se disminuye en grado de

intensidad (IMM) como se explicó anteriormente. Las tablas XX y XXI muestran los valores de FCDP que resulta de las matrices originales y ajustadas del ATC-13.

Tabla XX. Factor Central de daño promedio para los tipos de construcción de Mexicali, usando matrices originales del ATC-13.

TIPO CONSTRUCTIVO	FCDP (%) - Matriz original				
	Intensidad modificada de Mercalli				
	VI	VII	VIII	IX	X
CR	1.11	4.57	4.36	15.40	16.28
MA	1.34	3.66	5.95	11.84	18.08
MAA	0.79	2.72	4.71	5.87	12.83
MR	2.99	6.76	15.68	28.98	45.76
MR-Ma	1.90	4.60	6.61	15.35	24.55
MA10% y 90%CR	1.13	4.48	4.52	15.04	16.46
CR y MA con MR	1.85	5.02	8.88	18.90	27.22
MA con MR y lámina	1.79	4.66	9.40	16.55	28.32

Tabla XXI. Factor Central de daño promedio para los tipos de construcción de Mexicali con las matrices ajustadas.

TIPO CONSTRUCTIVO	FCDP (%) - Matriz calibrada				
	Intensidad modificada de Mercalli				
	VI	VII	VIII	IX	X
CR	4.57	4.36	15.40	16.28	37.67
MA	3.66	5.95	11.84	18.08	28.50
MAA	2.72	4.71	5.87	12.83	71.39
MR	6.76	15.68	28.98	45.76	61.84
MR-Ma	4.60	6.61	15.35	24.55	43.425
MA10% y 90%CR	4.48	4.52	15.04	16.46	36.75
CR y MA con MR	5.02	8.88	18.90	27.22	36.47
MA con MR y lámina	4.66	9.40	16.55	28.32	32.96

III.4 Subcatálogo de estructuras críticas y evaluación de daños

A partir del catálogo de estructuras presentado en la tabla V, se formó un subconjunto limitado de estructuras críticas y estratégicas que consta de once estructuras. Estas son las más importantes para la ciudad de Mexicali según la oficina de Protección Civil del Estado de Baja California. Ellas se sometieron al procedimiento de *Inspección*

visual rápida -IVR- (FEMA 154, 2002). El subcatálogo de las estructuras se muestra en la tabla XXII.

Tabla XXII. Subcatálogo de estructuras críticas y estratégicas en Mexicali.

No	Estructuras Inspeccionadas	No	Estructuras Inspeccionadas
1	Clínica 30 IMSS	7	Poder Ejecutivo
2	Clínica 31 IMSS	8	Poder Judicial
3	ISSSTE	9	Poder Legislativo
4	ISSSTECALI	10	Potabilizadora 1
5	Palacio Federal	11	Seguridad Pública
6	Palacio Municipal		

Para la aplicación del método IVR, es necesario cuantificar el *peligro sísmico* según el criterio contenido en el manual del ATC-21, conocido como “*sismicidad*” en ese manual, para periodos cortos (0.2 s) y largos (1.0 s): el valor de la aceleración espectral (SA) se multiplica por 2/3 y luego se utilizan los criterios de la tabla XXIII. El peligro sísmico determinado para la región de estudio incluye los tres grados: alto, para el noreste de la ciudad; moderado, para la mayor parte de la ciudad incluyendo la zona donde se encuentran las once estructuras del subcatálogo; bajo, para el suroeste de la región. Esa distribución aparece en los mapas de las figuras 29 y 30 para periodos cortos y largos, respectivamente.

Tabla XXIII. Criterios para determinar el peligro sísmico de la región

Peligro sísmico	SA para periodo corto (0.2 s)	SA para periodo largo (1.0 s)
Bajo (B)	$SA < 0.167 \text{ g}$	$SA < 0.067 \text{ g}$
Moderado (M)	$0.167 \text{ g} \geq SA < 0.500 \text{ g}$	$0.067 \text{ g} \geq SA < 0.200 \text{ g}$
Alto (A)	$SA \geq 0.500 \text{ g}$	$SA \geq 0.200 \text{ g}$



Figura 29. Peligro sísmico determinado con criterios del método ATC -21 para periodo corto (0.2 s). Las estrellas indican las ubicaciones de las once estructuras críticas del subcatálogo sometido a la inspección visual rápida.

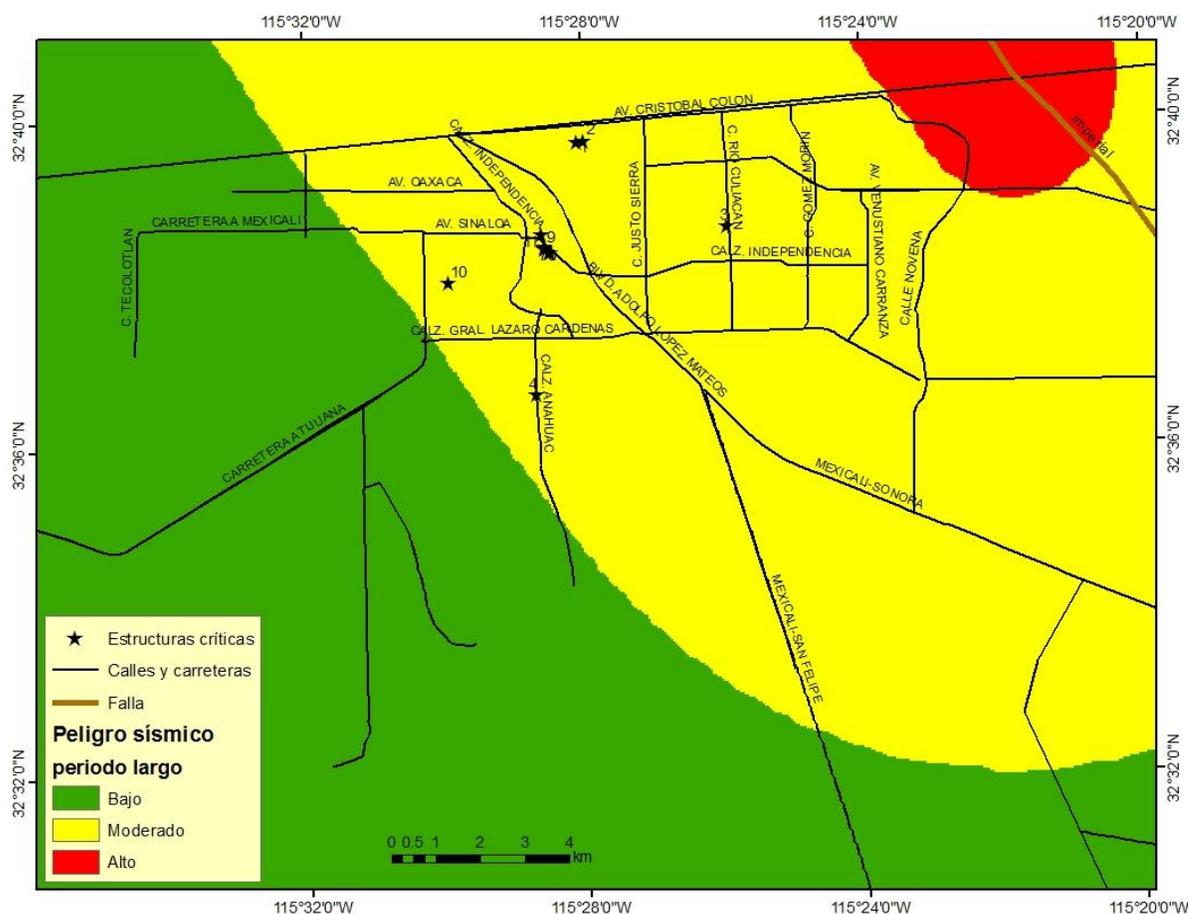


Figura 30. Peligro sísmico determinado con criterios del método ATC -21 para periodo largo (1.0 s). Las estrellas indican las ubicaciones de las once estructuras críticas del subcatálogo sometido a la inspección visual rápida.

Las figuras 29 y 30 muestran que la sismicidad en el área en que se ubican las estructuras críticas es la misma para periodos corto y largo, por lo que el formato del método IVR que se utilizó es el de sismicidad moderada. El tipo de suelo resulta de la medición de la velocidad de onda de corte; la velocidad obtenida para la ciudad de Mexicali fue 256 m/s. Este valor corresponde a un suelo de tipo D según el IVR, con la siguiente descripción:

Tipo D (Suelo firme): V_s entre 182.88 y 365.76 m/seg, número de golpes en la prueba de penetración estándar (N) entre 15 y 50, esfuerzo de corte sin drenaje (s_u) entre 1000 y 2000 psf. Esta clasificación aparece en el método ATC – 21 (FEMA-154, 2002).

La figura 31 muestra, como ejemplo, el formato del método de inspección visual rápida, aplicado en el edificio de gobierno, en el centro cívico de Mexicali; su puntaje de desempeño sísmico básico es de 3.2, de acuerdo al tipo estructural, tipo de suelo y peligro sísmico. Después de aplicar los modificadores contemplados en la IVR, se obtuvo un puntaje final de -0.1, el cual es menor que el umbral de $S = 2$ para declarar sísmicamente seguro el edificio. Por lo tanto, el dictamen es que se requiere una evaluación detallada del desempeño sísmico de esta estructura.

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

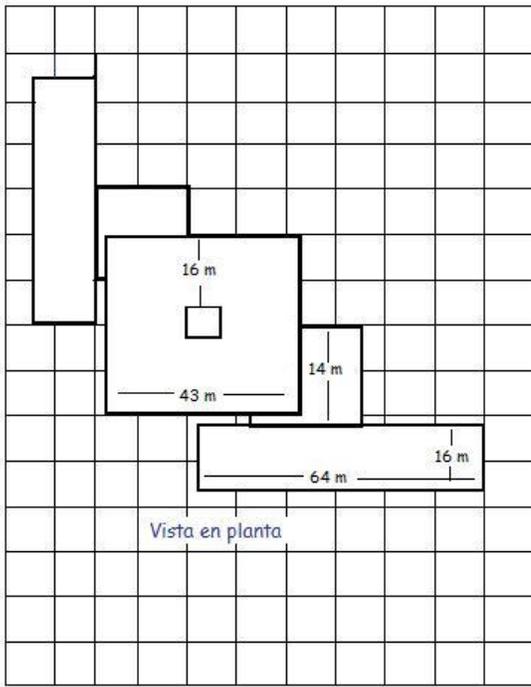
		Dirección Centro cívico Mexicali													
		Otra Identificación													
No de pisos		Año construido: 1976													
Inspector : Ena Gámez		Fecha: 02 de abril de 2008													
Area total (m²): 4,278		Nombre del edif: Palacio Federal													
Uso: Edificio de Gobierno															
Escala:															
OCUPACIÓN		TIPO DE SUELO				PELIGRO DE CAIDA									
Auditorios	<u>Gobierno</u> Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
Comercial	Histórico Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro			
Serv. Emerg.	Industrial Escuela	<u>101-1000</u> 1000 +													
PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5 (PRMNR)	C1 (MRM)	C2 (MC)	<u>C3 (PRMNR)</u>	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	<u>3.2</u>	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	<u>+0.2</u>	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	<u>-2.0</u>	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	<u>-0.5</u>	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	<u>-1.0</u>	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
PUNTAJE FINAL S											-0.1				
COMENTARIOS												Requiere Evaluación Detallada			
Se ha considerado la irregularidad vertical en este edificio por la apreciación que se tiene en planta, se ve claramente la unión de tres edificios unidos internamente con juntas, que al momento de un sismo puede ocurrir un golpeteo y colapsar. Se inspeccionó internamente y pudimos apreciar daños estructurales, como lo muestra la columna en la foto. Es necesario realizar un estudio detallado sobre este edificio.															
												<input checked="" type="radio"/> SI <input type="radio"/> NO			
A = Acero		CP= Concreto prefabricado		CR = Concreto reforzado		EL = Edif. Prefab. Levantado		ML = Metal Ligero							
C= Concreto		MR = Mamp. Reforzada		DF = Diafragma flexible		MA = Marco arriostrado		MRM = Marco resistente al momento							
M = Madera		DR = Diafragma rígido		MC = Muro de corte		PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada									

Figura 31. Determinación de la seguridad sísmica de estructuras críticas. Se muestra, como ejemplo, el llenado del formato del método de inspección visual rápida, aplicado al edificio de gobierno, en el centro cívico de Mexicali.

Capítulo IV

RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados de la aplicación de métodos empíricos para evaluar la respuesta sísmica de los suelos y de las estructuras críticas y estratégicas en la ciudad de Mexicali, Baja California, México, durante la ocurrencia de los terremotos con mayor probabilidad de afectar la zona. Estos resultados incluyen:

1. – La microzonificación de la respuesta sísmica con los métodos de ecuaciones empíricas predictivas. Esta respuesta es expresada en mapas con los valores pico de la aceleración y velocidad del suelo, así como con los espectros de respuesta de seudovelocity y pseudoaceleración, además, resultan mapas con las intensidades sísmicas.
2. – Los daños estimados para las estructuras críticas consideradas en el estudio y debido al efecto del escenario sísmico propuesto. Esto se obtiene con el método de matrices de vulnerabilidad (ATC-13, 1985).
3. – Las estimaciones de la seguridad sísmica de un subconjunto de estructuras importantes, que resulta del método de inspección visual rápida (FEMA-154, 2002).

IV.1 Microzonificación de la respuesta sísmica

Los mapas de máximos movimientos del suelo y de valores pico de los espectros de respuesta fueron obtenidos con las ecuaciones predictivas (4) y (7), con los parámetros de

fuentes sísmicas propuestas en el capítulo III.2; las velocidades someras de ondas de corte reportadas en el capítulo III.1 aplicadas en cada uno de los sitio definidos mediante la rejilla descrita en el capítulo III.1. En Acosta *et al.* (2007) ya han sido presentados los mapas de microzonificación correspondientes al segmento norte de la falla Imperial.

En el presente trabajo se elaboraron mapas (figuras 32-36) con las respuestas conjuntas de las dos fallas propuestas (Imperial y Cerro Prieto). Esto significa que para cada punto de la rejilla trazada en la Mexicali (figura 24) se estimaron los máximos de la respuesta sísmica del suelo causado por cada una de las dos fallas, y se asignó a la posición geográfica del punto el valor más elevado de los dos estimados. Entonces, los mapas de microzonación no ilustran la amenaza de una falla en particular, sino que expresan las máximas respuesta esperada del conjunto de fallas analizadas.

Los mapas de las figuras 32, 33, 34, 35 y 36 corresponden a las microzonificaciones de los valores pico de la velocidad, aceleración, espectro de respuesta de seudovelocidad, espectro de respuesta de pseudoaceleración e intensidad modificada de Mercalli, respectivamente.

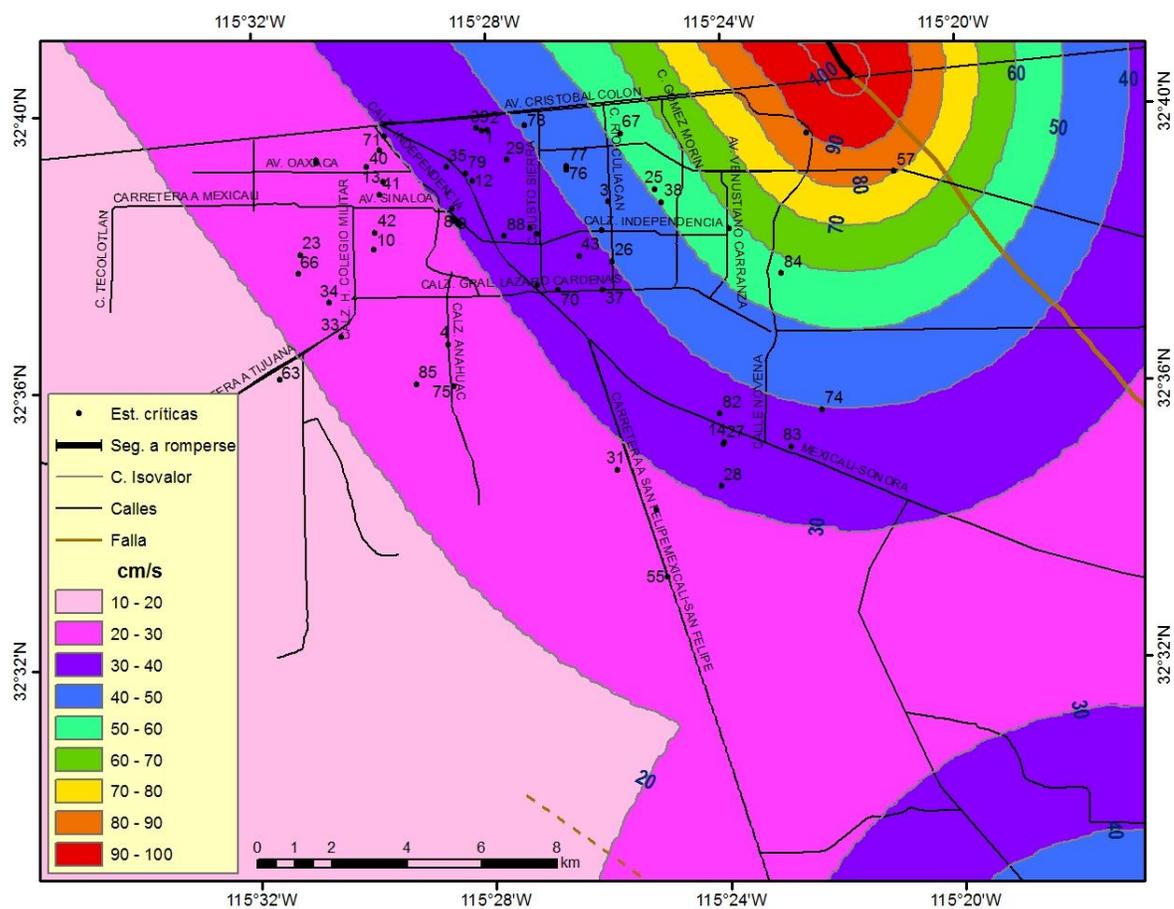


Figura 32. Distribución de valores de la velocidad máxima horizontal, para el análisis conjunto del rompimiento de segmentos de las fallas Imperial ($M=6.46$) y Cerro Prieto ($M=6.54$).

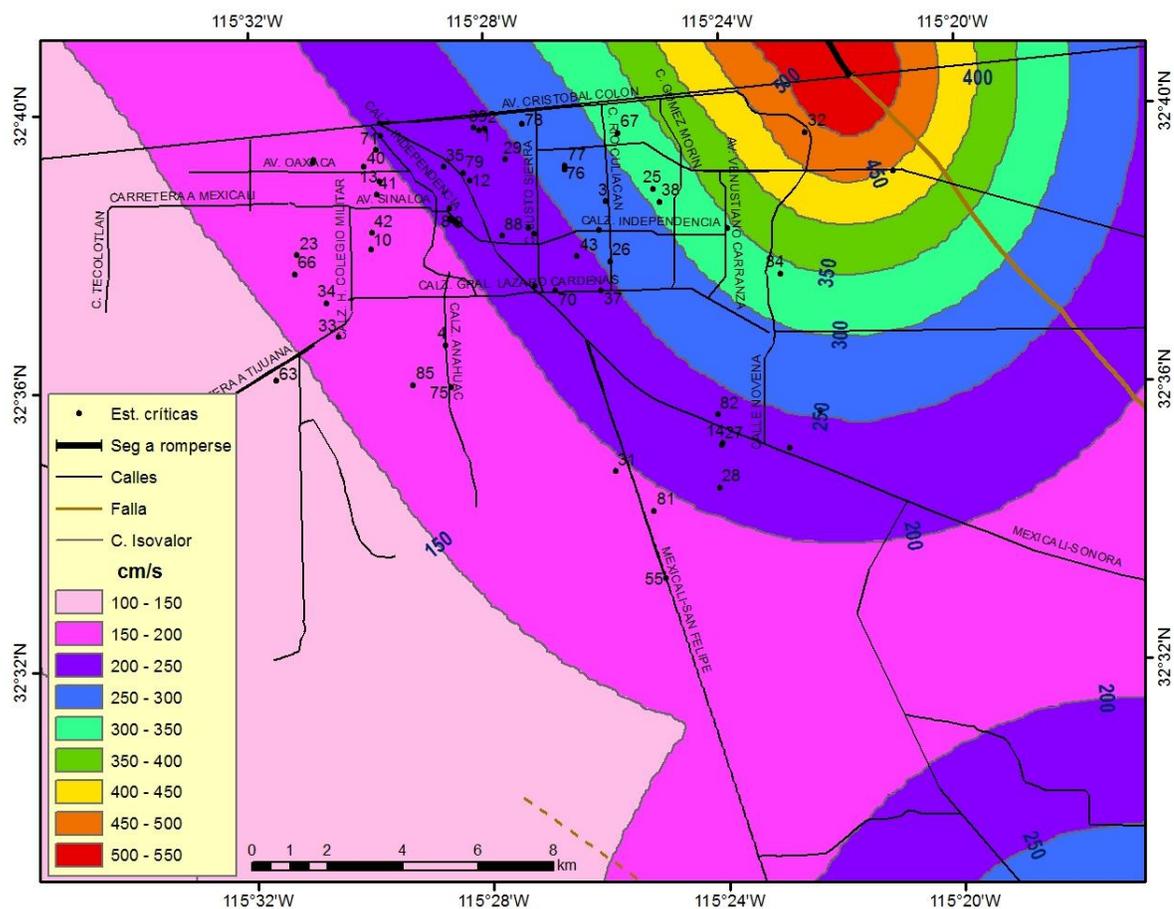


Figura 34: Distribución de valores máximos del espectro de pseudovelocity para el análisis conjunto del rompimiento de segmentos de las fallas Imperial ($M=6.46$) y Cerro Prieto ($M=6.54$).

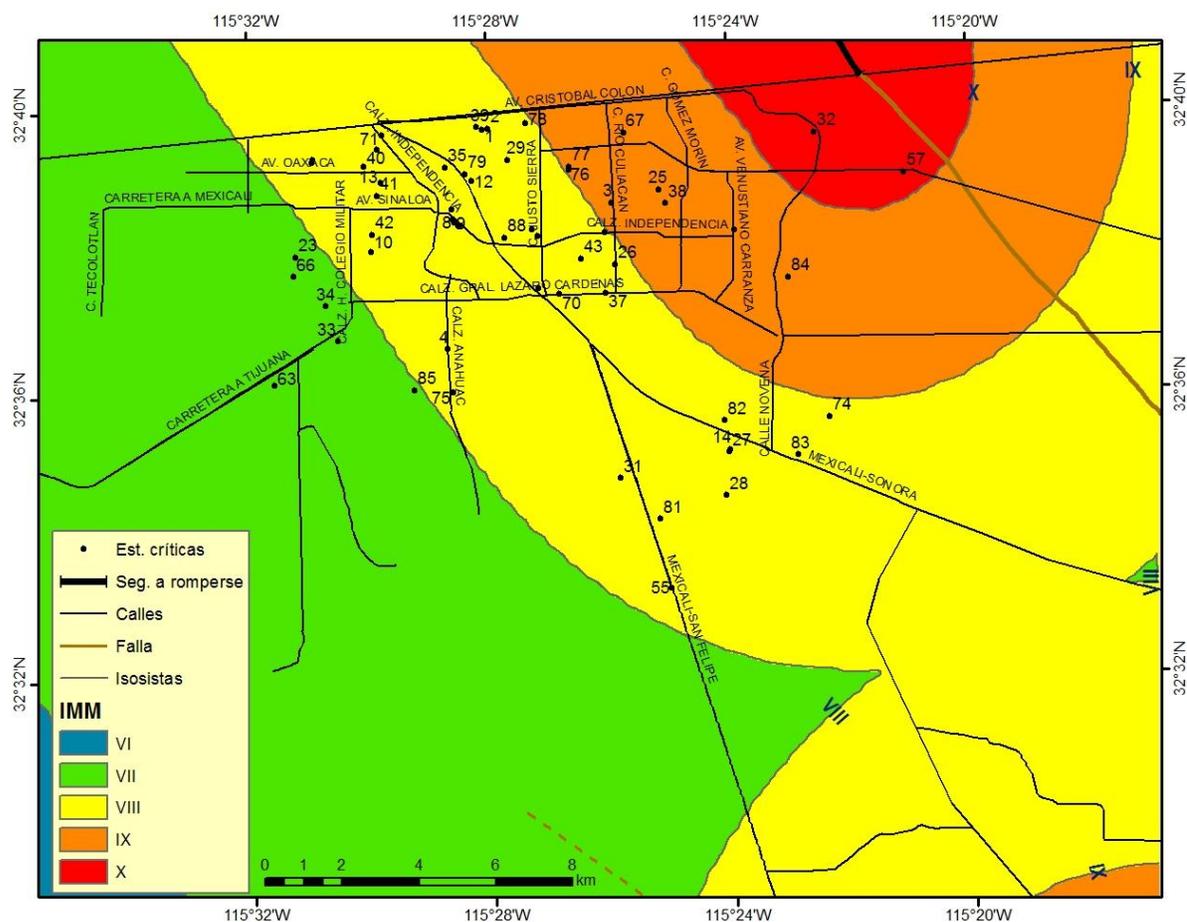


Figura 36: Mapa de intensidades en la escala de Mercalli modificada, para el análisis conjunto del rompimiento de segmentos de las fallas Imperial ($M=6.46$) y Cerro Prieto ($M=6.54$).

Debido a la uniformidad del efecto de sitio en la zona de estudio, las isosistas siguen la geometría de los segmentos de falla cuyo rompimiento se postula. Por su cercanía, la falla Imperial produce los valores más grandes dentro del área urbana de Mexicali, mientras que los efectos de la falla Cerro Prieto sólo predominan en la zona suroriental de los mapas predictivos.

A partir de los mapas de microzonificación, es posible asignar los valores esperados de la respuesta sísmica a cualquier punto dentro de la zona urbana de Mexicali. Por ejemplo, el suelo correspondiente a la estructura # 77 estará sujeto a una aceleración máxima horizontal de 310 cm/s^2 (figura 33), mientras que la aceleración horizontal máxima

que experimentaría allí una estructura de un grado de libertad, amortiguamiento del 5% y periodo de 0.5s, es de 650 cm/s^2 (figura 35), de tal manera que si se pretende que esa estructura quedase intacta después del terremoto, debería verificarse que es capaz de resistir dicha sollicitación sísmica y aplicar los reforzamiento estructurales que fueran necesarios.

IV.2 Daños estimados para las estructuras críticas consideradas en el estudio

El mapa de isosistas para el escenario propuesto (figura 36) permite identificar la intensidad sísmica (IMM) a la que estaría sometida cada una de las 88 estructuras críticas seleccionadas. De éstas, 65 están dentro de la ciudad mientras que las restantes están en los alrededores. Para cada una de las estructuras, se combina el valor correspondiente de la IMM (leído de la figura 36) y el tipo estructural asignado en la tabla V para estimar el *factor central de daño* por medio de las matrices de vulnerabilidad (tabla XX para matrices originales del ATC-13 y tabla XXI para matrices calibradas). La tabla XXIV contiene los resultados del *factor central de daño* calculado para las 88 estructuras críticas.

Tabla XXIV. Daños esperados, en términos del factor de daños (FCD), en las estructuras críticas para el escenario sísmico propuesto. ID: identificación de la estructura en el mapa. TC: tipo de construcción, e IMM: intensidad de Mercalli Modificada.

ID	CLASIFICACIÓN	NOMBRE	T.C	IMM	FCD sin calibrar	FCD calibrado
1	Hospitales	Clinica 30	CR	VIII	6.88	15.40
2	Hospitales	Clinica 31	CR	VIII	6.88	15.40
3	Potabilizadoras	PO1 Río Culiacan	CR	IX	15.40	16.28
4	Policía	Seguridad Pública	CR	VIII	6.88	15.40
5	Edif. De Gob.	Poder Ejecutivo	CR	VIII	6.88	15.40
6	Edif. De Gob.	Palacio Municipal	CR	VIII	6.88	15.40
7	Edif. De Gob.	Palacio Federal	CR	VIII	6.88	15.40
8	Edif. De Gob.	Poder Legislativo	CR	VIII	6.88	15.40
9	Edif. De Gob.	Poder Judicial	CR	VIII	6.88	15.40
10	Hospitales	ISSSTECALI	CR	VIII	6.88	15.40
11	Hospitales	ISSSTE	CR	VIII	6.88	15.40
12	Bomberos	Est. de bomberos #1	MR	VIII	15.68	28.98
13	Bomberos	Est. de bomberos # 2	MR	VIII	15.68	28.98
14	Bomberos	Est. de bomberos # 3	MR	VIII	15.68	28.98
15	Bomberos	Est. de bomberos # 4	MR	VIII	15.68	28.98
16	Bomberos	Est. de bomberos # 5	MR	VIII	15.68	28.98
17	Bomberos	Est. de bomberos # 14	MR	< VI	Sin daños	Sin daños
18	Bomberos	Est. de bomberos # 19	MA	VIII	5.95	11.84
19	Bomberos	Est. de bomberos # 20	MR	VII	6.76	15.68
20	Bomberos	Est. de bomberos # 21	MR	VI	1.90	4.60
21	Bomberos	Est. de bomberos # 22	MR	VII	6.76	15.68
22	Policía	Est. de policía Baja California	MR	VIII	15.68	28.98
23	Policía	Est. de policía Nacionalistas	MR	VII	6.76	15.68
24	Policía	Est. de policía km 43	MR	< VI	Sin daños	Sin daños
25	Policía	Est. de policía Col. Miraflores	MR	IX	28.98	45.76
26	Policía	Est. de policía Col. Indep.	MR	VIII	15.68	28.98
27	Policía	Comand. del policía Z. Oriente	MR	VIII	15.68	28.98
28	Policía	Est. de policía Col. Robledo	MR	VIII	15.68	28.98
29	Policía	Est. de policía Col. Industrial	MR	VIII	15.68	28.98
30	Policía	Est. de policía Col. Esperanza	MR	VII	6.76	15.68
31	Policía	Est. de policía Rivera Campestre	MR	VIII	15.68	28.98
32	Policía	Est. de policía Compuertas	MR	X	45.76	61.84
33	Policía	Est. de policía Papago	MR	VII	6.76	15.68
34	Policía	Est. de policía Virreyes	MR	VII	6.76	15.68
35	Policía	Est. de policía Zona Centro	MR	VIII	15.68	28.98
36	Cruz roja	Cruz Roja Poniente	CR	VIII	6.88	15.40
37	Cruz roja	Cruz Roja Oriente	CR	VIII	6.88	15.40
38	Rescate	Rescate Aguiluchos A.C.	MR	IX	28.98	45.76
39	Escuela	Sec # 1 18 de Marzo	MR-Map	VIII	6.61	15.35
40	Escuela	Sec # 4	MA10% y 90%CR	VIII	4.52	15.04
41	Escuela	Primaria Vicente Guerrero	MA	VIII	5.95	11.84
42	Escuela	Sec # 50 Primaria Patria	CR y MA con MR	VIII	8.88	18.90
43	Deportivo	Gimnasio UABC	MAA	VIII	4.71	5.87
44	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
45	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
46	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños

Tabla XXIV. (continuación) Daños esperados, en términos del factor de daños (FCD), en las estructuras críticas para el escenario sísmico propuesto. ID: identificación de la estructura en el mapa. TC: tipo de construcción, e IMM: intensidad de Mercalli Modificada.

ID	CLASIFICACIÓN	NOMBRE	T.C	IMM	FCD sin calibrar	FCD calibrado
47	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
48	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
49	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
50	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
51	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
52	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
53	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
54	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
55	Puentes		P	VIII	9.37	9.37
56	Puentes		P	VII	4.35	4.35
57	Puentes		P	X	50.60	50.60
58	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
59	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
60	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
61	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
62	Puentes		P	< VI	Sin daños	Sin daños
63	Subest. Elect.	Ahumadita	SE	VII	4.93	4.93
64	Subest. Elect.	Centro Civico	SE	VI	3.83	3.83
65	Subest. Elect.	Carretera Tijuana	SE	VI	3.83	3.83
66	Subest. Elect.	Col. Nacionalista	SE	VII	4.93	4.93
67	Subest. Elect.	Cuauhtemoc	SE	IX	20.37	20.37
68	Subest. Elect.	Cuesta Rumorosa	SE	< VI	Sin daños	Sin daños
69	Subest. Elect.	FOVISSTE	SE	VIII	10.10	10.10
70	Subest. Elect.	Lázaro Cárdenas	SE	VIII	10.10	10.10
71	Subest. Elect.	Pueblo Nuevo	SE	VIII	10.10	10.10
72	Subest. Elect.	Xochimilco	SE	IX	20.37	20.37
73	Subest. Elect.	Toros	SE	VIII	10.10	10.10
74	Subest. Elect.	Tecnológico	SE	VIII	10.10	10.10
75	Albergues	Centro dep. Juventud 2000	MA	VIII	5.95	11.84
76	Albergues	Auditorio del Estado	CR	IX	15.40	16.28
77	Albergues	Estadio Nido de las Águilas	CR	IX	15.40	16.28
78	Albergues	Museo UABC	CR	VIII	6.88	15.40
79	Albergues	Teatro del Estado	CR	VIII	6.88	15.40
80	Aeropuerto	Gral. Sánchez López Taboada	CR	VIII	6.88	15.40
81	Industria	El Dorado	MA con MR y lám.	VIII	9.40	16.55
82	Industria	El Vigía	MA con MR y lám.	VIII	9.40	16.55
83	Industria	Nelson	MA con MR y lám.	VIII	9.40	16.55
84	Potabilizadoras	PO2 Col. Calles	CR	IX	15.40	16.28
85	Potabilizadoras	PO3 Xochimilco	CR	VII	4.57	6.88
86	Puentes M	Láz. Cárdenas y López Mateo	PM	VIII	4.60	4.60
87	Puentes M	Cal. Independ. López Mateo	PM	VIII	4.60	4.60
88	Puentes M	Cal. Independ. S. Ferrocarril	PM	VIII	4.60	4.60

Se espera que los resultados reales posiblemente estén dentro del rango delimitado por los valores de las dos últimas columnas de la tabla XXIV. Los daños estructurales para estos dos escenarios, así como los efectos sobre el funcionamiento de la ciudad, son como sigue.

Los resultados obtenidos indican que, las estructuras críticas seleccionadas tendrán daños ligeros (FD=1 a 10) en 12 edificaciones; daños moderados (FD=10 a 30), en 53 edificaciones; daños fuertes (FD=30 a 60), en 4 edificaciones, y daños mayores (FD=60 a 100), en 1 edificación. En los casos de daños ligeros y moderados, la mayoría de los daños no son estructurales mientras que, para daños fuertes y mayores se esperan daños importantes a nivel estructural.

Los edificios de gobierno, hospitales, Cruz Roja y el aeropuerto presentan daños ligeros cuando éstos se estiman con matrices sin calibrar, lo cual indica que sufrirían daños bien localizados y significativos en algunas componentes no estructurales, pero que generalmente no requieren una reparación significativa. Las actividades en estas edificaciones no serían interrumpidas por daños estructurales, salvo que el edificio deba desocuparse hasta que haya una inspección de ingeniería luego del terremoto. Por otra parte, si se utilizan matrices calibradas para evaluar el comportamiento de estas estructuras, se encuentran daños moderados, lo cual indica que sufrirían daños bien localizados y significativos de muchas componentes no estructurales y algunas estructurales que requieren reparación. Los daños calculados están entre el 10% y 30% del costo total de los edificios. Para el nivel de daños moderado se espera un 10% de daños estructurales (ATC-13, 1985). Las actividades se interrumpirán de 1 a 2 días hasta verificar la seguridad del edificio.

Adicionalmente, se presentan las estimaciones de los tiempos de recuperación al 100% de su funcionamiento para la infraestructura importante (subestaciones eléctricas y potabilizadoras) utilizando las funciones de recuperación provistas por el ATC-13 (1985) y FEMA-226 (1992). Los tiempos de restauración de funcionalidad reflejan no sólo la

pérdida de funcionalidad debida a daños estructurales y no estructurales de las estructuras sino también la debida a daños del equipo indispensable para su función social, mobiliario, estructuras secundarias, etc. También están incluidos los efectos de los daños a las líneas vitales como pérdida parcial o total de energía, agua potable, comunicación, etc.

Los edificios de gobierno que presentan daños ligeros seguirían funcionando parcialmente, tendrían un tiempo promedio de restauración de 6 días para funcionar al 30%, 11 días para funcionar al 60% y 28 días para funcionar al 100% brindando servicio a la población. Si presentan daños moderados, su tiempo de restauración sería de 34 días para funcionar al 30%, 53 días para funcionar al 60% y 91 días para funcionar al 100%.

Aún en instalaciones de salud con daños ligeros, el funcionamiento sería parcial y la capacidad de la atención a la población se reduciría, a la vez que aumentarían las actividades de emergencia. Estos hospitales tendrían un tiempo de restauración de 17 días para funcionar al 30% de su capacidad funcional, 27 días para funcionar al 60% de su capacidad funcional y 56 días para recobrar totalmente su capacidad funcional. En el caso de hospitales con daños moderados, los tiempos de restauración serían de 53 días para funcionar al 30% de la capacidad funcional normal, 93 días para funcionar al 60% y 156 días para recuperar el 100% de su funcionalidad.

Las potabilizadoras 1 y 2 recibirían daños moderados. El servicio a la población sería parcial durante los siguientes 110 días hasta que se restaure el 100% de la funcionalidad normal. El tiempo de restauración para funcionar al 30% sería de 15 días y 51 días para funcionar al 60%. La potabilizadora 3 presentaría daños ligeros, lo que indica que estaría funcionando al 100% en 3 días

Ocho de las subestaciones eléctricas de la ciudad sufrirían daños moderados y tomaría unos 25 días en restaurar totalmente el funcionamiento de cada una de ellas. Dos subestaciones (Ahumadita y Colonia Nacionalista) presentarían daños ligeros y su tiempo estimado de restauración al 100% sería de 6 días para cada una de ellas. Finalmente las

subestaciones Centro Cívico y Carretera a Tijuana sufrirían daños leves que no afectarían significativamente su funcionamiento. Esto significa que la ciudad quedaría con limitado servicio de electricidad por aproximadamente un mes (si todas las subestaciones pueden ser reparadas simultáneamente) y el servicio casi normal tomaría varios meses en restaurarse. Además de las molestias para la población y los efectos limitantes en las operaciones de emergencia, especialmente de los servicios de salud. Esta falta de energía eléctrica tendría efectos importantes, también en las condiciones de seguridad pública después del desastre (especialmente durante las noches) y limitaría de manera significativa las actividades de producción. Esto ilustra los efectos sociales y económicos que conllevan los daños físicos directos a la infraestructura crítica.

El cálculo para la estación de policía Compuertas y el puente con ID 57 de acceso a la ciudad, produce daños fuertes usando matrices sin calibrar. Estos niveles de daño indican que requieren reparaciones fundamentales y sus actividades serían interrumpidas de dos semanas a tres meses. Asimismo, rescates Aguiluchos A. C., la estación de policía Miraflores y el puente con ID 57 presentan daños fuertes usando matrices calibradas. Daños a infraestructura de auxilio y seguridad, como estaciones de bomberos y policía, afectarían de manera significativa la capacidad interna de respuesta a la emergencia en tanto que daños a los puentes de acceso a la ciudad afectarían la efectividad de la asistencia que pudiera venir de ciudades y regiones vecinas. La estación de policía Compuertas, por ejemplo, presenta daños mayores cuando se usan las matrices calibradas. Esto corresponde a un daño principal generalizado de la estructura que pudiera resultar en la demolición, reparación o modificación de la edificación. En muchos casos, resulta técnica y económicamente más conveniente demoler una estructura con este nivel de daños.

Los puentes evaluados son convencionales de acceso a la ciudad. Es decir al puente 57, aunque no dejaría incomunicada a la ciudad pues existen otros lugares de acceso, disminuiría las opciones de entrada-salida y aumentaría la confusión en el transporte. Adicionalmente, se evaluó la conducta de tres puentes principales en el centro de la ciudad considerando que su daño afectaría significativamente el tráfico vehicular. Estos puentes

están localizados en dos vialidades que atraviesan por completo la ciudad y que tienen gran afluencia de vehículos. Estos puentes presentarían daños ligeros por un monto promedio del 4% del costo total (FEMA 226, 1992). La restauración de su funcionamiento al 100% tomaría unos 7 días.

Daños a la distribución de gas y al sistema de vías serían también significativos. Aun cuando las tuberías de gas presentarían daños ligeros, se estima que se tendría un total de 160 rompimientos en los 121.35 km de tuberías que forman el sistema de gas de la ciudad. Debido a la peligrosidad inminente asociada con las fugas de gas, estas rupturas requerirían atención inmediata y disponibilidad de los necesarios recursos humanos, técnicos y financieros. En cuanto al sistema vial, las vías federal y estatal presentan daños ligeros, con 1.2 km dañados de un total de 35.64 km para la vía federal y 1.98 km dañados de un total de 86.18 km para la vía estatal.

IV.3 Análisis individual de la seguridad sísmica de una muestra de estructuras críticas seleccionadas

En la sección anterior, se estimó el nivel de daños esperados para las 88 estructuras críticas y líneas vitales seleccionadas utilizando matrices de vulnerabilidad basadas en el ATC-13 (1985) y FEMA-226 (1992). Estas matrices, sin embargo, no consideran las características específicas de cada estructura sino que estiman los niveles de daños promedios más probables encontrados estadísticamente para una población grande de estructuras. Para considerar las características específicas de una estructura en la determinación de su resistencia sísmica, se utilizó el método de inspección visual rápida de estructuras sugeridas por el ATC-21 (FEMA-154, 2002). Este método se explicó en la sección II.8 y se aplicó para determinar la seguridad sísmica de una muestra de 11 estructuras críticas seleccionadas. La aplicación de este método da como resultado una

puntuación para cada estructura analizada que indica su nivel de resistencia sísmica. Por ejemplo, una puntuación de $S = 3$ implica una probabilidad 1 en 1000, de que el edificio colapse si la vibración asumida para el suelo ocurriese. Una puntuación de $S = 2$ implica una probabilidad de 1 en 100, de que el edificio colapse si esa vibración del suelo ocurriese. De la misma manera, un $S = 1$ implica la probabilidad de 1 en 10 que el edificio colapse si ocurriese esa vibración del suelo. Un valor de $S = 2$ se considera que representa una resistencia sísmica razonable (FEMA 154, 2002). Los resultados de la inspección visual rápida se presentan en la tabla XXV.

Tabla XXV. Resultados de inspección visual rápida de una muestra de estructuras críticas, con el método del ATC-21.

No	Estructura Inspeccionada	Puntuación	Observaciones
1	Clínica 30 IMSS	1.9	irregularidad planta
2	Clínica 31 IMSS	1.9	irregularidad planta
3	ISSSTE	2.4	
4	ISSSTECALI	2.2	
5	Palacio Federal	-0.1	irregularidad vertical y planta
6	Palacio Municipal	2.4	
7	Poder Ejecutivo	1.9	irregularidad planta
8	Poder Judicial	2.4	
9	Poder Legislativo	0.4	irregularidad vertical
10	Potabilizadora 1	2.2	
11	Seguridad Pública	0.2	irregularidad vertical

Los resultados de la tabla XXV indican que la mayoría de las estructuras críticas de la muestra seleccionada presenta una puntuación que está por debajo del valor 2 recomendado como razonable. La estructura con la menor puntuación es el edificio del Palacio Federal, para el que se recomienda hacer un estudio estructural detallado, pues su puntuación implica una probabilidad alta de que colapse. Los edificios del Poder Legislativo y el edificio de la Seguridad Pública también presentan puntuaciones que sugieren la necesidad de un estudio estructural detallado. Los valores de las puntuaciones de los demás edificios son más próximos a 2, lo que indicaría que tienen la resistencia sísmica suficiente para mantenerse en pie ante la ocurrencia de los terremotos propuestos.

Capítulo V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a su localización en una zona sísmicamente activa a la falta de una planificación del crecimiento y de preparación apropiada para dichas condiciones, la ciudad de Mexicali se encuentra sujeta a un nivel de riesgo sísmico. Esta tesis contribuyó al proyecto de microzonificación sísmica de Mexicali, mediante una cuantificación inicial del riesgo sísmico de Mexicali y, en el proceso, provee un mejor entendimiento de las características, causas y distribución de dicho riesgo. Para lograr este objetivo, este estudio produjo escenarios de daños sísmicos esperados para las estructuras críticas y los sistemas de las líneas vitales de la ciudad.

La preparación de los escenarios sísmicos resultan de la correlación del peligro sísmico de la zona (expresado como respuesta del suelo), con la distribución y características físicas de la infraestructura urbana, mediante relaciones de vulnerabilidad apropiadas.

La revisión de la sismotectónica regional, encuentra que las fallas locales son capaces de generar sismos fuertes con un elevado *peligro sísmico* para la ciudad de Mexicali. Esto resulta de la cercanía relativa de las fallas a la ciudad. El escenario sísmico que se presenta supone el rompimiento de dos fallas propuestos por Anderson y Bodín (1987):

- a) segmento norte de la falla Imperial, desde Brawley, California, a la frontera de Estados Unidos con México; su longitud de ruptura es de 36.5 km y $M_w = 6.46$. La fecha probable de ocurrencia es entre 2010 y 2050.
- b) Segmento norte de la falla Cerro Prieto, desde el volcán Cerro Prieto a Riito; su longitud de ruptura es de 42 km y $M_w = 6.54$. La fecha probable de ocurrencia es entre 2020 y 2060.

La aplicación de las ecuaciones de Joyner y Fumal (1985) y Boore *et al.* (1997) produce estimaciones de los valores máximos del movimiento sísmico horizontal del suelo (tabla XXVI). Los efectos locales del suelo en la vibración sísmica a nivel de superficie fueron incorporados mediante la velocidad de propagación de ondas de corte en los primeros 30 m del subsuelo.

Tabla XXVI: Resumen de la respuesta sísmica del suelo en Mexicali.

Movimiento del suelo			
Vmax (cm/s)	Amax (cm/s ²)	PSV (cm/s)	PSA (cm/s ²)
10-100	100-500	100-550	100-700

La distribución de intensidades sísmicas (expresadas en términos de la escala de Mercalli modificada, IMM) se obtuvo a partir de los valores máximos del movimiento del suelo. La distribución de intensidades sísmicas calculadas para la ciudad de Mexicali en el escenario propuesto tiene una buena aproximación a las distribuciones de intensidades observadas en los terremotos de El Centro en 1940 y del Valle Imperial en 1979. Para obtener esta buena aproximación, se utilizó la combinación sugerida por Wald *et al.* (1999) de las relaciones de la intensidad con la velocidad y la aceleración máxima del suelo propuestas por Trifunac y Brady (1975). El escenario para los dos rompimientos propuestos tiene intensidades entre VI y X para el área de Mexicali. La mayor parte de la ciudad se encuentra entre las intensidades VIII y IX, que representan daños moderados y fuertes en la

escala modificada de Mercalli. El mapa de intensidades describe a la distribución de los daños esperados en la ciudad, el cual, puede ser interpretado utilizando la descripción de la escala de intensidad IMM. Sin embargo, existen métodos de evaluación de daños que permiten hacer un análisis más detallado del daño a las estructuras. En este estudio, el daño esperado para estructuras críticas de Mexicali se evaluó aplicando métodos desarrollados por la Agencia Federal para la Gestión de las Emergencias de los Estados Unidos, FEMA. Se aplicaron matrices de vulnerabilidad y de recuperación de funcionalidad, propuestas por el ATC-13 (1985) en los diferentes tipos estructurales encontrados en Mexicali para estimar los daños esperados en una selección de estructuras críticas la ciudad (tabla XXVII). El método de Inspección Visual propuesto por el ATC-21 (FEMA-154, 2002) permite hacer un análisis más detallado de una muestra de estructuras críticas y estimar el daño esperado de acuerdo a su diseño, construcción y mantenimiento (tabla XXV). Finalmente, las matrices de vulnerabilidad y de recuperación propuestas por FEMA 226 (1992) producen una estimación los de daños alas líneas vitales de Mexicali.

Tabla XXVII: Resumen de la distribución del daño estimado a las estructuras críticas con el ATC-13 (1985)

Factor central de daño	No. Estructuras
Sin daños	18
Ligeros	12
Moderados	53
Fuertes	4
Mayores	1
TOTAL	88

Finalmente, cabe mencionar brevemente algunas de las posibles aplicaciones de este tipo de escenarios. Escenarios realistas (es decir, que predicen aproximadamente lo que sucedería en la realidad) se pueden usar, para preparar simulacros y ejercicios de respuesta a la emergencia basados en una buena estimación de los daños que se tendrían y de las condiciones que se presentarían cuando ocurra un terremoto real. Más importante todavía, estos ejercicios permiten identificar a las vulnerabilidades de una ciudad antes de que se produzca un desastre. Esto posibilita la definición e implementación de medidas efectivas y

factibles para reducir dicha vulnerabilidad y, por lo tanto, el nivel de daños que ocurriría cuando el sismo tenga lugar. Este proceso es lo que se denomina reducción del riesgo y es la forma más efectiva y eficiente de minimizar el impacto negativo de los fenómenos naturales. Escenarios de daños realistas son la base para la preparación de programas efectivos de reducción del riesgo.

Para lograr una estimación del riesgo más precisa y completa es recomendable implementar estudios adicionales a este trabajo para mejorar modelos y datos y, de esta manera, minimizar sus limitaciones. Algunas de las recomendaciones producidas por este estudio se detallan a continuación:

1. Los estudios de microzonificación deben ser actualizados con frecuencia, incorporando nuevos datos de sismotectónica, suelos, estructuras e implementando nuevos métodos.
2. Ampliar el catálogo de estructuras e infraestructura de la ciudad, donde se definan todos los tipos estructurales para mejorar futuros trabajos que se realicen sobre estimación de daños. Esto proporciona una visión completa de los impactos humano, financiero y funcional de un evento sísmico en la ciudad de Mexicali.
3. Aplicar el método de inspección visual rápida (ATC-21) a un mayor número de estructuras que las propuestas en este trabajo. Las que resulten con una puntuación “S” menor a 2.0 deben ser sometidas a una evaluación formal de su respuesta sísmica.
4. Es pertinente proponer la difusión de los resultados en la comunidad ingenieril, para calibrar su verosimilitud, y entre los grupos de tomas de decisiones para delinear respuestas pre-terremoto.

Referencias

- Abrahamson N. A. y Shedlock K. M. 1997. Overview of modern attenuation relationships. *Seismological Research Letters*. 68(1): 9-23 p.
- Abrahamson N. A. y Silva W. J. 1997. Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes, *Seismological Research Letters*. 68(1): 94-127 p.
- Acosta Chang J. G., Arellano Zepeda G. A., Ruiz Cruz E., Mendoza Garcilazo L. H., Reyes Serrano R. y Rocha Guerrero E. 2007. Microzonificación sísmica de Mexicali. Trabajo técnico-científico del departamento de Sismología del CICESE (PA: 75363). 107 pp.
- Acosta Chang. J. G., Montalvo A., J. C. 1997. Intensidades sísmicas para la región de Tijuana, Baja California, a partir del posible rompimiento de la falla La Nación ($M_w=6.5$). *GEOS*. 17(3): 128-138 p.
- Acosta J., Álvarez, S., Arellano, G., Mendoza, L. 1995. Mapas sísmicos predictivos para la región de Tijuana, B. C. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas, CTSIT9503. Serie Sismología. CICESE: 81 pp
- Acosta, J., Álvarez, S., Mendoza, L., Arellano, G. 1994. Microzonación del área de Tijuana, B. C., con base en la distribución de períodos dominantes del movimiento del suelo. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas, CISIT9402. Serie Sismología. CICESE: 34 pp.
- Aki K. 1957. Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo* 35: 415–457 p.
- Aki K. 1988. Local site effects on strong ground motion. *Earthquake engineering and soil dynamics II. Recent advances in ground-motion evaluation*. Von Thun Ed. ASCE Geotech. Special Publication. 20: 103-155 p.
- Álvarez S. y Acosta J. 1995. Amplificación relativa del movimiento del suelo en la ciudad de Tijuana con registros de explosión. Informe técnico. Comunicaciones Académicas. CICESE. CTSIT9512.
- Álvarez S. y Acosta J. 1997. Microzonación de periodos dominantes del movimiento del suelo en Ensenada, B. C. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas. CICESE. CTSIT9709.
- Álvarez S. Arellano G., Montalvo J. C. y Acosta J. 1994(b). Perfiles de velocidad en la ciudad de Tijuana, B.C. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas. Serie Sismología. CICESE. CTSIT9403. 11 pp.

- Álvarez S. González J., Montalvo J. C. y Acosta J. 1994(a). Medición de periodos dominantes con microtemores en la ciudad de Tijuana, B.C. Informe Técnico. Comunicaciones Académicas. Serie Sismología. CICESE. CTSIT9404. 21 pp.
- Anderson J. G. y Bodin P. 1987. Earthquake recurrence models and historical seismicity in the Mexicali-Imperial Valley. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 77(2): 562-578 p.
- Anderson J. G. y Luco J. E. 1983. Consequences of slip rate constraints on earthquake occurrence relations. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 73(2): 471-496 p.
- Archuleta R. J. 1982. Analysis of near-source static and dynamic measurements from the 1979 Imperial Valley earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 72(6A): 1927-1956 p.
- Arellano Zepeda G.A., Álvarez Tinajero S. y Acosta Chang J.G. 1999. Red acelerométrica de Tijuana, etapa: abril 1998 a junio 1999. Informe técnico del CICESE (CTSIT9903)
- ATC-13 1985. Earthquake damage evaluation data for California, Applied Technology Council. Federal Emergency Management Agency. California.
- Bard P. Y. 1995. Effects of surface geology on ground motion: recent results and remaining issues. In: Proc. Of the 10th European Conference on Earthquake Engineering. Rotterdam: 305-323 p.
- Barnard F. L. 1968. Structural Geology at the Sierra de los Cucapas, Northeastern Baja California, Mexico and Imperial County, California. PhD Thesis. Dep. of Geology. University of Colorado. 155 pp.
- Boore D. M., Joyner W. B. y Fumal T. E. 1997. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of recent work. *Seismological Research Letters*. 68(1): 128-152 p.
- Boore D. M. y Joyner W. B. 1982. The empirical prediction of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 72(6): s43-s60 p.
- Campbell W. K. 1981. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 71(6): 2039-2070 p.
- Campillo M. y A. Paul. 2003. Long-range correlations in the diffuse seismic coda. *Science* 299: 547-549 p.
- Chatelain J., Tucker B., Guillier B., Kaneko F., Yepes H., Fernandez J., Valverde J., Hofer G., Souris M., Duperier E., Yamada T., Bustamante G. y Villacis C. 1999.

Earthquake risk management pilot project in Quito, Ecuador. *Geojournal* 49: 185-196 p.

- Chávez D., González J., Reyes, A., Medina, M., Duarte, C., Brune, J.L., Simons, R., Hutton, L.K., German, P.T. y Johnson, C.L., 1982, Main shock location and magnitude determination using combined U. S. and Mexican data. En: *The Imperial Valley California Earthquake of October 15, 1979*, U.S. Geological Survey, Professional Paper 1254: 51-55 p.
- Chávez-García F. J. y Cuenca J. 1998. Site effects and microzonation in Acapulco. *Earthquake Spectra* 14(1): 75-93 p.
- Choy G. L. y J. L. Boatwright. 1995. Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress. *Journal of Geophysical Research*. 100(B9): 18,205-18,228 p.
- Darragh R. B. y Shakal A. F. 1991. The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 81: 1885-1899 p.
- Doser D. I. y Kanamori H. 1986. Spatial and temporal variations in seismicity in the Imperial Valley (1902-1984). *Bulletin of the Seismological Society of America*. 76: 421-438 p.
- Ebel J. E., L. J. Burdick, y G. S. Stewart. 1978. The source mechanism of the August 7, 1966 El Golfo earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 68: 1281-1292 p.
- Esteva L., y Rosenblueth E. 1964. Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes. *Bol. Soc. Mex. Sism.*, 2(1): 1-18 p.
- FEMA 226, 1992. Collocation impacts on the vulnerability of lifelines during earthquakes with applications to the Cajon Pass, California. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C 110 pp.
- FEMA 154, 2002. Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A Handbook ATC-21. Applied Technology Council. Federal Emergency Management Agency. Edition 2. Washington, D.C. 140 pp.
- Frez Cárdenas J. y Frías Camacho V. M. (1998). Mapas anuales de sismicidad para la región fronteriza de ambas Californias. *GEOS*. 18(2):112-130 p.
- Frez Cárdenas J. y J.J Gonzalez, 1989, Sismicidad y mecanismos focales en el Valle de Mexicali-Imperial, *Geofísica Internacional*, 28: 643-691 p.
- Frez, J. (1982). Main shock location and fault mechanism. En *The Mexicali Valley Earthquake of 9 June 1980*, J. G. Anderson and R. S. Simons, Editors. En: *The*

Mexicali Valley Earthquake of June 9, 1980 edited by J.G. Anderson and R.S. Simons, Newsletter of the Earthquake Engineering Research Institute. 16: 74-75 p.

- Frez, J. y González, J.J., 1991. Crustal structure and seismotectonics of northern Baja California. *En: J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit, editors, The Gulf and Peninsular Province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47: 261-283 p.*
- Frez J., González J.G., Acosta J.G., Nava F.A., Méndez I., Carlos J., García-Arthur R.E., y Alvarez M. 2000. A detailed Microseismicity Study and Current Stress Regime in the Peninsular Ranges of Northern Baja California, Mexico: The Ojos Negros Region. *Bulletin of the Seismological Society of America. 90(5): 1133-1142 p.*
- Fumal T. E. y Tynsley, J. D. 1985. Mapping shear-wave velocities of near-surface geologic materials. Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region. *USGS professional paper 1360: 127-149 p.*
- Gastil R. G., Phillips R. P., y Allison E. C. 1975. Reconnaissance geology of the state of Baja California. *The Geological Society of America, Inc. Colorado. 170 pp.*
- Hanks T.C. y Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research 84(B5): 2348-50 p.*
- Herrmann R. B y C. J. Ammon. 2004a. Computer Programs in Seismology version 3.20: Surface Waves, Receiver Functions, and Crustal Structure, St. Louis University, Missouri.
- Herrmann R.B., y C. J. Ammon. 2004b. surf96 from computers programs in seismology, surface waves, receiver functions and crustal structure, version 3.30. Department of Earth and Atmospheric Sciences. Saint Louis University.
- Ibarra Gema. 2004. Microzonación de periodos dominantes en los principales centros urbanos de Baja California. Tesis de Maestría. CICESE.
- Jasso Martínez J. E. 2003. Efecto de la geología local en la respuesta sísmica de suelos, en el Valle de Ojos Negros, Baja California. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. 107 pp.
- Joyner W. B. y Boore D. M. 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America. 71(6): 2011-2038 p.*
- Joyner W. y Fumal T. E. 1984. Use of measured shear wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion. *Proceedings, 8th World Conference on Earthquake Engineering. San Fco. Ca. 2: 777-783 p.*

- Joyner W. y Fumal T. 1985. Predictive mapping of earthquake ground motion. En: Evaluating earthquake hazards in the L.A. region: USGS Professional Paper 1360: 203-220 p.
- Joyner W.B., Warrick R. E., y Fumal T. E. 1981. The effect of quaternary alluvium on strong ground motion in the Coyote Lake, California, earthquake of 1979. Bulletin of the Seismological Society of America. 71(4): 1333-1349 p.
- Leeds A. L. 1979. Relocation of $m_b > 5.0$ northern Baja California earthquakes using S-P time: M.S. thesis, University of California San Diego, La Jolla, California. 101 pp.
- Legg, M.R. y Kennedy M. P. 1991. Oblique divergence and convergence in the California continental borderland. En: Earthquakes and other perils, San Diego region. Abbott and Elliot, eds. San Diego Association of Geologist. 1-16 p.
- Lomnitz C., Mooser F., Allen C. R., Brune J. N. y Thatcher W. 1970. Seismicity and tectonics of the Northern Gulf of California region, Mexico, preliminary results. Geofísica Internacional. 10: 37-48 p.
- Louie J. N. 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. Bulletin of the Seismological Society of America. 91: 347-364 p.
- McMechan G. A. y M. J. Yedlin. 1981. Analysis of dispersive waves by wave field transformation, Geophysics. 46: 869-874p.
- Mendoza L., Acosta J., Huerta C., González J., Delgado L. y Martín A. 1992. Estudios sobre el riesgo geológico y sísmico en la Colonia Del Río en la ciudad de Tijuana, B. C., México. CICESE. Reporte para el gobierno del Estado de Baja California. 121 pp.
- Meneses J.F., Restrepo J., Martínez E. y Gómez Gabriel. 2004. Vulnerabilidad sísmica y protección civil de los centros educativos de Mexicali, Baja California. México. Third International Congress on the Development of Physical Infrastructure Education. Nuevo Vallarta. 18 pp.
- Minch J., Minch E. y Minch J. 1998. Roadside geology and biology of Baja California. ISBN 0963109014. 188 pp.
- Mokhtar T.A., R.B. Herrmann, y D.R. Russell. 1988. Seismic velocity and Q model for the shallow structure of the Arabian shield from short-period Rayleigh waves, Geophysics. 53: 1379-1387 p.
- Montalvo J. C., Acosta J., Mendoza L., Alvarez S., Cossío T., y Chávez G. 1995a. Estudio de estabilidad de taludes en la colonia El Rubí, Tijuana B. C. Parte I:

Geología. CICESE. Informe técnico preparado para el Ayuntamiento de Tijuana, B. C. CTSIT9508.

- Montalvo J. C., Acosta J., Mendoza L., Alvarez S., Cossío T., y Chávez G. 1995b. Estudio de estabilidad de taludes en la colonia El Rubí, Tijuana B. C. Parte II: Sismología. CICESE. Informe técnico preparado para el Ayuntamiento de Tijuana, 87 B. C. CTSIT9508.
- Montalvo Arrieta J. C. 1996. Deslizamiento de laderas inducidos por terremotos en la ciudad de Tijuana, B. C. Tesis de maestría CICESE. 128 pp
- Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR of RTRI. 30(1): 25-33 p.
- NBS, 1980, Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58.1, NBS Special Publication 577, National Bureau of Standards, Washington, D.C.
- Nason R. 1982. Seismic - Intensity Studies in the Imperial Valley. The Imperial Valley, California earthquake of October 15, 1979: U.S. Geological Survey Professional Paper 1254: 259-264 p.
- Nava A. 1987. Terremotos. Fondo de Cultura Económica, S.A. de C. V. 156-158 p.
- Prince J., Mena E., Mora I., Brune J., Alonso L., y Venon F. 1982. Observations of Damage and Intensity. En: The Mexicali Valley Earthquake of June 9, 1980 edited by J.G. Anderson and R.S. Simons, Newsletter of the Earthquake Engineering Research Institute. 16: 87-94 p.
- Puente, I. y A. de la Peña. 1978. Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto. First symposium on the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, México.
- Raines G., Hatch M., y Haley S. 1991. Liquefaction potential in the San Diego-Tijuana metropolitan region. En: Environmental Perils San Diego Region. San Diego Association of Geologists. 109-118 p.
- RADIUS, 2000. Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters, Tijuana RADIUS PROJECT. UN-ISDR.
- Reagor B. G., Stover C. W., Algermissen, S. T. Steinbrugge, K. V. Hublak Peter, Hopper M.G, y Barnhard, L.M, 1982, Preliminary evaluation fo the distribution of seismic intensities. En: The Imperial Valley, California earthquake of October 15, 1979: U.S. Geological Survey Professional Paper 1254: 251-258 p.
- Reglamento de la ley de edificaciones del estado de baja california. 1976. XVI Legislatura. Periódico Oficial No. 16. Tomo LXXXIII, Sección Primera. 442 pp.

- Richter C. F. 1958. Elementary Seismology, W. H. Freeman and Co., San Francisco.
- Reichle M. S., Davis J. F., Kahle J. E., Atkinson T. G., Johnson E. H., Olson R. A., Lagorio H. J., Steinbrugge K. V. y Cluff L. S. 1990. Planning Scenario for a major earthquake in the San Diego-Tijuana metropolitan area. California Division of Mines and Geology. Special Publication. 100: 51 pp.
- Riepl J. , Bard P. Y., Hatzfeld D., Papaioannou Ch., y Nechtschein S. 1998. Detailed Evaluation of site-response estimation methods across and along the sedimentary valley of Volvi (Euroseistest). Bulletin of the Seismological Society of America. 88(2): 488-502 p.
- Rosenblueth, E. 1964. Probabilistic design to resist earthquakes. Journal of Engineering Mechanics, ASCE. 90(EM5): 189-219 p.
- Rosquillas A. y Mendoza L. 2002. Proyecto RADIUS, caso Tijuana. Reporte Final. H. Ayuntamiento de Tijuana, B.C
- Rogers, Tinsley, y Borchardt. 1985. Predicting relative ground response. En: Evaluating Earthquake hazards in the Los Angeles region. Ziony ed. USGS Professional Paper. 1360: 221-248 p.
- Shakal A. F. y D. L. Bernreuter. 1981. Empirical analyses of near-source ground motion, U.S. Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-2095.
- Shapiro N. M., M. Campillo, L. Stehly y M. Ritzwoller. 2005. High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise, Science 307: 1615-1618 p.
- Sharp R.V. 1982a. Comparison of 1979 surface faulting with earlier displacements in the Imperial Valley. En: The Imperial Valley, California earthquake of October 15, 1979: U.S. Geological Survey Professional Paper. 1254: 213-221 p.
- Sharp R.V. 1982b. Surface ruptures observed at Ejido Saltillo, Baja California after the Mexicali Valley earthquake of 9 June, 1980. En: The Mexicali Valley Earthquake of June 9, 1980 edited by J.G. Anderson and R.S. Simons, Newsletter of the Earthquake Engineering Research Institute. 16: 94-99 p.
- Shapiro, N. M., M. Campillo, L. Stehly y M. Ritzwoller. 2005. High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise, Science 307: 1615-1618 p.
- Soares J. J. 2003. Aplicación de la microzonación sísmica a la seguridad de estructuras críticas en la ciudad de Ensenada. Tesis de maestría. CICESE. 92 pp.
- Stephenson W. J., J. N. Louie, S. Pullammanappallil, R. A. Williams, y J. K. Odum. 2005. Blind shear-wave velocity comparison of REMI and MASW results with boreholes to 200 m in Santa Clara Valley: Implications for earthquake ground-

motion assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 95(6): 2506-2516 p.

- Sylvester A. G. 1979. Earthquake damage in Imperial Valley, California May 18, 1940, as reported by T. A. Clark. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 69(2): 547-568 p.
- Stock J. M., Martín A., Suárez F., y Miller M. 1991. Miocene to holocene extensional tectonics and volcanic stratigraphy of NE Baja California, Mexico. En: Walawender M. J. and Hanan B. (Eds.). *Geological excursions in Southern California and Mexico*. 1991 Annual Meeting Geological Society of America San Diego, California. 44-67 p.
- Suárez F, González M, Munguía L, Wong V, Vidal V y González J. 2001. Distribución de daños materiales en el Valle de Mexicali, B.C., ocasionados por los sismos de 1 de Junio y 10 de septiembre, de 1999, Mw = 4.8. *GEOS*. 21(1): 22-30 p.
- Suarez, F. Sieh k. E. y Elders W. E. 1982. A review of geological effects and damage distribution of the June 9, 1980, Mexicali Valley earthquake. En: *The Mexicali Valley Earthquake of June 9, 1980* edited by J.G. Anderson and R.S. Simons, Newsletter of the Earthquake Engineering Research Institute. 16: 99-105 p.
- Suárez-Vidal F., Armijo R., Morgan G., y Gastil G. 1991. Framework of recent and active faulting in Northern Baja California. En: *The Gulf and Peninsular Province of the California*. B. Simoneit and J. P. Dauphin (Editors). American Association of Petroleum Geologist Memorir 47, American Association of Petroleum Geologist. Tulsa Oklahoma, 285-300 p.
- Suárez Vidal F. 1999. Sismos de $M > 6$ en el Valle de Mexicali-Imperial, generación y distribución de estructuras asociadas a licuefacción. *GEOS*. 19:1 15-23 p.
- Trifunac M, y Brady A. 1975. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 65(1): 139-162 p.
- Trifunac M. D. y Brady A. G. 1976. Correlations of peak acceleration, velocity and displacement with earthquake magnitude, distance and site conditions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 4: 455-471 p.
- Trifunac M. y Brune J. N. 1970. Complexity of energy release during the Imperial Valley, California, earthquake of 1940. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 60(1): 137-160 p.
- Ulrich F. P. 1941. The Imperial Valley earthquakes of 1940. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 31: 13-31 p.

- Villacís Villafuerte C. & Kaneko F., 1994. Seismic Microzoning, GeoHazards Internacional, USA. OYO Corporation, Japan. 27 pp.
- Vonder Stephen H. 1982. Surface Ruptures East Of Mexicali From The Imperial Valley Earthquake Of 15 October 1979. Bulletin of the Seismological Society of America. 72(2): 663-668 p.
- Wald, D. Quitariano V, Heaton T, y Kanamori H. 1999. Relationships between peak ground aceleracion, peak ground velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. Earthquake Spectra. 15(3): 557-564 p.
- Wallace Robert E. 1990. General features. En: The San Andreas System, California. U.S. Geological Survey Professional Paper. 1515: 3-5 p.
- Weaver, R. L. y O. I. Lobkis. 2001. On the emergence of the Greens function in the correlations of a diffuse field. Journal of the Acoustical Society of America. 110: 3011-3017 p.
- Weaver, R. L. y O. I. Lobkis. 2004. Diffuse fields in open systems and the emergence of the Green's function. Journal of the Acoustical Society of America. 116: 2731-2734 p.
- Wong Ortega V., J Frez Cárdenas. y F. Suárez Vidal. 1997. The Victoria, México, Earthquake of June 9, 1980, Geofísica Internacional. 36: 139-159 p.
- Winckell A., Le Page M., Chávez G. Vela R. y González C. 2000. Aportes para un escenario sísmico en Tijuana. Colegio de la Frontera Norte. ISBN 968-6075-84-4.

Apéndice A: Tipo de construcción en Mexicali

En esta tesis se hizo la estimación de los daños esperados para las estructuras críticas de Mexicali. Esta estimación se realizó con las matrices de vulnerabilidad propuestas por el ATC-13 (ATC, 1985) a las 84 estructuras clasificadas de acuerdo a su tipo estructural. Las figuras A1 a A8 presentan ejemplos de los 8 tipos estructurales identificados.

Observaciones: Marco dúctil significa un marco resistente a momentos que tiene la capacidad de deformarse sin romperse (dúctil o flexible). La energía sísmica se disipa en forma de energía de deformación. En el caso de la mampostería reforzada con marcos de acero de refuerzo, los elementos estructurales principales son las paredes que soportan la mampostería mientras que los marcos sirven de refuerzo.



Figura A1. Marcos dúctiles de concreto reforzado. (Auditorio del Estado)



Figura A2. Marcos dúctiles de concreto y marcos de acero con mampostería reforzada. (Escuela sec. # 50)



Figura A3. Marco dúctil de acero (Escuela Vicente Guerrero)



Figura A4. Marcos de acero arrojados (Juventud 2000)



Figura A5. Marcos de acero y marcos de concreto reforzado (Escuela sec. # 4)



Figura A6. Marcos de acero con paredes de mampostería o lámina



Figura A7. Mampostería reforzada (Estación de bomberos #2)



Figura A8. Mampostería reforzada con marcos de acero de refuerzo (Escuela sec. # 18)

Apéndice B: Inspección de estructuras críticas con el método ATC – 21

La evaluación de la seguridad sísmica de una muestra de estructuras críticas resulta de la aplicación del Método de Inspección Visual Rápida propuesto por el ATC-21 (FEMA 154, 2002). Este método considera las características específicas de cada estructura para determinar su seguridad sísmica y la necesidad (o no) de una evaluación estructural detallada.

En el análisis, la vista en planta de la estructura ha sido utilizada para identificar irregularidades geométricas y para calcular el área construida. El área total de construcción sirve para estimar la cantidad de personas que ocupan la estructura. La Figura B1 muestra ejemplos de irregularidades en planta mientras la Figura B2 muestra ejemplos de irregularidades verticales. Las figuras B3 a B13 contienen ejemplos de la aplicación de este método. Algunas observaciones en el formato han sido proporcionadas por ingenieros de mantenimientos de cada edificio.

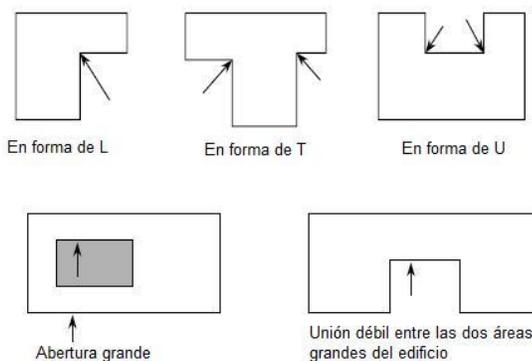


Figura B1. Irregularidad en planta

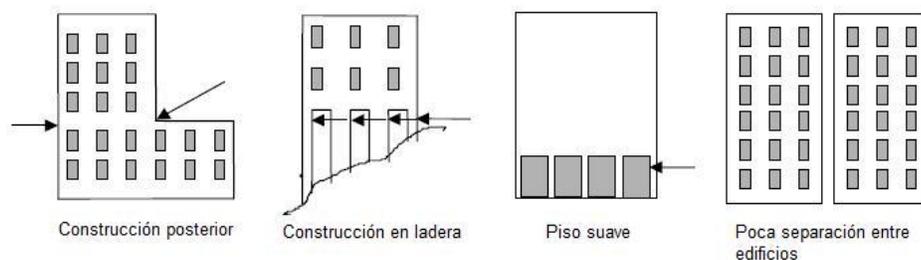


Figura B2. Irregularidad vertical

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

Escala:

Dirección Lerdo Zaragoza, Mexicali
 Otra Identificación
 No de pisos 5 Año construido: 1961
 Inspector : Ena Gámez Fecha: 02 de abril de 2008
 Area total (m²):14,300
 Nombre del edif: Clínica 30
 Uso: Hospital

OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA					
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro		
Serv. Emerg.	Industrial	Escuela	101-1000 (1000+)												
PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR, MC)	A5 (PRMNR)	C1 (MRM)	C2 (MC)	C3 (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.8	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
PUNTAJE FINAL S											1.9				
COMENTARIOS													Requiere Evaluación Detallada		
Cimentación reforzada con acero, con resistencia al concreto pero está permanentemente en contacto con agua. Muros de cortante y paredes de relleno. Algunas fracturas en las paredes													SI <input checked="" type="radio"/> NO <input type="radio"/>		

A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
 C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
 M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B3. Clínica 30.

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

Vista en planta

Dirección Frente a Clínica 30
 Otra Identificación
 No de pisos 5
 Inspector : **Ena Gámez**
 Área total (m²): 13,092
 Nombre del edif: Clínica 31
 Uso: Hospital

Año construido: 1971
 Fecha: 02 de abril de 2008

Escala:

OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA			
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea Parapeto Emplaste Otro no reforzada			
Serv. Emerg.	Industrial	Escuela	101-1000 1000+										

PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5 (PRMNR)	C1 (MRM)	C2 (MC)	C3 (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6

PUNTAJE FINAL S	1.9
COMENTARIOS	Requiere Evaluación Detallada SI NO

A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
 C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
 M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B4. Clínica 31

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

Vista en planta

Dirección
 Otra Identificación 32°38'38.8"N 115°28'35.8"W
 No de pisos 5 Año construido:1976
 Inspector : Ena Gámez Fecha:02 de abril de 2008
 Area total (m²):10,500
 Nombre del edificio:ISSSTE
 Uso:Hospital

Escala:



OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA					
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro		
Serv. Emerg.	Industrial	Escuela	101-1000 (1000+)												
PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5 (PRMNR)	C1 (MRM)	C2 (MC)	C3 (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
PUNTAJE FINAL S										2.4					
COMENTARIOS													Requiere Evaluación Detallada SI <input type="radio"/> NO <input checked="" type="radio"/>		
Ingenieros de la ciudad de Mexico diagnosticaron que el hospital está en buen estado. No hay grietas estructurales, solo en emplastes															

A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
 C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
 M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B5. ISSSTE

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

Dirección
 Otra Identificación 32°38'00.07N 115°28'16.6W
 No de pisos 1 Año construido: 1983
 Inspector : **Ena Gámez** Fecha: 02 de abril de 2008
 Area total (m²): 4,795
 Nombre del edif: ISSTE
 Uso: Hospital

Escala:



OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA					
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro		
Serv. Emerg.	Industrial	Escuela	01-1000 1000 +												
PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5 (PRMNR)	C1 (MRM)	C2 (MC)	C3 (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
PUNTAJE FINAL S										2.2					
COMENTARIOS													Requiere Evaluación Detallada		
El perímetro del edificio es de bloque, las paerdas interiores son de yeso. No presenta daños estructurales. Tiene un area pequeña construida de acero.													SI	<input checked="" type="radio"/> NO	

- A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
- C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
- M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B6. ISSSTECALI

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

Dirección: Centro cívico Mexicali
 Otra Identificación:
 No de pisos: 3 Año construido: 1976
 Inspector: Ena Gámez Fecha: 02 de abril de 2008
 Área total (m²): 12,383
 Nombre del edif: Palacio Federal
 Uso: Edificio de Gobierno

Escala:

OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA					
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro		
Serv. Emerg.	Industrial	Escuela	101-1000 1000 +												
PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5 (PRMNR)	C1 (MRM)	C2 (MC)	C3 (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
PUNTAJE FINAL S										-0.1					
COMENTARIOS													Requiere Evaluación Detallada		
Se ha considerado la irregularidad vertical en este edificio por la apreciación que se tiene en planta, se ve claramente la unión de tres edificios unidos internamente con juntas, que al momento de un sismo puede ocurrir un golpeteo y colapsar. Se inspeccionó internamente y pudimos apreciar daños estructurales, como lo muestra la columna en la foto. Es necesario realizar un estudio detallado sobre este edificio.													<input checked="" type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO		

A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
 C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
 M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B7. Palacio Federal

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

Vista en planta

Dirección: Centro Cívico Mexicali
 Otra Identificación:
 No de pisos: 2 Año construido: 1983
 Inspector: **Ena Gámez** Fecha: 02 de abril de 2008
 Área total (m²): 7,312
 Nombre del edif: Palacio Municipal
 Uso: Edificio de Gobierno

Escala:

OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA					
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro		
Serv. Emerge.	Industrial	Escuela	101-1000 1000 +												
PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5 (PRMNR)	C1 (MRM)	C2 (MC)	C3 (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
PUNTAJE FINAL S										2.2					
COMENTARIOS													Requiere Evaluación Detallada SI NO		
Paredes de tabla roca, mampostería y material ligero. Estructura en buenas condiciones.															

A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
 C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
 M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B8. Palacio Municipal

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

Escala:

Dirección Centro Cívico Mexicali
 Otra Identificación
 No de pisos 4 Año construido: 1978
 Inspector : Ena Gámez Fecha: 02 de abril de 2008
 Área total (m²): 16.667
 Nombre del edif: Poder Ejecutivo
 Uso: Edificio de gobierno

OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA			
Auditorios	<u>Gobierno</u>	Oficina	Número de pers.	A	B	C	<u>D</u>	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea Parapeto Emplaste Otro no reforzada			
Serv. Emerge.	Industrial	Escuela	<u>101-1000</u> 1000 +										

PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5	C1 (PRMNR)	C2 (MC)	<u>C3</u> (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	<u>3.2</u>	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	<u>+0.2</u>	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	<u>-0.5</u>	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	<u>-1.0</u>	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6

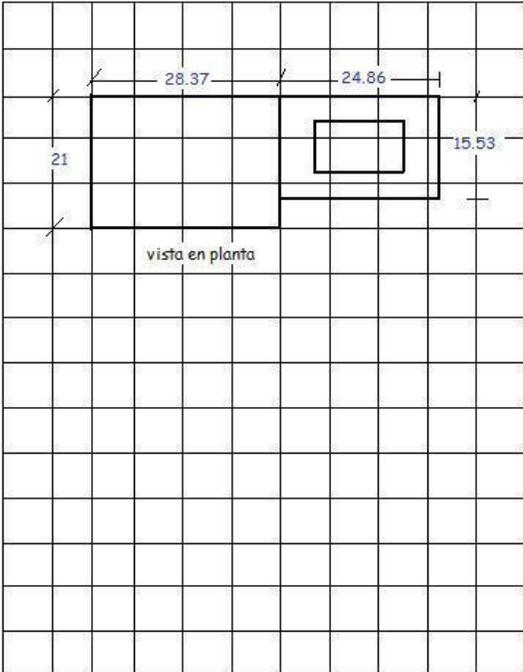
PUNTAJE FINAL S	1.9
COMENTARIOS	
No ha sufrido daños estructurales, se le han hecho remodelaciones, sin cambio estructural. Grietas en juntas frías	
Requiere Evaluación Detallada	SI <input checked="" type="radio"/> NO <input type="radio"/>

A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
 C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
 M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B10. Poder Ejecutivo

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

 <p style="text-align: center;">vista en planta</p>	<p>Dirección: Centro Cívico, Mexicali Otra Identificación: No de pisos: 3 Año construido: Inspector: Ena Gámez Fecha: 02 de abril de 2008 Área total (m²): 2,520 Nombre del edif.: Poder Judicial del Estado Uso: Edificio de gobierno</p> 
--	---

Escala:

OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA			
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro
Serv. Emerge.	Industrial	Escuela	101-1000 1000 +										

PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S

TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5 (PRMNR)	C1 (MRM)	C2 (MC)	C3 (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6

PUNTAJE FINAL S

2.2

COMENTARIOS

Se informó que un ingeniero estructural inspeccionó el edificio y dice que está en perfectas condiciones, actualmente se está dando mantenimiento en la parte de afuera

Requiere
Evaluación
Detallada

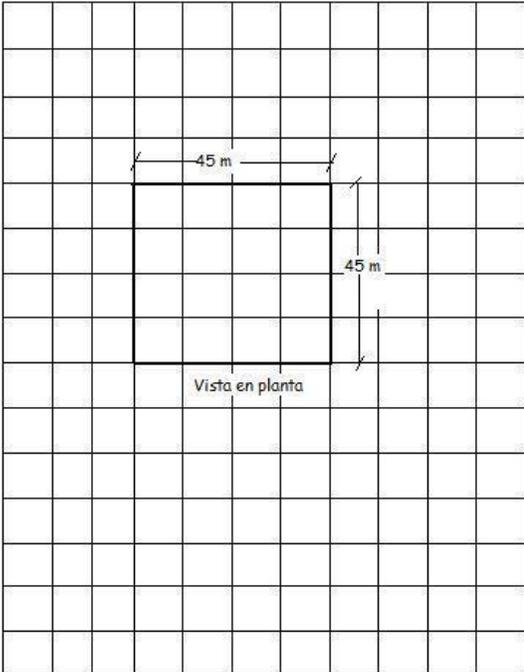
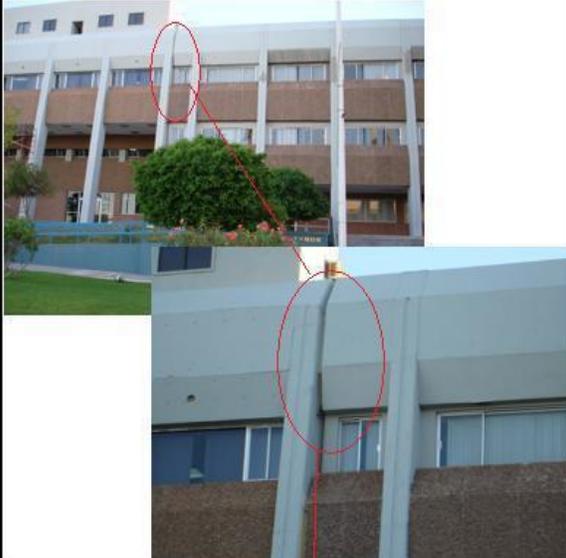
SI NO

A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
 C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
 M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B11. Poder Judicial del Estado

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

 <p style="text-align: center;">Vista en planta</p>	<p>Dirección: Centro Cívico Mexicali Otra Identificación: No de pisos: 4 Inspector: Ena Gámez Año construido: Fecha: 02 de abril de Área total (m²): 8,100 Nombre del edif: Poder Legislativo Uso: Edificio de gobierno</p> 
--	---

Escala:

OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA			
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimenea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro
Serv. Emerge.	Industrial	Escuela	101-1000 1000 +										

PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5	C1 (PRMNR)	C2 (MRM)	C3 (MC)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6

<p>PUNTAJE FINAL S</p> <p>0.4</p> <p>COMENTARIOS</p> <p>Se ha observado la irregularidad vertical del edificio en la poca separación que se tiene del edificio vecino, al momento de un sismo puede ocurrir un golpeteo y colapsar.</p>	<p>Requiere Evaluación Detallada</p> <p>SI NO</p>
---	---

- A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
- C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
- M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B12. Poder Legislativo

Foma de colección de datos. FEMA-154/ATC-21

Sismicidad MODERADA

Vista en planta

Dirección 32°36'38.2"N 115°28'41.5"W

Otra Identificación

No de pisos 2 Año construido: 1997

Inspector : Ena Gámez Fecha: 02 de abril de 2008

Area total (m²): 1,927

Nombre del edif: Dirección de Seguridad Pública

Uso: Edificio de gobierno

Escala:

OCUPACIÓN				TIPO DE SUELO						PELIGRO DE CAIDA			
Auditorios	Gobierno	Oficina	Número de pers.	A	B	C	D	E	F	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comercial	Histórico	Residencia	0-10 11-100	Roca dura	Roca normal	Suelo denso	Suelo firme	Suelo suave	Suelo malo	Chimerjea no reforzada	Parapeto	Emplaste	Otro
Serv. Emerge.	Industrial	Escuela	101-1000 1000 +										

PUNTAJE BÁSICO, MODIFICADORES, Y PUNTAJE FINAL, S															
TIPO DE EDIFICIO	M1	M2	A1 (MRM)	A2 (MA)	A3 (ML)	A4 (CR MC)	A5 PRMNR	C1 (MRM)	C2 (MC)	C3 (PRMNR)	CP1 (EL)	CP2	MR1 DF	MR2 DR	MNR
Puntaje básico	5.2	4.8	3.6	3.6	3.8	3.6	3.6	3	3.6	3.2	3.2	3.2	3.6	3.4	3.4
Mediano (4 a 7 pisos)	N/A	N/A	+0.4	+0.4	N/A	+0.4	+0.4	+0.2	+0.4	+0.2	N/A	+0.4	+0.4	+0.4	-0.4
Alto (>7 pisos)	N/A	N/A	+1.4	+1.4	N/A	+1.4	+0.8	+0.5	+0.8	+0.4	N/A	+0.6	N/A	+0.6	N/A
Irregularidad vertical	-3.5	-3.0	-2.0	-2.0	N/A	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	N/A	-1.5	-2.0	-1.5	-1.5
Irregularidad en planta	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Antes del código	-0.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.0	-0.4	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4
Después del terre. 85	+1.6	+1.6	+1.4	+1.4	N/A	+1.2	N/A	+1.2	+1.6	N/A	+1.8	N/A	2.0	+1.8	N/A
Suelo tipo C	-0.2	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.4
Suelo tipo D	-0.6	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.2	-1.2	-1.0	-1.2	-1.0	-1.0	-1.0	-1.2	-1.2	-0.8
Suelo tipo E	-1.2	-1.8	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6

PUNTAJE FINAL S											0.2				
COMENTARIOS															
El edificio presenta en su interior algunas columnas aisladas, en el are circular, como se aprecia en la vista de platan, se agregó una oficina en un segundo piso sin estar diseñada previamente, sobre una columna delgada de metal. El edificio presenta columnas redondas de concreto y cuadradas de metal															
														Requiere Evaluación Detallada	
														SI NO	

- A = Acero CP= Concreto prefabricado CR = Concreto reforzado EL = Edif. Prefab. Levantado ML = Metal Ligero
- C= Concreto MR = Mamp. Reforzada DF = Diafragma flexible MA = Marco arriostrado MRM = Marco resistente al momento
- M = Madera DR = Diafragma rígido MC = Muro de corte PRMNR = Paredes de Relleno de Mamp. no reforzada

Figura B13. Seguridad Pública

Apéndice C: Escala de intensidad sísmica de Mercalli Modificada (IMM)

Tabla C. Descripción de la escala de Mercalli Modificada (IMM) Tomada de Nava A., 1987, en Terremotos. 156-158p.

GRADO DE INTENSIDAD	ESPECIFICACIÓN
I	No es sentido. Sólo lo registran los sismógrafos.
II	Es sentido por personas que se hallan en reposo, en edificios altos o en lugares que favorecen la percepción.
III	Es sentido en el interior de las habitaciones. Los objetos colgantes se balancean. La vibración es parecida al paso de un camión ligero. Es posible estimar su duración. Puede no ser considerado como un sismo.
IV	Los objetos colgantes se balancean. Vibración, semejante al paso de camiones pesados, o se recibe una sensación como si una pelota pesada golpeará las paredes. Los carros estacionados se mecen. Las ventanas, los platos y las puertas traquetean. Los vasos tintinean. Los cacharros chocan. En el rango superior de IV las paredes y armazones de madera rechinan.
V	Es sentido fuera de las casas; puede estimarse su dirección. Las personas dormidas despiertan. Los líquidos experimentan alteraciones; algunos se derraman. Los objetos inestables y pequeños se mueven, así como las celosías y los cuadros. Los relojes de péndulo se detienen, echan a andar o cambian de velocidad.
VI	Es sentido por todos. Muchas personas se asustan y salen corriendo de sus casas. Se dificulta caminar. Las ventanas, platos y objetos de vidrio se rompen. Adornos, libros, etcétera, caen de los estantes. Los cuadros se desprenden de las paredes. El mobiliario se mueve o cae. Se agrieta el yeso débil y las construcciones tipo D. Suenan las campanas pequeñas (iglesia, escuela). Los árboles y los arbustos se sacuden (visiblemente) o se escucha la agitación de sus ramas y hojas.
VII	Es difícil permanecer de pie. Los automovilistas sienten cómo se agita el piso. Los objetos colgantes vibran. Se rompen los muebles. Daños a construcciones tipo D, incluyendo grietas. Las chimeneas débiles se parten al nivel del techo. Se produce caída de yeso, de ladrillos sueltos, de piedras, de tejas, de cornisas, de parapetos sin apoyo y de ornamentos arquitectónicos. Se abren algunas grietas en las construcciones tipo C. Se observan olas en los estanques; el agua se enturbia con lodo. Hay derrumbes y aludes en los bancos de arena o grava. Tañen las campanas grandes. Los canales de irrigación quedan dañados.

Tabla C. (continuación) Descripción de la escala de Mercalli Modificada (IMM) Tomada de Nava A., 1987, en Terremotos. 156-158p.

GRADO DE INTENSIDAD	ESPECIFICACIÓN
VIII	Se dificulta conducir un vehículo y quizás hasta se pierde el control del auto. Daños a las construcciones tipo C; colapso parcial. Algunos deterioros en las construcciones B; ninguno en las construcciones A. Caída de estuco y de algunas paredes de ladrillo. Torcedura y caída de chimeneas (casas y fábricas), monumentos, torres, tanques elevados. Las casas de armazón son movidas de sus cimientos si no están aseguradas a ellos. Se rompen las ramas de los árboles. Cambios en el flujo o la temperatura de manantiales y pozos. Grietas en terreno húmedo y en pendientes empinadas.
IX	Pánico general. Las construcciones son destruidas: las de tipo C quedan gravemente dañadas o, a veces, se caen del todo y las de tipo B quedan dañadas seriamente. Averías generales a los cimientos, y muy serias a las cisternas y presas. Las tuberías subterráneas quedan rotas. Grietas conspicuas en el terreno. En las zonas aluviales, la arena y el lodo son arrojados a las orillas, surgen las llamadas fuentes de terremoto y se abren cráteres de arena.
X	La mayor parte de las construcciones de mampostería y armazón, así como sus cimientos son destruidos. Algunas estructuras y puentes, cuidadosamente contruidos caen. Hay daños serios en presas, diques y terraplenes. Se producen grandes aludes. El agua es arrojada a la orilla de canales, ríos, lagos, etc. La arena y el lodo son desplazados horizontalmente en playas y terrenos planos. Los rieles de las vías de ferrocarril se doblan levemente.
XI	Los rieles quedan doblados considerablemente, y las tuberías subterráneas completamente fuera de servicio.
XII	La destrucción es casi total. Grandes masas de roca son desplazadas. Las líneas del nivel quedan distorsionadas. Los objetos son arrojados al aire.

Construcciones A: Trabajo, concreto y diseño buenos; reforzadas, en especial lateralmente, y amarradas usando acero, concreto, etcétera; diseñadas para resistir fuerzas laterales.

Construcciones B: Trabajo y concreto buenos; reforzadas, pero no diseñadas especialmente para resistir fuerzas laterales.

Construcciones C: Trabajo y concreto ordinarios; sin debilidades extremas, como falta de amarres en las esquinas, pero tampoco reforzadas ni diseñadas contra fuerzas horizontales.

Construcciones D: Materiales débiles como adobe; concreto pobre; baja calidad de mano de obra; débiles horizontalmente.