

## **CAPITULO 2**

### **SISMICIDAD REGIONAL**

CAPITULO 2  
SISMICIDAD REGIONAL

2.1 Antecedentes Generales

La corteza de la Tierra está dividida en grandes placas, entre las que se encuentra la Placa del Pacífico, Americana, Eurasia, Antártica, Placa de Cocos y Placa de Nazca, las que se mueven en forma rígida sin deformación interna.

Las interacciones ocurren sólo en los bordes de estas placas rígidas, en donde se concentra esencialmente la actividad sísmica.

La forma de interacción entre las placas es distinta, encontrándose al menos tres formas de interacción:

- i ) Extrusión: Es la zona en donde se produce una separación de dos placas con creación de nueva corteza (Mesodorsales). El espaciamiento entre estas dos placas es perpendicular al azimut y las velocidades de espaciamiento son simétricas.
  
- ii ) Transcurción: Es la zona en donde el desplazamiento de las dos placas se produce en el mismo plano de la corteza, sólo tienen movimiento de cizalle sin convergencia ni espaciamiento.
  
- iii ) Subducción: Es la zona en donde se produce el hundimiento de una placa debajo de otra en el proceso de convergencia. Dentro de este tipo de interacción se encuentra el de acrecentamiento que es el hundimiento de una placa delgada (fondo marino) bajo una placa gruesa (placa continental), generándose magma nuevo que se incorpora como nuevo material en la placa continental.

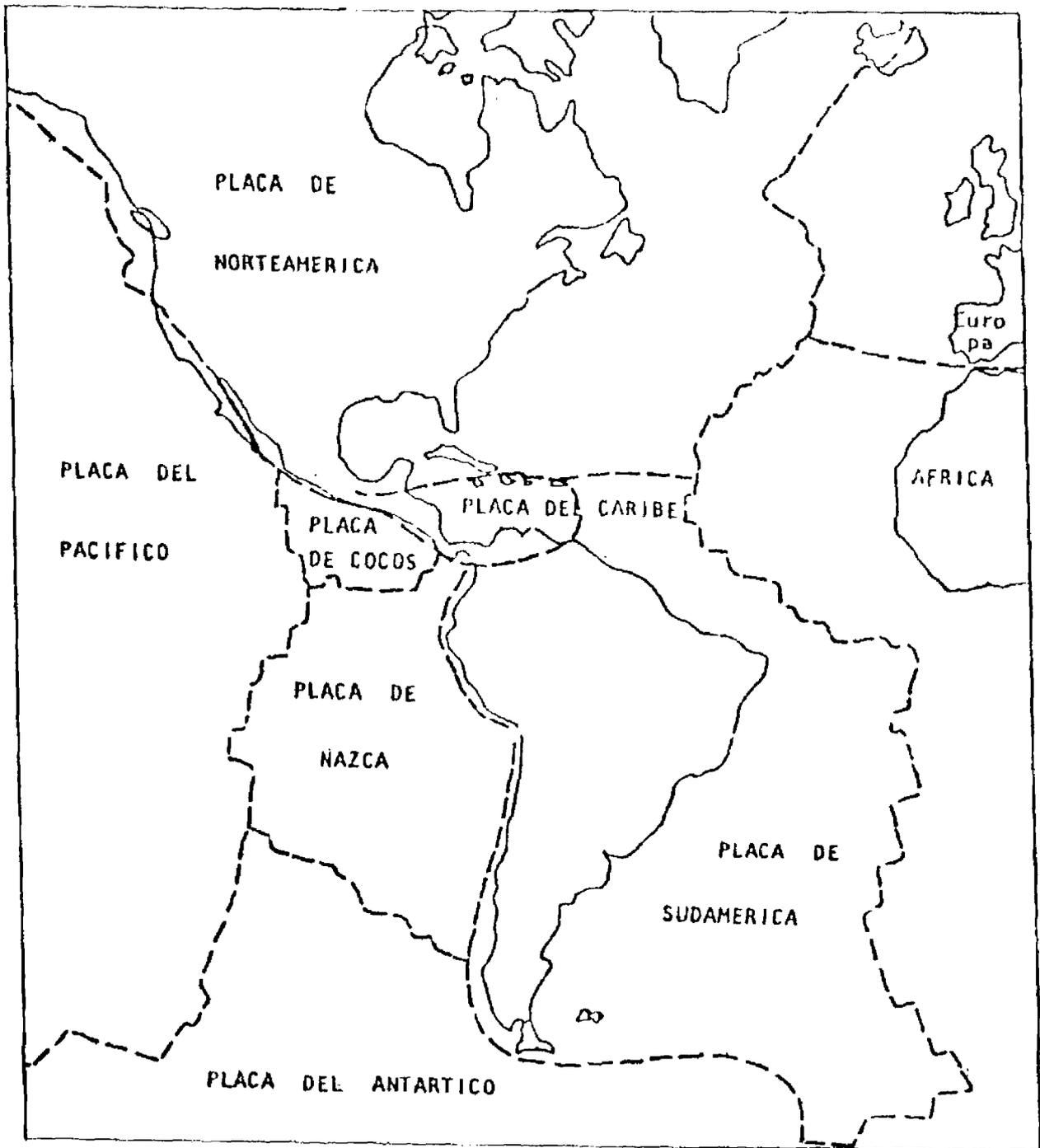
## 2.2 Sismicidad Chilena

La sismicidad de Chile se debe esencialmente a la subducción de placas corticales (Fig. 2.1). En la actualidad convergen a la placa Sudamericana, las placas oceánicas de Cocos, en el extremo norte, y la Placa de Nazca a lo largo de la mayor parte del borde continental, con una velocidad media anual de 9 cm/año [ Ref. Barrientos, 1993 ]. En cambio, en el extremo sur se produce un contacto del tipo transcurativo entre la Placa Sudamericana y la Placa Antártica.

Este tipo de zonas es característicamente activa desde el punto de vista sísmico y volcánico. A lo largo de ellas se desarrollan sistemáticamente profundas fosas oceánicas y cadenas montañosas. Estas últimas son el resultado de una prolongada evolución geológica, estrechamente ligada a las características locales del proceso de convergencia y subducción de placas desarrollado a lo largo del margen continental.

La actividad sísmica de la zona de Valparaíso y Viña del Mar se debe a la convergencia de la placa de Nazca a la placa Sudamericana. El desplazamiento de estas dos placas genera una acumulación de tensiones que se liberan dependiendo de las condiciones en el interior de la Tierra. Si la roca involucrada en el posible fallamiento reacciona por fluencia, lo que quiere decir que no es capaz de acumular tensiones, se producen sismos pequeños de bajas magnitudes, debido a que las rocas ceden a un nivel bajo de tensiones. En cambio, si la roca es capaz de acumular tensiones, estas se liberan en forma de energía en un sismo de gran magnitud.

En este tipo de mecanismo existen ciertos lugares, llamados asperezas por los sismólogos, que son más resistente a las fracturas y así necesitan mayores niveles de tensión para su fallamiento. Por otra parte, las llamadas " barreras " representan obstáculos a la propagación de la falla y se interpretan como discontinuidades geométricas en la zona de subducción producto de



MAPA TECTONICO GENERAL

DE AMERICA

(J. Monge, 1975)

Figura 2.1

un cambio de inclinación de la superficie de contacto entre placas, o como una falta de homogeneidad del material debido a la existencia de zonas de constitución diferente con mayor resistencia a la rotura.

Teniendo en cuenta esto último, se ha podido destacar que la iniciación de la ruptura de un sismo de grandes proporciones en la zona de subducción se produce en una aspereza, propagándose la falla hasta encontrar una barrera. También la propagación de la ruptura puede detenerse porque se ha llegado a una región donde las tensiones se han relajado previamente a raíz de un sismo ocurrido en una zona vecina, lo que explica las diferentes longitudes de ruptura de sismos que afectan una misma zona.

### 2.3 Grandes Sismos Históricos

Valparaíso y Viña del Mar han sufrido repetidamente los efectos de terremotos y maremotos.

A continuación se detallan los principales terremotos que han afectado a la zona y los daños que han causado.

#### Sismo del 17 de Mayo de 1575

A este sismo se le asigna una magnitud de 7 a 7.5 en la escala de Richter y una intensidad en Santiago de VII a VIII en la escala de Mercalli Modificada [ Lomnitz, 1971 ].

Valparaíso había sido fundado en 1544 y en esta fecha estaba constituida por un caserío, no existiendo mayor información de este terremoto en esta ciudad.

### Sismo del 13 de Mayo de 1647

Este sismo es conocido como el terremoto de Nuestro Señor de Mayo, abarcó un área entre Choapa y el Maule, y por sus características destructivas es sin duda uno de los cinco grandes terremotos que afectaron la zona de Santiago y Valparaíso. A este Terremoto se le estima una magnitud de 8.5 en la escala de Richter y una intensidad de XI en Santiago [ Carvajal, A., 1971 ], tuvo una longitud de ruptura de aproximadamente 365 km [ Comte, D., 1985 ], posteriormente Kausel y Ramírez (1988) estiman una magnitud  $M > 8.2$  y una longitud de ruptura de 400 km.

Según una descripción de Don Benjamín Vicuña Mackenna; Valparaíso era en ese entonces un mísero hacinamiento de ranchos y de graneros. La información que se tiene es que de las tres bodegas que existían en el Almendral, una fue completamente derribada y las otras perdieron sus techumbres. Además, la única casa que parecía existir en esos años tuvo que ser reedificada debido a los daños que sufrió [ Ramírez, D. 1988 ].

### Sismo del 8 de Julio de 1730

En la madrugada de ese día ocurrió un terremoto cuya magnitud es probablemente la mayor registrada en la zona. Lomnitz (1971) le asigna una magnitud de 8.75 y una longitud de ruptura de 350 a 450 Km, en cambio Kausel y Ramírez (1992) le asignan una magnitud mayor o igual a 8.5 y una longitud de ruptura de 450 Km.

En Valparaíso la destrucción fue total, incluso las construcciones ubicadas en las laderas de los cerros y en las partes altas no logran resistir la fuerza del sismo. En ese entonces Valparaíso contaba con una centena de casas, principalmente de maderas, y cuatro iglesias.

El barrio El Almendral fue además arrasado por el mar que llegó hasta los cimientos del Templo de la Merced que se encontraba

a la altura de la calle de la Victoria, actual Avenida Pedro Montt [ Carvajal, A. 1989 ].

### Sismo del 19 de Noviembre de 1822

En noviembre de 1822 Valparaíso y Viña del Mar son nuevamente sacudidos por un terremoto de proporciones acompañado por un maremoto moderado que no produjo daños en Valparaíso. Lomnitz (1971) le asigna una magnitud de 8.5 con una longitud de ruptura de 200 a 250 km. y una intensidad de VII a VIII (en Santiago) en la escala de Mercalli Modificada, mientras que Ramírez y Kausel (1988) le estiman una magnitud de 8 a 8.2 en la escala de Richter y una longitud de ruptura de 220 km.

En Valparaíso derrumbó alrededor de 700 casas y todo tipo de construcciones que aseguraban algún grado de resistencia. Las iglesias en general perdieron sus torres y las casas ubicadas en los cerros resistieron mejor la acción del sismo que las ubicadas en la parte baja de la ciudad [ Ramirez, D. 1988 ].

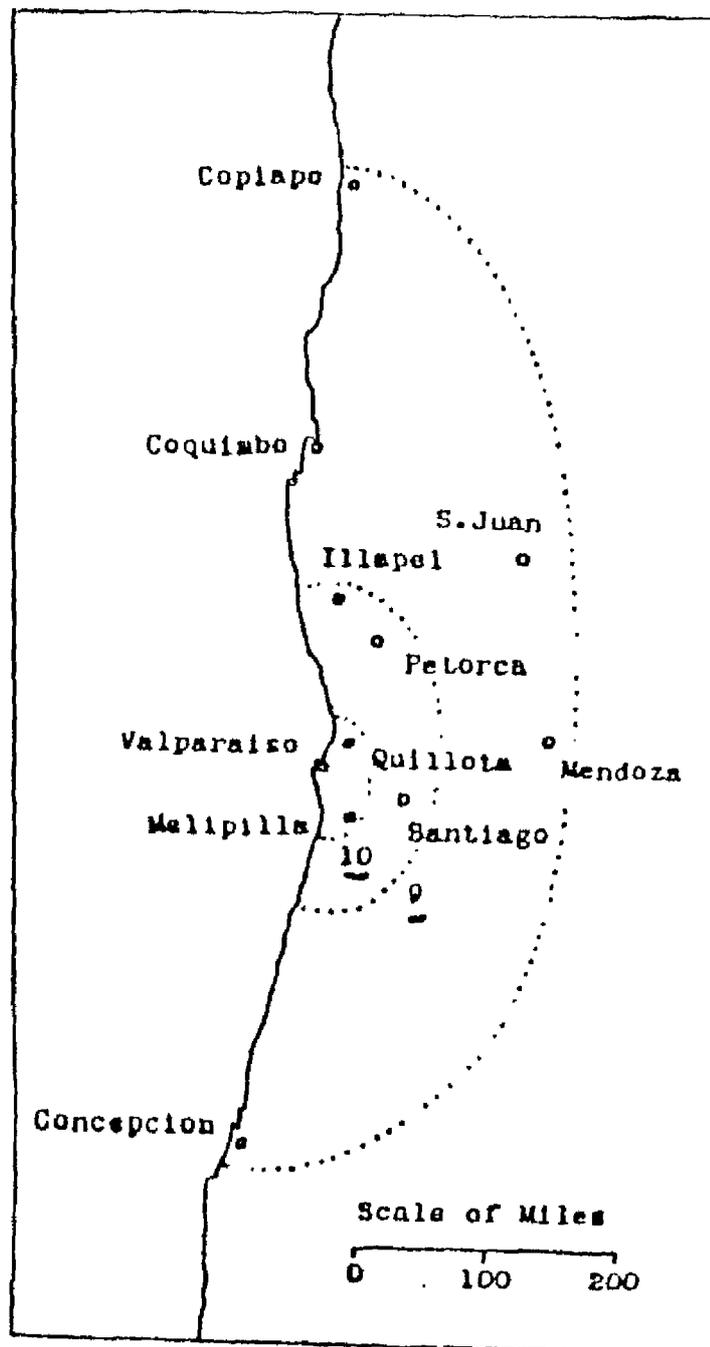
En ese entonces todas las casa estaban construidas de adobe o ladrillos secados al sol, cimentados con arcilla.

Las víctimas que se cuentan son 66 adultos, 12 niños y 110 heridos [ Carvajal, A. 1989 ].

En este sismo se observa un levantamiento de la costa llegando a ser de 3 pies en Valparaíso y 4 pies en Quintero.

La figura 2.2 muestra un dibujo con 3 isosistas de algunos escasos registros de la época. La línea interior corresponde a una isosista de intensidad 10. En su interior quedan lugares tales como Quillota, Casablanca y Melipilla, las cuales fueron convertidas en montones de ruinas. La isosista 9 incluye lugares tales como Illapel, Petorca, Aconcagua y Santiago en los cuales muchas casas fueron dañadas seriamente, sin embargo la ruina no fue completa.

La otra línea limita el área perturbada tan lejos como se conoce. Ella se extiende desde Copiapó por el Norte, San Juan y Mendoza por el Este, Concepción por el Sur y se dice que hasta la isla Juan Fernández por el Oeste [ Ramirez, D. 1988 ].



LINEA ISOSISTA DEL TERREMOTO DE VALPARAISO, 1822

(D. Ramirez, 1988)

Figura 2.2

## Sismo del 16 de Agosto de 1906

En este sismo se registraron sollevamientos de la costa de 40 a 80 cm en Pichilemu - Llico por el sur y Quintero - Zapallar - Los Vilos por el norte por lo que probablemente la ruptura abarcó desde Los Vilos hasta Llico, con una longitud de ruptura de 330 km. La magnitud registrada instrumentalmente alcanzó 8.4 en la escala de Richter [ Gutenberg y Richter, 1950 ], pero una posterior revisión de Comte (1985) la situó en 8.2. El sismo alcanza en Valparaíso una intensidad de X en la escala de Mercalli Modificada [ Kausel, E. 1985 ].

La mayor cantidad de víctimas y viviendas destruidas se concentró precisamente en Valparaíso, alcanzando a 3764 víctimas, de un total de 3882, y daños por 300.000.000 de peso, de un total para el país de 327.325.000 pesos [ Rodríguez, 1906 ].

Según Montessus de Ballore (1915) los daños en la ciudad se debieron principalmente a la mala calidad de los materiales empleados en la construcción asísmica de los diferentes tipos de edificaciones, lo que se complementó con el efecto del suelo de fundación donde se encontraba emplazada gran parte de la ciudad de Valparaíso, ya que estaba formado por rellenos artificiales y depósitos aluviales, lo que se tradujo que el barrio El Almendral resultara completamente destruido.

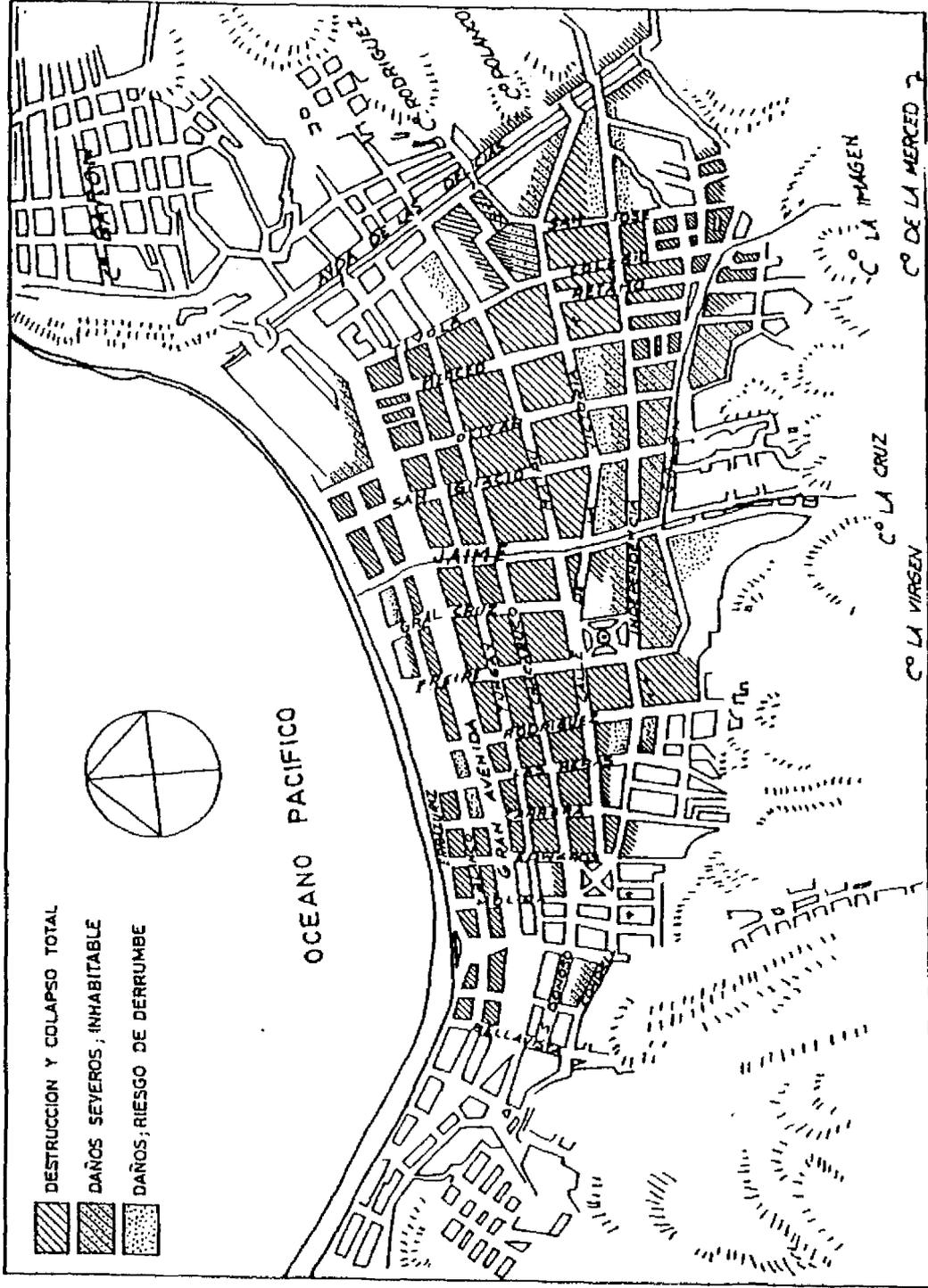
Además de la destrucción propia de la ciudad por causas directas del sismo, se añadieron los daños provocados por el incendio que afectó a la ciudad. Este duró cuatro días en extinguirse, ya que la red de agua de la ciudad se encontraba destruida por el sismo.

De acuerdo a estudios de los relatos de la época [ Carvajal, A. 1989 ], se pueden observar daños de distintas características, destacándose los siguientes:

- Vaciamiento de muros de fachada.
- Derrumbe de edificios, en su mayoría a partir del segundo y tercer piso.
- Edificios grandes con fallas diagonales en machones del primer piso.
- Derrumbe total de construcciones, en especial en interiores.
- Fallas en encuentros de muros.
- Caída de techos de madera.

En la figura 2.3 se puede apreciar que zonas fueron las más afectadas con este sismo y en la figura 2.4 se puede ver una microzonificación de la zona del Almendral con un margen de error del orden de  $\pm 1/4$  a  $\pm 1/2$  grado.

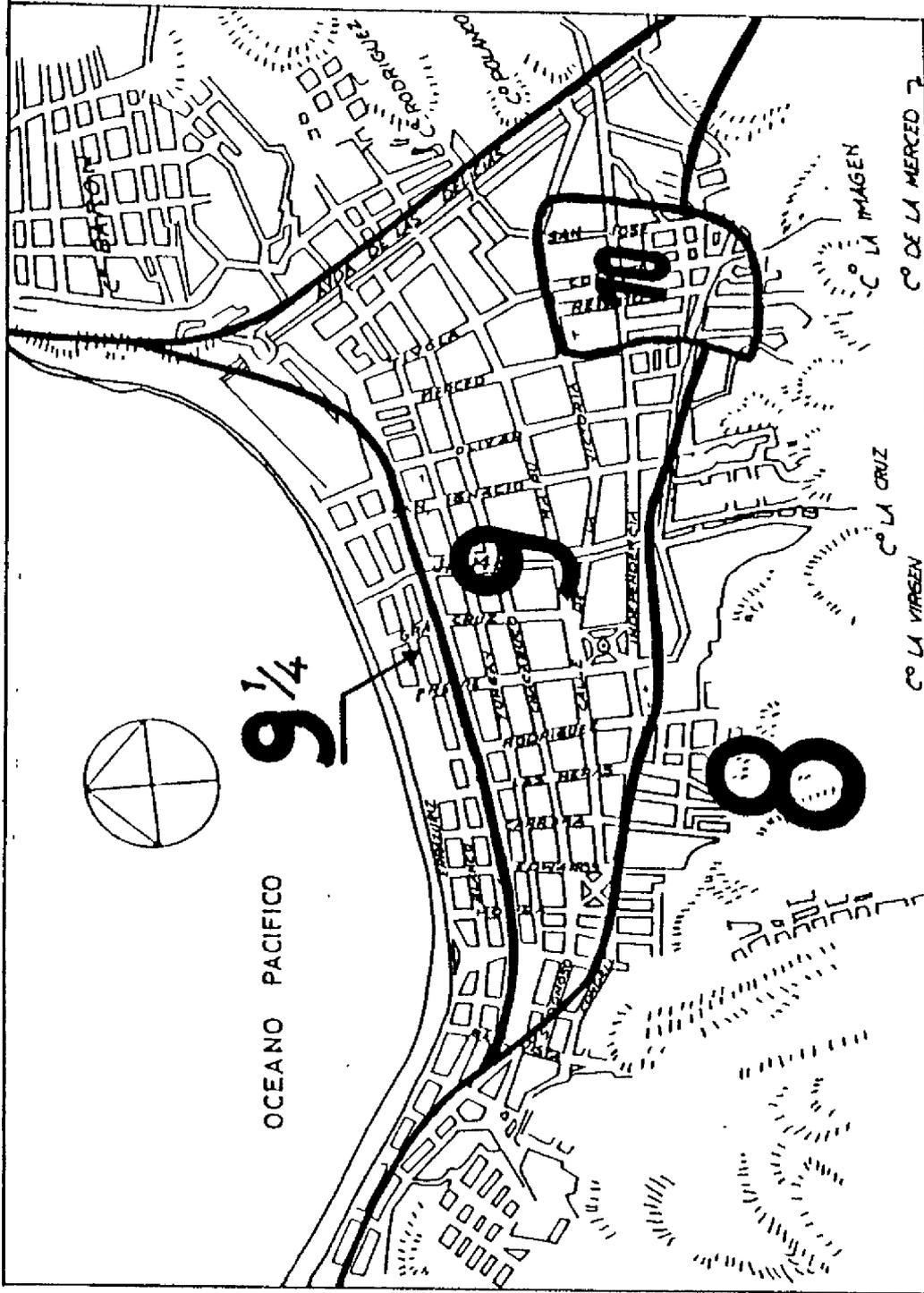
Viña del Mar estaba formada por la Población Vergara, Miramar y Chorrillos. La primera, se encontraba edificada sobre el lecho del estero y por esto su ruina fue total derrumbándose la mayoría de sus construcciones. Las construcciones de cal y ladrillo se derrumbaron sin excepción alguna. Las de madera, aún en la Población Vergara, se mantuvieron en pie. Las pérdidas de vida ascendieron a 117 víctimas.



MAPA DE DAÑOS SEGUN RELATOS DEL TERREMOTO DE 1906

(A. Carvajal, 1989)

Figura 2.3



INTENSIDADES MM PARA CONSTRUCCIONES DE ALBARILERIA  
 BARRIO EL ALMENDRAL. TERREMOTO DE 1906

(A. Carvajal, 1989)

Figura 2.4

### Sismo del 28 de Marzo de 1965

El epicentro de este sismo se ubicó entre las ciudades de Cabildo y La Ligua alcanzando una magnitud de 7.1 en la escala de Richter. Entre las ciudades más afectadas se encontraban Valparaíso y Viña del Mar, donde la intensidad del sismo en la escala de Mercalli Modificada alcanzó grados VII y VIII respectivamente [Kausel, 1965].

Los daños más comunes fueron el agrietamiento de los estanques de hormigón armado situados en las partes superiores de los edificios, daños en las juntas de mortero en las estructuras de albañilería y daños en las juntas de hormigonado, entre otros.

### Sismo del 8 de Julio de 1971

Este sismo registró una magnitud de 7.5 en la escala de Richter, con una longitud de ruptura de 60 km aproximadamente y una intensidad en Valparaíso y Viña del Mar grado VIII en la escala de Mercalli Modificada. El epicentro se ubicó en el mar a pocos kilómetros de Papudo, a una profundidad de 60 km.

Los edificios modernos de Valparaíso y Viña del Mar no tuvieron daños de consideración, siendo el daño de la estructura soportante de los estanques de agua elevados el más notorio. También se presentaron fallas en los edificios de estructuración irregular, en que la transferencia de carga no seguía un plan sencillo y continuo.

### Sismo del 3 de Marzo de 1985

El epicentro de este sismo se ubicó al frente de Algarrobo a 40 Km de la costa y a 15 Km de profundidad, su magnitud fue de 7.8 en la escala de Richter y tuvo una intensidad entre VII y VIII en Valparaíso y entre VI y VIII en Viña del Mar según la escala de intensidades MSK. El movimiento tuvo una duración de 2 minutos, y

se hizo sentir entre Copiapó y Temuco [ Flores R., 1993 ].

En Valparaíso se registraron severos daños en las instalaciones portuarias y las viviendas que resultaron más dañadas fueron aquellas construidas de adobe y albañilería sin reforzar, ubicadas en los barrios antiguos de la ciudad. En las viviendas de albañilería armada y confinada, los daños fueron menores en la medida que se cumplían las disposiciones y limitaciones de diseño de las normas de diseño y cálculo de este tipo de edificio.

En Viña del Mar el nivel de daño varía notablemente de un punto a otro de la ciudad, con una gran concentración en los sectores de suelos blandos cercanos al lecho del estero Marga - Marga y también en algunas zonas arenosas de la costa.

Los daños claramente apreciables se encuentran en la parte baja y centro de la ciudad, en los sectores de Población Vergara, Miraflores, Chorrillos bajos y en la costa por avda. San Martín, mientras que en la parte alta de la ciudad (Recreo, Forestal, Miraflores Alto, Santa Inés, Achupallas, Gómez Carreño, etc.) el daño que se observa es de tipo superficial o de menor importancia. Esto lleva a reafirmar que el daño severo, se distribuye en forma no homogénea y además, en forma similar al ocurrido en sismos anteriores en la misma zona.

Al analizar estos sismos se pueden sacar una serie características comunes:

- La mayoría tiene su epicentro costas afuera.
- Con la excepción del sismo de 1971, las zonas de ruptura abarcaron más de 150 Km.
- Con la excepción del sismo de 1730, los maremotos o tsunamis que los acompañan, fueron relativamente pequeños.

- Los movimientos verticales permanentes a lo largo de la costa, son sistemáticamente de signo positivo (solevantamiento).

- El período de recurrencia de los sismos con magnitudes próximas o mayores a 8 en la escala de Richter es de  $82 \pm 6$  años.

#### 2.4 Riesgo de Tsunami

En la historia de Chile han ocurrido desde 1562 hasta ahora cerca de 30 tsunamis de origen cercano, provocados por terremotos cuyo epicentro está localizado generalmente en el fondo del mar. Si se considera el número de terremotos importantes en ese período, se observa que ocurre en promedio un tsunami por cada diez terremotos.

La escala de grados o magnitudes de un tsunami, según Imamura, se define en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Escala de grados de un tsunami [ Monge, J., 1963 ].

Grado del Tsunami	Altura máxima de la ola [ m ]	Descripción de los daños
0	1 - 2	No produce daños
1	2 - 5	Casas inundadas. Botes destruidos son arrastrados.
2	5 - 10	Hombres, casas y barcos son barridos.
3	10 - 20	Daños extendidos a lo largo de 400 Km. de costa.
4	30	Daños extendidos a lo largo de más de 500 Km. de costa.

En la tabla anterior, la altura máxima de la ola es la distancia vertical entre la cresta y valle, es igual al doble de la altura de la ola sobre el nivel medio del mar cuando alcanza la costa.

#### 2.4.1 Tsunamis en la Bahía de Valparaíso

De la revisión de la estadística de tsunami se desprende que los siguientes han afectado en forma significativa a Valparaíso:

Tabla 2.2 Tsunami en la Bahía de Valparaíso [ Monge, J. 1963 ]

Fecha	Origen	Grado m estimado en Valparaíso	Observaciones
08-07-1730	Norte, Copiapó	2.0	En Valparaíso fue destructivo
11-04-1819	Norte, Copiapó	1.5	
10-11-1922	Norte, Copiapó	1.5	
19-11-1822	Valparaíso	1.5	Altura de ola = 4 m.
25-03-1871	Valparaíso	1.0	
16-08-1906	Valparaíso	1.0	En Valpo. alcanzó una amplitud de 1 m.
22-05-1960	Sur, Valdivia	1.5	

Históricamente se ha visto que Valparaíso es afectado en menor proporción que el promedio de la costa chilena entre Arica y Chiloé.

Según el estudio de riesgo de tsunami realizado por Monge y Godoy ( 1975 ), se acepta para Valparaíso un grado m = 2.0 como máximo y olas de alturas medidas sobre el nivel medio del mar comprendidas entre 4 y 6 m, de una probabilidad de ocurrencia de 14% en un período de 50 años. El hecho de que la parte baja de Valparaíso se encuentra ubicada en promedio 4 m sobre el nivel medio del mar y que la pendiente entre su borde y la profundidad de 5 m es abrupta, son datos suficiente para pensar que olas de 4 m de altura serán anuladas, por lo que al sector del Puerto no se le estiman áreas de inundación.

Del análisis de los distintos terremotos y maremotos que han afectado la zona de Valparaíso, se puede concluir que:

- i) Los grandes tsunamis originados al sur de Valparaíso, vale decir en la zona sísmica comprendida entre Concepción y Valdivia, no han producido efectos apreciables en esta Bahía.
- ii) Los tsunamis que se originan en la fosa marina, frente a Copiapó, pueden ser destructivos en Valparaíso.
- iii) Los tsunamis originados frente a la costa de Valparaíso, han sido débiles en cuanto a su poder destructivo.

Causa extrañeza que para los sismos de 1822 y 1906, ambos con magnitudes del orden 8.4 en la escala de Richter se produjeran tsunamis de grado  $m = 1.5$  y  $1.0$  respectivamente, en circunstancias que se esperaban con grado  $m = 3.5$  según fórmulas empíricas [ Monge J. 1975 ].

- iv) Es interesante destacar que los grandes tsunamis originados frente a Arica e Iquique prácticamente no han afectado al sector de Valparaíso. Estos tsunami, al igual que los de origen lejano a la costa de Chile, han tenido como máximo un grado 1.5 en Valparaíso.

#### 2.4.2 Tsunamis en Viña del Mar

Considerando el estudio de propagación de un tsunami hecha por Monge J. y Godoy H. (1963) en que se considera un sismo de magnitud  $M = 8.0$ , con profundidad de foco de 30 Km. y epicentro frente a Papudo, se puede decir que la altura inicial de la ola que produce la inundación, es la diferencia de los 6 a 7 m de elevación de la ola que irrumpe a la costa y los 4 m del terreno sobre el nivel medio del mar que da el enrocado de la Avda. Perú.

Como se puede apreciar en la fig 2.5, el límite de inundación

AREA DE INUNDACION DE VIÑA DEL MAR  
 ESCALA 1:10000

**SIMBOLOGIA**

- - - Nivel de inundación calculado con  $R_0 = 6m$ .
- · - · - Nivel de inundación con margen de seguridad,  $R_0 = 7m$ .

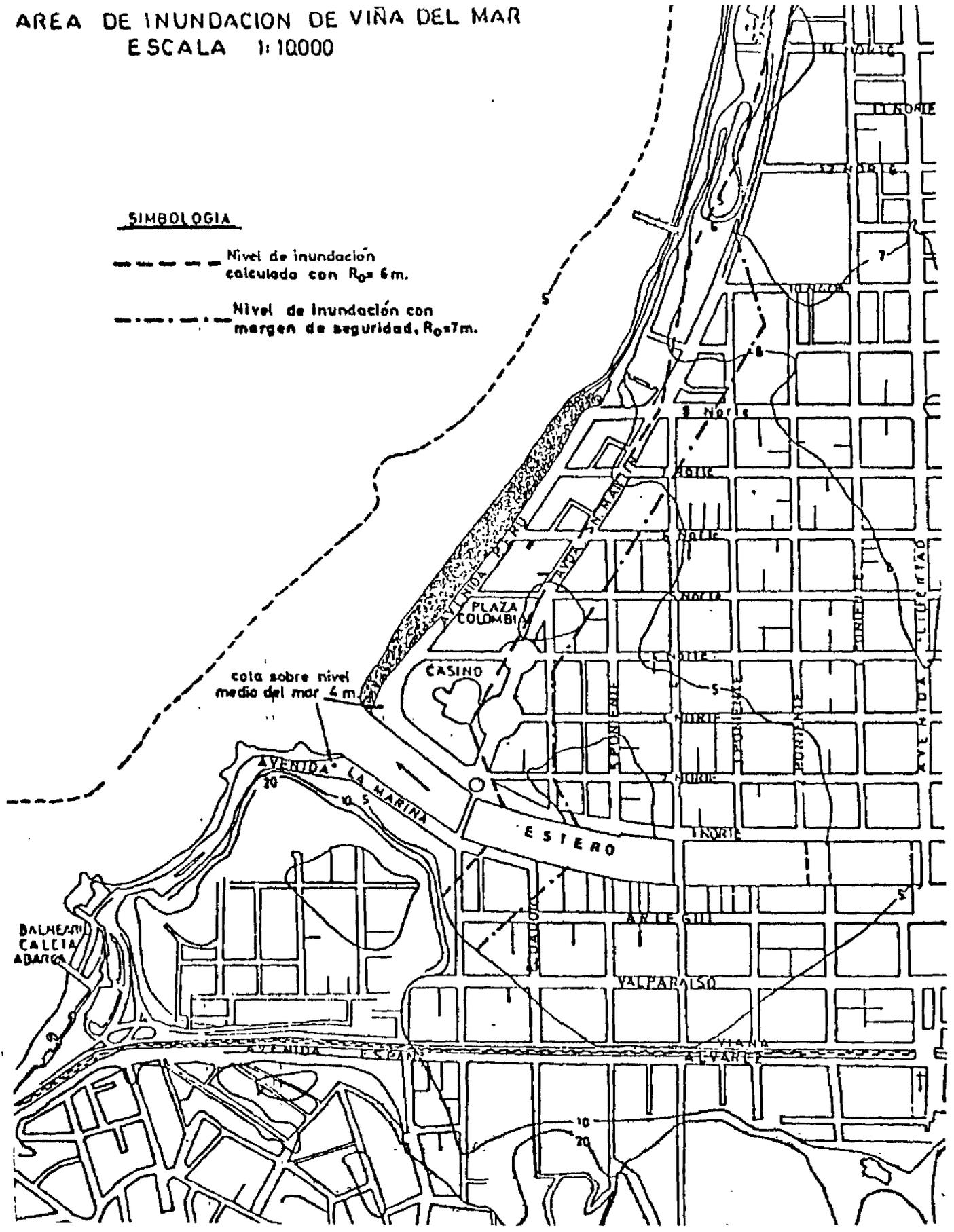


Figura 2.5 (J. Monge, 1975)

para una ola de 6 m es aproximadamente la avda. San Martín, mientras que para una ola de 7 m de elevación, la inundación llega hasta unos 200 m más al interior.

## 2.5 Microzonificación Sísmica

La microzonificación sísmica tiene como objeto la subdivisión de un área en zonas más pequeñas en las que puede esperarse una manifestación sísmica de diferente intensidad, debido al efecto amplificador o de atenuación que presentan las características locales del suelo y del subsuelo.

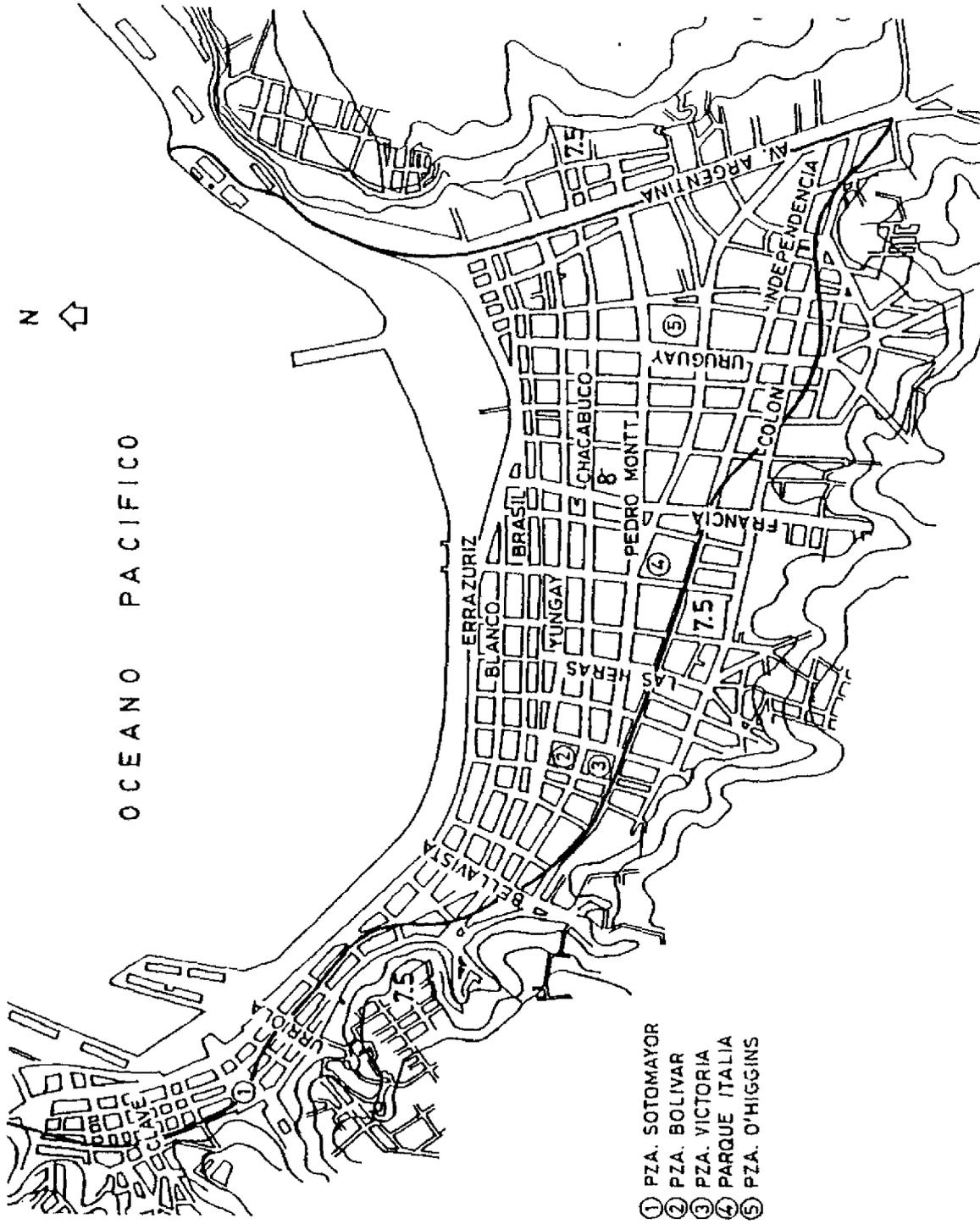
El proceso de microzonificación consiste en evaluar la influencia local que las características del suelo puedan tener en la intensidad sísmica en un sitio. Para esto se han usado varios procedimientos que van desde evaluaciones cualitativas hasta el uso de información sismométrica [ Ref. Ruiz P., 1982 ].

### 2.5.1 Microzonificación Sísmica de Valparaíso

La figura 2.6 muestra las microzonas sísmicas de Valparaíso. Estas se obtuvieron de los trabajos de Canales - Perretta (1988) y Astroza - Monge (1993).

La microzonificación se realizó con los daños observados en las estructuras las que fueron separadas de acuerdo al tipo de construcción así como la distribución espacial, geológica, mecánica de suelos, niveles de napa y otros, para ello se utilizó la escala de intensidades MSK.

La mayor parte del sector plano corresponde a la zona en que la intensidad del sismo del 3 de marzo de 1985, redondeada a medio grado, fue 8 en la escala de intensidades MSK. En el resto del sector plano, así como en los sectores en cerros, la intensidad fue 7.5.



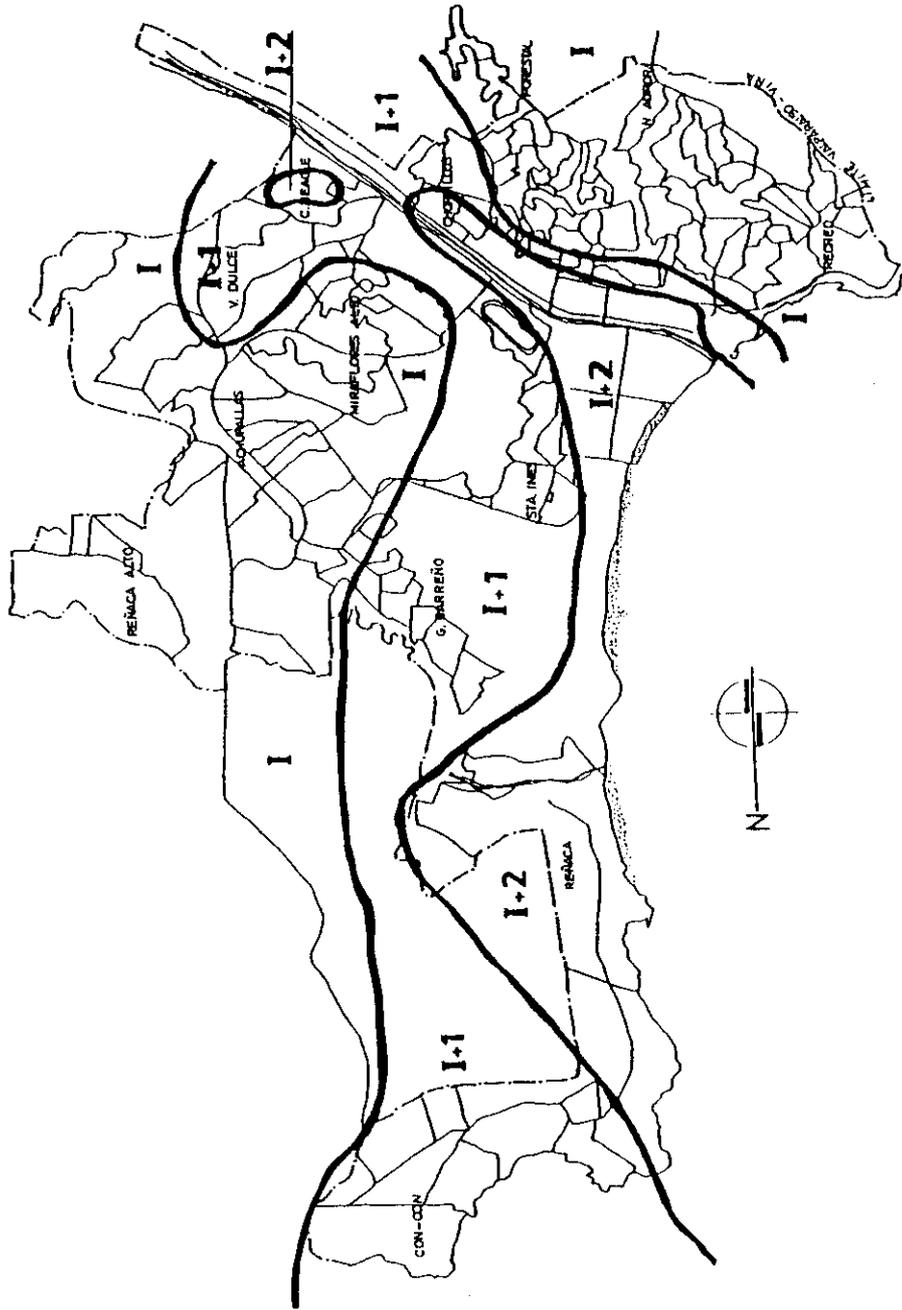
MICROZONAS SISMICAS DE VALPARAISO, GRADOS DE INTENSIDAD MSK EN EL SISMO DEL 3 DE MARZO DE 1985 (ASTROZA Y MONGE, 1992)

### 2.5.2 Microzonificación Sísmica de Viña del Mar

La figura 2.7 muestra las microzonas sísmicas de Viña del Mar en términos de tres sectores [ Ref. Aguirre C. y Perez L., 1988 ].

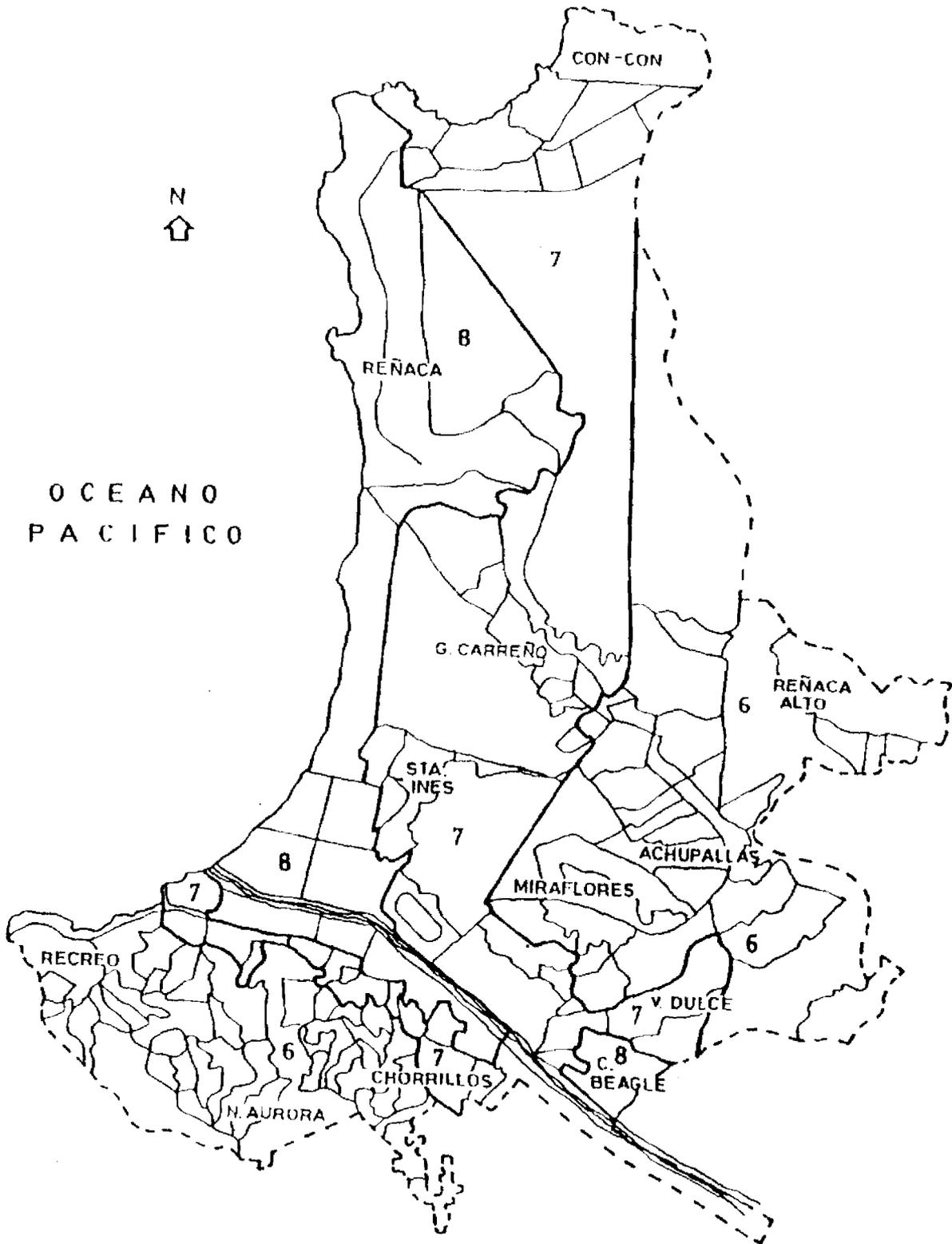
En general las intensidades máximas se ubican en las zonas en que predomina el material sedimentario. Al observar la figura 2.7 se ve que la zona de I+2 la constituye el sector costero de la ciudad, incluyendo Reñaca, y el sector del Canal Beagle, en la parte alta de la ciudad. El área I+1 incluye los sectores bajos de Recreo, Forestal, Chorrillos y Miraflores, Santa Inés y el sector de Con-Con. El resto del área urbana completa la zonificación con el área de intensidad I, sectores de menor intensidad, que incluye Reñaca Alto, Miraflores Alto y Achupallas.

En la figura 2.8 se entrega la microzonificación sísmica obtenida con los datos proporcionados por el sismo de 1985 [ Ref. Aguirre C. y Perez L., 1988 ].



(Perez y Aguirre, 1988)

Figura 2.7



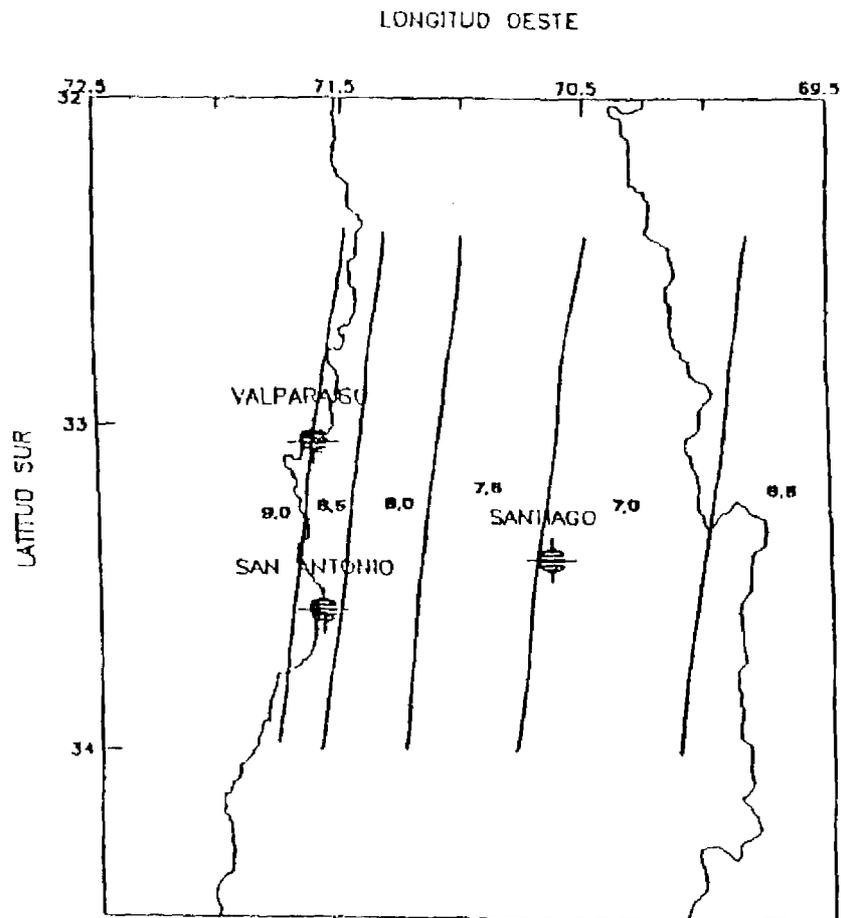
MICROZONAS SISMICAS DE LA COMUNA DE VIÑA DEL MAR  
 GRADOS DE INTENSIDAD MSK EN EL SISMO DEL 3 DE  
 MARZO DE 1985 ( PEREZ Y AGUIRRE, 1988 )

Figura 2.8

## 2.6 Intensidad Máxima Probable

Para la zona de Valparaíso y Viña del Mar, se espera un sismo máximo de magnitud  $M = 8.5$  en la escala de Richter, con eje hipocentral a una distancia promedio de la costa de 60 Km y 20 Km de profundidad [ Astroza M., Kausel E., Monge J., 1993 ]. En la figura 2.9 se puede apreciar las intensidades esperadas para este sismo.

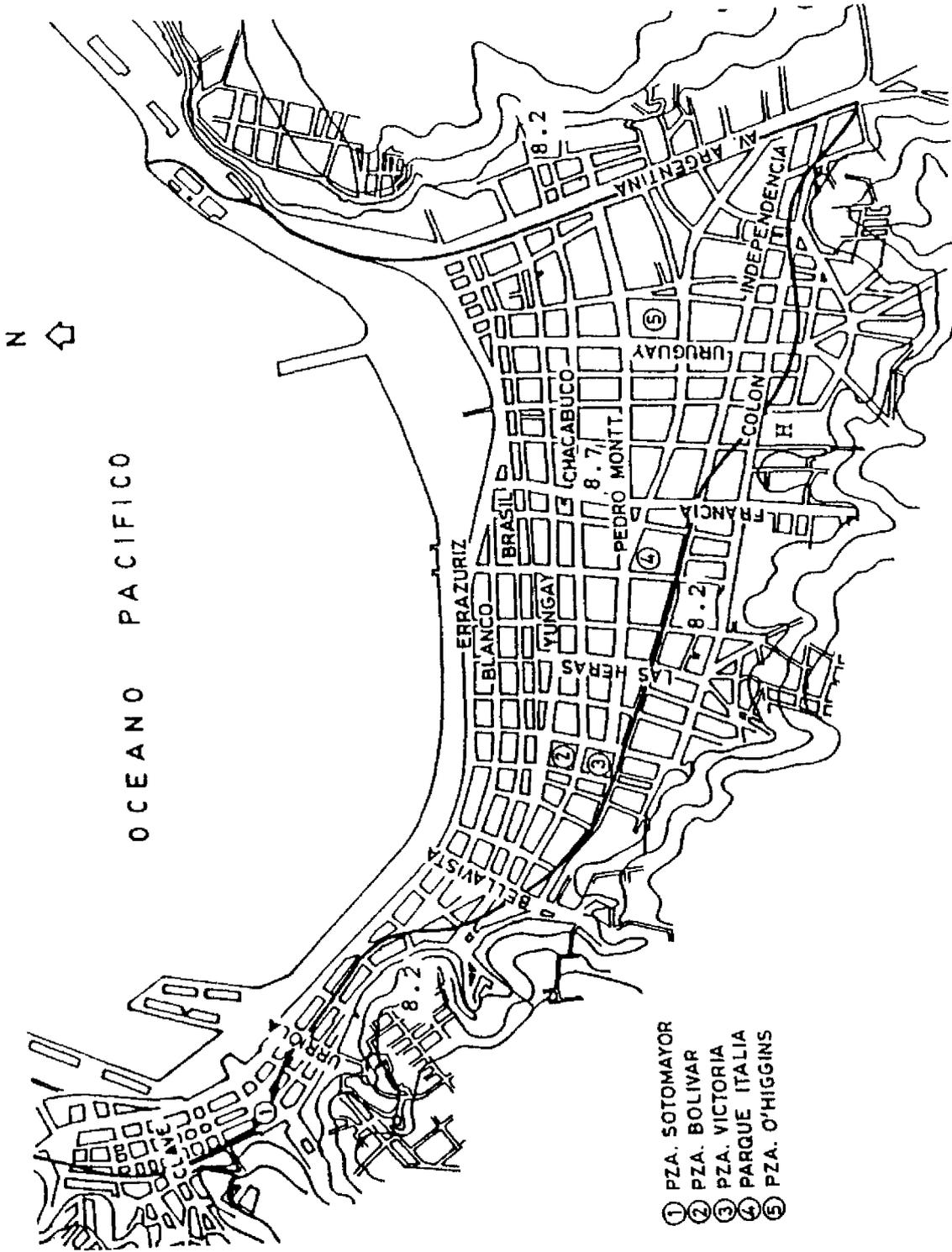
Utilizando la fórmula de Barrientos (1980) para calcular la Intensidad de Mercalli Modificada a partir de la magnitud de Richter y de la distancia hipocentral [ Astroza M., Kausel E., Monje J., 1993 ], se ha confeccionado un mapa con las intensidades máximas esperadas para el sismo de magnitud  $M = 8.5$  en las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar, que se muestran en la figura 2.10 y 2.11 respectivamente. De estos mapas se puede ver que para el hospital Carlos Van Buren de Valparaíso se espera una intensidad entre 8 y 8.5 en la escala de Mercalli Modificada, mientras que para el hospital Dr. Gustavo Fricke de Viña del Mar se espera una intensidad entre 7.5 y 8.



SISMO MÁXIMO  $M = 8,5$   
 INTENSIDADES ESPERADAS

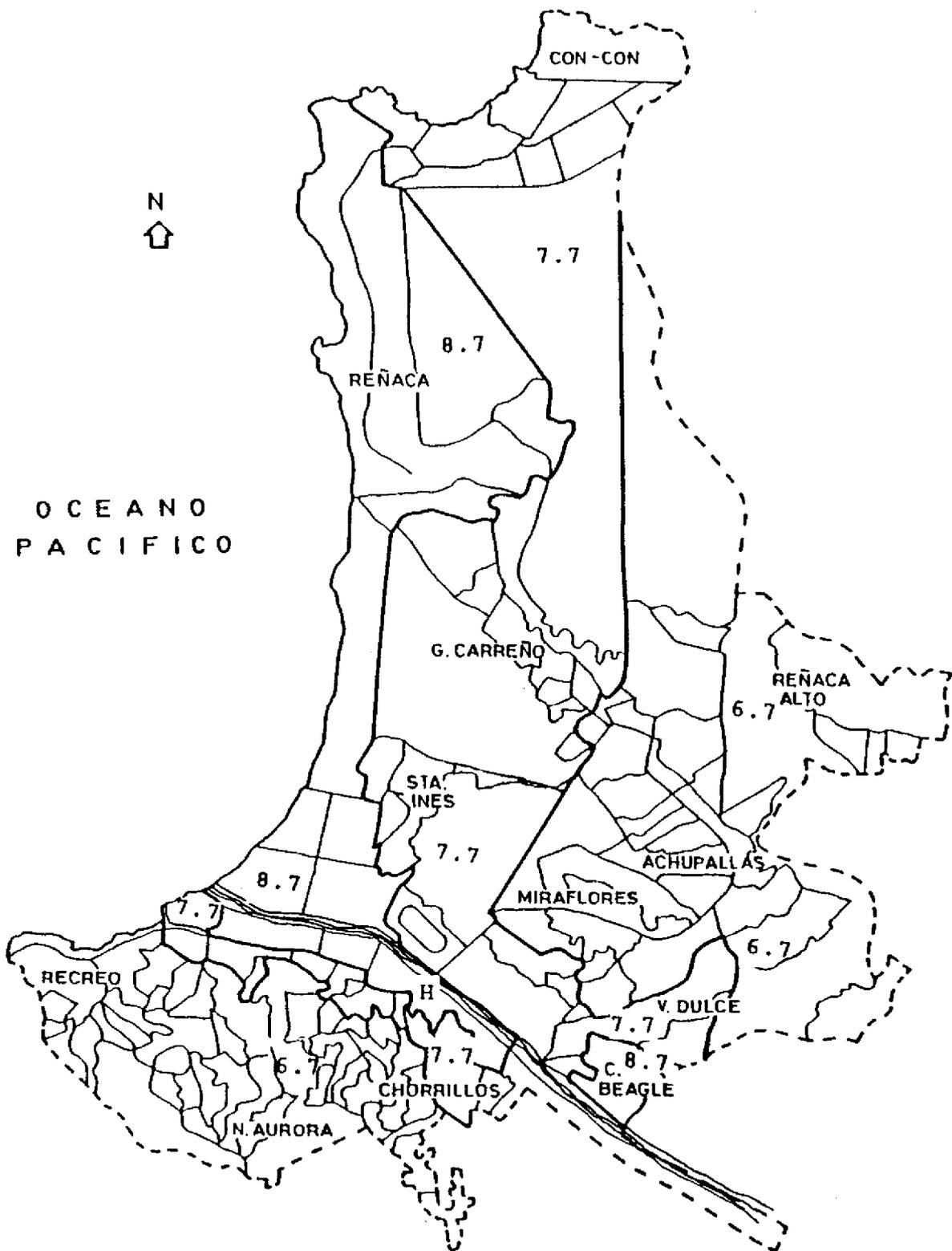
(Astroza y Monge, 1992)

Figura 2.9



MICROZONAS SISMICAS DE VALPARAISO  
INTENSIDAD DE MERCALLI MODIFICADA PARA EL SISMO MAXIMO M = 8.5

Figura 2.10



MICROZONAS SISMICAS DE LA COMUNA DE VINA DEL MAR  
 INTENSIDAD DE MERCALLI MODIFICADA PARA EL SISMO MAXIMO M = 8.5

Figura 2.11