

CAPITULO 2
SISMICIDAD REGIONAL

CAPITULO 2

SISMICIDAD REGIONAL

2.1 Antecedentes Generales

La Tierra está formada por el Núcleo interno de composición sólida, el núcleo externo que por sus características se clasifica como líquido, el Manto y la Corteza. Los primeros 70-100 Km. de espesor, es decir, la corteza y parte del manto constituyen la Litósfera. En esta última capa se ubican los distintos continentes y océanos.

La Litósfera está dividida en grandes placas entre las que se pueden mencionar la Placa del Pacífico, Placa Sudamericana, Placa de Nazca, Placa Eurasia, etc. Las placas tienen movimiento debido a la formación, en las llamadas Mesodorsales Oceánicas, de nuevo material que pasa a formar parte de estas y que ocasiona el empuje de la placa.

Debido al movimiento de las placas se producen distintas formas de interacción en los bordes comunes de ellas; esta interacción produce acumulación de grandes cantidades de energía y su liberación se manifiesta principalmente como actividad sísmica.

Las distintas formas de interacción son:

- i) Divergencia y Extrusión: Esta interacción ocurre en las Mesodorsales Oceánicas; es decir, en la zona en que se crea nueva materia de la corteza (debido al ascenso y enfriamiento de material del Magma), produciendo un movimiento de separación de las placas adyacentes.

- ii) Transcurción: Esta interacción ocurre en la zona en que el movimiento relativo entre dos placas es paralelo al borde de contacto y es del tipo de cizalle. Como ejemplo de este tipo de interacción puede destacarse el caso de la falla de San Andrés en California, EEUU.

- iii) Convergencia y Subducción: Esta interacción ocurre en la zona donde se produce el hundimiento de una placa bajo otra debido a un proceso de convergencia entre estas. La zona en que ambas placas están en contacto es la que principalmente concentra la generación de la actividad sísmica.

En el lenguaje sismológico se habla de la magnitud e intensidad de un terremoto. La magnitud de un terremoto es una medida de la cantidad de energía liberada por el evento. La escala más utilizada para medir la magnitud es la de Richter.

La intensidad, es una medida de los efectos que ocasiona el evento; su valor es dependiente de condiciones locales como son el tipo de construcción (la práctica constructiva) o el tipo de suelo. La escala de intensidad más utilizada es la de Mercalli Modificada de doce grados. Para un sismo dado, la intensidad disminuye con la distancia al epicentro.

Existen correlaciones empíricas de la intensidad en función de la magnitud y distancia focal. El logaritmo de la aceleración es proporcional a la intensidad máxima.

2.2 Sismicidad Chilena

La actividad sísmica chilena se origina principalmente por la subducción bajo la placa Sudamericana de la placa de Nazca en la mayor parte de Chile. La velocidad media anual de convergencia es de 9 cm/año [Barrientos, 1993]. En el extremo sur se produce por un contacto de tipo transcurativo entre la Placa Sudamericana y la Placa Antártica.

Estas zonas de subducción son activas sísmica y volcánicamente, como lo es el resto del llamado Cinturón de Fuego del Pacífico. A lo largo de la zona de subducción se desarrolla una profunda fosa oceánica y cadenas montañosas, estas últimas pueden presentar actividad volcánica dependiendo de características locales del proceso de subducción.

La actividad sísmica de Chile central se debe principalmente a la convergencia de la Placa de Nazca y la Sudamericana. El desplazamiento de estas dos placas genera una gran acumulación de energía, cuya liberación depende de las distintas condiciones presentes en la zona de interacción. Si la zona involucrada en la posible falla no es capaz de acumular tensiones, se producen sismos de bajas magnitudes y más frecuentes. En cambio, si la zona es capaz de resistir mayores niveles de tensiones, el acoplamiento será mayor y al momento de producirse el fallamiento la energía acumulada será grande, lo que origina un sismo de gran magnitud.

En el mecanismo de subducción existen ciertos lugares que son más resistentes a la fractura, por lo que requieren de un mayor nivel de tensiones y energía acumulada; estas son las llamadas asperezas sísmicas. Existen además, las llamadas barreras sísmicas que impiden la propagación de la falla. Estas barreras se ubican en los lugares en que existe discontinuidad geométrica de la zona de subducción o falta de homogeneidad del material debido a la existencia de zonas de constitución diferente con mayor resistencia a la rotura.

Teniendo en cuenta estos últimos aspectos, se ha podido destacar que el inicio de un evento sísmico de gran magnitud se produce probablemente en una zona de aspereza y se propaga hasta encontrar una barrera sísmica. La propagación de la ruptura puede detenerse debido también a una relajación previa del nivel de tensiones en una zona vecina, debido a la ocurrencia de un sismo anterior. Esto último explica las diferentes longitudes de las zonas de ruptura de los distintos sismos que afectan una región.

2.3 Grandes Sismos Históricos

La zona de Santiago así como el litoral central han sufrido históricamente la ocurrencia de sismos de pequeña, mediana y gran magnitud. La información que se tiene de los eventos destructores se ha obtenido de referencias históricas ya que sólo en los últimos años se han realizado mediciones que permiten registrar los sismos de menor magnitud. Debido a esto último es como se explica la inexistencia de antecedentes antes de la llegada de los españoles a América.

A continuación se detallan los eventos destructores que han ocurrido en la zona donde se ubican los hospitales en estudio.

Sismo del 17 de Marzo de 1575

Este sismo fue descrito como un semiterremoto por Montessus de Ballore (primer sismólogo que trabajó en Chile). En Santiago no cayeron casas, pero algunas de ellas se "abrieron" con grietas y rajaduras.

Puede deducirse que el epicentro estuvo a más de 100 Km. de Santiago, probablemente en la zona de La Ligua. La magnitud de Richter del sismo se puede estimar en 7 a 7 1/2. Prácticamente no habían en la zona poblaciones españolas, con excepción de Santiago, por lo que no se tiene mayor información de daños [Lomnitz, 1971].

Sismo del 13 de Mayo de 1647

Este sismo es conocido como el terremoto de nuestro Señor de Mayo, la zona afectada abarcó desde Choapa hasta el Maule; por sus características destructivas se considera como uno de los cinco grandes terremotos que han afectado a Santiago y al litoral central. A este sismo se le asigna una magnitud de Richter de 8.5 y una intensidad de XI en Santiago [Lomnitz, 1971].

El evento tuvo una longitud de ruptura de aproximadamente 365 Km [Comte D., 1985]. Montessus de Ballore estima que Quillota fue la región del epicentro.

Datos poblacionales de la época establecen que Santiago tenía alrededor de seis mil personas y unas 300 casas; el número de víctimas se ha estimado en "unos mil" [Lomnitz, 1971]. La mayoría de los edificios (algunos con casi 100 años) se cayeron, no quedando casi ninguno en buenas condiciones. Grandes peñascos rodaron del cerro Santa Lucía, dejando grandes daños a su paso. En la catedral, construída en parte con piedra de cantería, se derrumbaron dos de las tres naves; situaciones similares se tuvieron en todas las parroquias, monasterios y conventos de la ciudad. Quedaron reducidas a escombros la cárcel, el edificio de la Real Audiencia y muchos otros servicios públicos además de los molinos, los hornos y las tiendas (Catástrofes en Chile 1541-1992).

Sismo del 8 de Julio de 1730

En la madrugada del 8 de Julio de 1730 ocurrió un fuerte terremoto que conmovió a la población entre La Serena y Valdivia. Su epicentro se ubicó a corta distancia de la costa en la latitud de Valparaíso. Según Montessus de Ballore, fue el más grande terremoto chileno; Lomnitz (1971) le asigna una magnitud de Richter de $8 \frac{3}{4}$ y una longitud de ruptura de 350 a 450 Km. Kausel y Ramírez (1992) le asignan una magnitud de Richter de 8.5 o mayor y

una longitud de ruptura de 450 Km. Este terremoto fue acompañado de un fuerte tsunami que azotó la parte baja de Valparaíso y destruyó la ciudad de Concepción.

Según crónicas de la época se dice que el terremoto comenzó con un primer movimiento telúrico alrededor de la una de la madrugada; fue seguido de numerosos temblores hasta que aproximadamente las cuatro y media de la madrugada sobrevino un terremoto "tan espantoso que no daba lugar el movimiento de la tierra a mantenerse en pie". Siguió temblando con menor intensidad hasta que, entre las doce y una del día 9, un tercer movimiento casi tan fuerte como el segundo completó la devastación ocurrida.

En Santiago, el primer movimiento no alcanzó a derribar edificaciones, pero alertó a la población a pasar la noche a la intemperie; como consecuencia de esto en Santiago sólo murieron dos personas. El segundo movimiento sí causó graves estragos, la Catedral se quedó sin torres, sin el altar mayor y sin los arcos y las murallas quedaron tan deterioradas que hubo que derribarlas. Se produjo el derrumbe del templo de la Merced. Las iglesias de San Agustín, San Francisco y Santo Domingo, que eran de albañilería construída con cal y piedra, sufrieron graves daños quedando muy poca cosa. Los edificios de la cárcel, la Real Audiencia, el Cabildo y la casa del gobernador sufrieron bastantes daños. Más de la mitad de las casas particulares resistieron, el resto cayó o tuvo que ser demolido (Urrutia, R., Lanza, C., 1992).

Sismo del 19 de Noviembre de 1822

Segundo terremoto de Valparaíso. A este sismo se le asigna una magnitud de Richter de 8.5 con una longitud de ruptura de 200 a 250 Km. Según la descripción detallada de los daños en al ciudad de Santiago, se asigna una intensidad de VII a VIII en la escala de Mercalli Modificada (Lomnitz, C.,1971). Se generó un tsunami moderado, sin conocerse noticias de daños causados por este. Se

produjo un levantamiento en la costa, alcanzándose 3 pies en Valparaíso y 4 en Quintero.

En Santiago no hubo que lamentar pérdidas humanas, sólo algunos heridos por los fragmentos que cayeron de varios edificios y por las tejas que volaron de las casas. Las iglesias de La Merced, La Compañía y San Agustín sufrieron daños de consideración; lo mismo que la Casa de Moneda, la Catedral en su interior, la cárcel y el palacio del Director Supremo.

En la figura 2.1 se muestran las isosistas generadas a partir de los registros de daños de la época. La zona más afectada está encerrada por una isosista de intensidad 10 grados en la escala de Mercalli Modificada y comprende las localidades del litoral central además de Quillota, Casablanca y Melipilla que quedaron convertidas en un montón de ruinas. Santiago y las zonas de Illapel, Petorca y Aconcagua se encuentran dentro de la isosista de intensidad 9. Además se muestra la zona en la cual fue sentido este sismo; se incluyen lugares tan distantes como Copiapó por el Norte, San Juan y Mendoza por el Este, Concepción por el Sur y por el Oeste se dice que hasta la isla Juan Fernández (Ramírez, D., 1988), (Urrutia, R., Lanza, C., 1992), (Lomnitz, C., 1971).

Sismo del 6 de Diciembre de 1850

Terremoto del Valle del Maipo. La intensidad en Santiago fue de aproximadamente 7 grados en la escala de Mercalli Modificada. Los daños fueron extensos, pero relativamente leves. Dos personas resultaron muertas. Se informó que se produjeron grandes derrumbes de rocas en un punto situado aproximadamente a 14 Km. al sur de San José de Maipo, lo cual sugeriría que el epicentro estuvo situado en el mismo punto que el de 1958. La magnitud se calcula en 7 a 7.5 grados en la escala de Richter (Lomnitz, 1971).

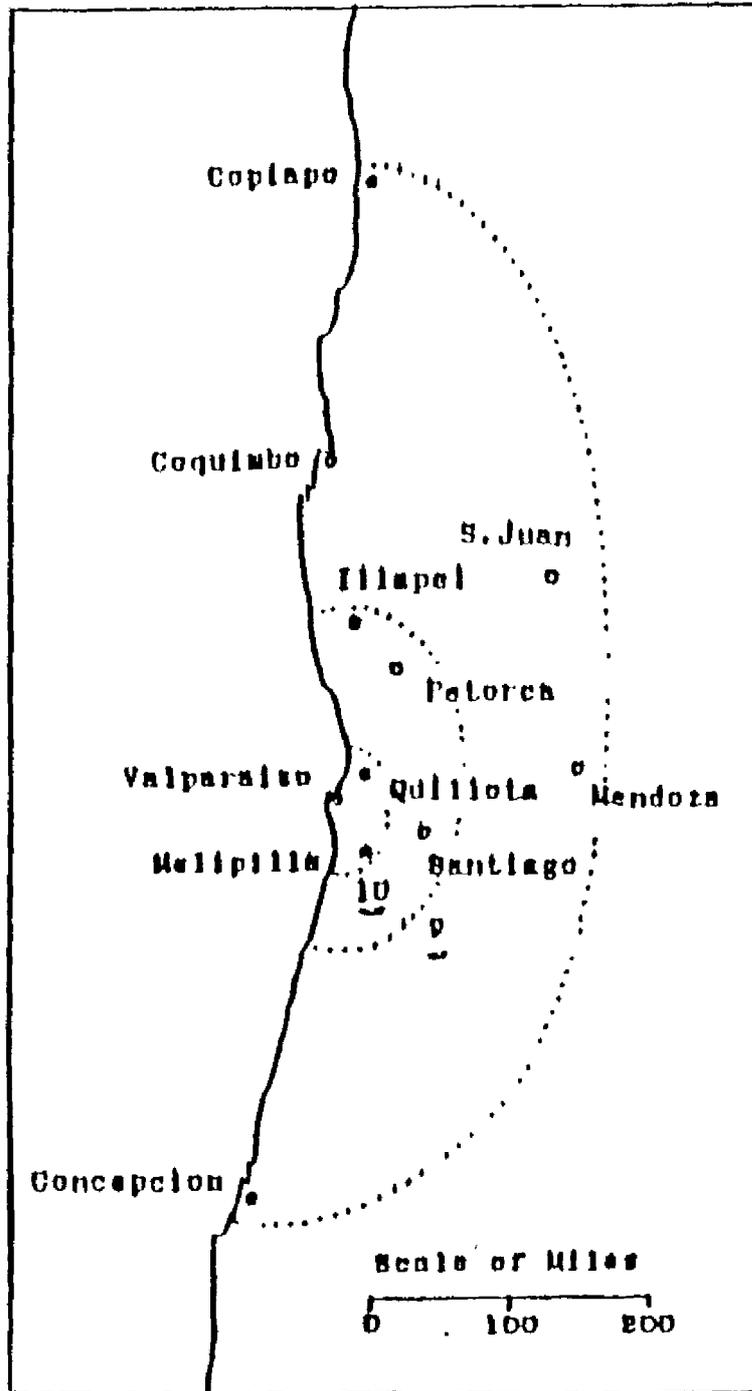


Figura 2.1 ISOSISTAS DEL TERREMOTO DEL 19 DE NOVIEMBRE DE 1822, ESCALA DE MERCALLI MODIFICADA (Ramirez D., 1988).

Sismo del 16 de Agosto de 1906

Considerando que en este sismo se registraron sollevamientos en la costa entre 40 y 80 cm, en una zona limitada por Pichilemu y Llico por el sur y Quintero y Zapallar por el norte, la magnitud fue de 8.4 según Gutenberg y Richter (1950). Posteriormente, Comte (1985) le asigna una magnitud de 8.2 grados en la escala de Richter.

Se produjo un tsunami de baja magnitud, las amplitudes de ola máximas registradas en Valparaíso llegaron a 3 o 4 pies por sobre la marca de la marea alta.

La zona en la que se sintió este sismo incluye a Tacna, Buenos Aires, la isla de Chiloé y las islas Juan Fernández. La sacudida fue sentida a bordo de los buques frente a Punta Deseado (costa atlántica de la Patagonia) [Lomnitz, 1971].

En Santiago los daños fueron escasos, afectando principalmente al templo de El Salvador, el palacio de los Tribunales de Justicia, el Congreso Nacional, en el Cementerio General los mausoleos quedaron casi en su totalidad destruídos, la iglesia de Yungay y la de Lourdes quedaron seriamente agrietadas, se desmoronó parte del internado Barros Arana y del edificio del Museo Nacional y muchas casas particulares quedaron dañadas con agrietamiento en sus murallas.

Según el diario "Los Tiempos de San Antonio": "Se abalanzó sobre el pueblo una mole enorme de arena que arrastró todo lo que pilló a su paso, 2 bodegas, colegio, casa parroquial y casas particulares. La localidad quedó sepultada bajo una capa de arena de 5 a 8 metros de espesor. El curso de las aguas del estero quedó obstruído y formó una laguna cauce arriba".

La figura 2.2 muestra las isosistas e intensidades estimadas para algunas ciudades afectadas por este terremoto.

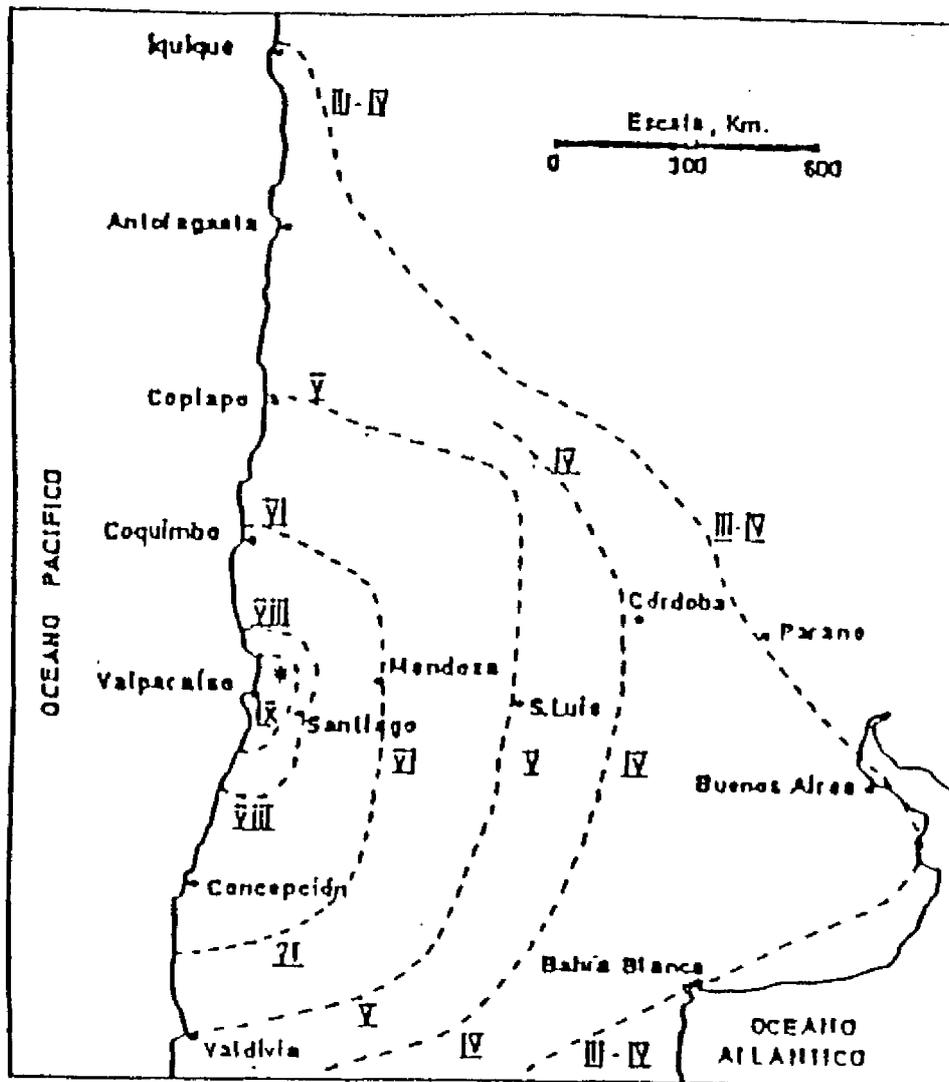


Figura 2.2 ISOSISTAS DEL TERREMOTO DEL 16 DE AGOSTO DE 1906, ESCALA DE MERCALLI MODIFICADA [Rudolph, Tans, 1907] (Recopilado de Osorio, C., 1995).

Sismo del 4 de Septiembre de 1958

Cajón del Maipo. Las primeras noticias después del terremoto indicaban que la localidad minera El Volcán, a una distancia aproximada de 6 kilómetros de Las Melosas, había sido destruída. No existían otros centros de población importantes en la vecindad inmediata, que es montañosa y con escasa tierra cultivable; sin embargo, el sismo se había sentido con gran fuerza en una amplia región, causando pánico general en Santiago. La magnitud fue de 6.9 grados en la escala de Richter, seguido de dos sismos de 6.7 y 6.8 grados (Lomnitz, 1961).

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.

En San Antonio, sufrieron daños de consideración las escuelas N°s 1, 2 y 3, no obstante ser las escuelas 1 y 2 las más modernas. Sufrieron grietas horizontales y verticales y el hundimiento de los pisos en algunas salas de clases. La muralla circundante del estadio Municipal se desplomó en parte y el resto quedó en precarias condiciones. El cuerpo de bomberos de San Antonio sufrió daños considerables. Se desnivelaron los puentes de Llo-Lleo con Barrancas y el de Santo Domingo.

Sismo del 8 de Julio de 1971

Este sismo tuvo su epicentro en el mar a pocos kilómetros de Papudo, a una profundidad de 60 Km. La magnitud fue de 7.5 grados en la escala de Richter; la longitud de la zona de ruptura fue de 60 Km aproximadamente.

En San Antonio, la industria textil suspendió sus actividades por treinta días. En el puerto, que había sido recién elegido como escala alternativa de Valparaíso, la única grúa automática quedó inmobilizada y el hundimiento de parte del molo en 50 centímetros, paralizó el resto. La ciudad no sufrió grandes deterioros, excepto el derrumbe de un hotel de tres pisos que se desarmó internamente y cayó sobre el primer piso; cuatro personas perecieron en el derrumbe. En el edificio de la estación se observaron daños en las fundaciones; observándose el levantamiento de una parte del radier en alrededor de 40 a 50 centímetros. El puente nuevo que va de Tejas Verdes a Santo Domingo que tiene 28 tramos de 30 m c/u, sufrió fallas en todos sus tramos. El desplazamiento transversal máximo fue de 62 cm. y el longitudinal de 30 cm.

En Santiago cayeron algunas cornisas y murallas principalmente en el sector antiguo del centro, se interrumpió el suministro de energía eléctrica, en el edificio del Congreso Nacional se dañaron algunas mamposterías y se agrietaron algunas murallas.

La intensidad en San Antonio se estimó en VII grados en la escala de Mercalli Modificada.

Sismo del 3 de Marzo de 1985

El epicentro de este sismo se ubicó frente a Algarrobo a 40 Km de la costa y a 15 Km de profundidad, su magnitud fue de 7.8 grados en la escala de Richter. El movimiento tuvo una duración de 2 minutos y se sintió entre Copiapó y Temuco (Flores R., 1993). El plano de falla abarcó principalmente la zona marina entre la fosa y la costa desde los 32.7° S hasta los 34.4° S. Este sismo produjo un pequeño maremoto registrado en el mareógrafo de Valparaíso; en esta ciudad, la amplitud máxima de ola llegó a 1.15 m. mientras que en San Antonio la amplitud máxima informada llegó a 3 a 4 m. No se reportó ningún tipo de daños debido a estas fluctuaciones marinas.

En San Antonio se registraron intensidades de VIII grados y localmente IX; en Santiago se produjeron intensidades entre VII y VIII grados en la escala de Mercalli Modificada. En la figura 2.3 se muestran las curvas isosistas generadas a partir del análisis de los efectos de este terremoto.

La ciudad de San Antonio fue una de las más dañadas por este terremoto; la intensidad de daños registrada en inmuebles fue de la más elevada. Se produjeron numerosas grietas y fuertes asentamientos en los pavimentos de hormigón de calles de la zona céntrica. Varios postes del tendido eléctrico experimentaron apreciables giros o cayeron al suelo. La Escuela D-460, construída en lo alto de una duna, experimentó serios daños debido a deficiencias estructurales y a la aparición de importantes asentamientos diferenciales. Una de las calles más afectadas del sector céntrico es la calle 21 de Mayo; antiguamente esta calle fue el lecho del estero Arévalo, el que escurre actualmente por un canal abovedado ubicado bajo el pavimento de esta arteria. El relleno arenoso posterior al abovedamiento del estero no habría sido compactado en forma adecuada produciéndo los consiguientes problemas en edificaciones como las del Cuartel de Bomberos, que sufrió de importantes asentamientos diferenciales y la del supermercado EGAS, de reciente construcción.

En el sector portuario se produjeron importantes daños con una alta trascendencia debido a las implicaciones económicas en la actividad nacional; dentro de los daños se destaca el hundimiento parcial del espigón y la completa destrucción de tres de los sitios de embarque. Varios paños de las losas de pavimento de hormigón resultaron destruídas, arrastrando consigo algunas de las grúas. Las torres de alumbrado resultaron indemnes debido a que poseían un dado de fundación piloteado con rieles de ferrocarril; resguardándolas de los problemas de densificación y licuefacción de los rellenos artificiales superiores. Se produjo una gran deformación y rotura de algunos rieles de las grúas.

El puente Lo Gallardo, que había sufrido daños durante el sismo de Julio de 1971, experimentó la caída de dos de sus tramos por colapso o volcamiento total de la cepa 1 acompañado de notorios desalineamientos del tablero e inclinación sistemática hacia el sur de muchas de las cepas restantes.

Los daños producidos en Santiago abarcaron principalmente a estructuras habitacionales de adobe y de albañilería, en estas últimas se tuvo una gran cantidad de daños visibles, pero en general estos se concentraron en las terminaciones y no se tuvo que lamentar el colapso de edificaciones. En el caso de edificios de hormigón armado, construídos de acuerdo con las recomendaciones de diseño vigentes en la época, el daño se concentró principalmente en los elementos no estructurales; sin embargo, en algunos edificaciones construídas de acuerdo a normas anteriores se produjeron daños mayores que afectaron a la estructura como los que se describen a continuación:

Edificios de la Villa Olímpica:

Estos edificios constituyen un amplio polo habitacional en Santiago, fueron terminados el año 1962 con motivo del mundial de fútbol y actualmente representan una construcción de uso habitacional para sectores de ingresos medios y medios-bajo.

Estructuralmente se caracterizan muchos casos por tener un primer nivel abierto constituyendo pisos blandos. Además se tienen pasarelas de interconexión entre los distintos blocks a nivel del 2° piso que experimentaron daño en sus apoyos.

El daño más importante producido en esta villa fué la falla total de uno de los ejes transversales exteriores de uno de estos block, produciendo el colapso de una parte de este edificio. Este eje está formado por dos columnas ubicadas en el primer nivel que constituyen el apoyo de un muro de hormigón que se extiende en los cuatro pisos superiores. La escasa posibilidad de redistribución de

esfuerzos en el primer nivel causó que el deterioro progresivo de las columnas produjera irremediablemente la falla de este eje resistente del edificio.

Edificios de la Villa Portales:

Estos edificios construídos por el Estado datan de la década del 60 y constituyen otro importante núcleo habitacional de Santiago. La villa está constituída por grandes blocks rectangulares de seis pisos de altura, los que poseen una red de pasillos elevados que intercomunican estos edificios.

Los edificios de esta villa habían experimentado daños en los sismos de 1965 y 1971, los que no fueron reparados en forma adecuada ("Lecciones del Sismo del 3 de Marzo de 1985", Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón). Los daños estructurales y no estructurales, a diferencia de los edificios de la Villa Olímpica, se produjeron en amplias zonas de este conjunto habitacional sin producir, afortunadamente, el colapso de alguna estructura. Uno de los efectos más notorios fue el extenso daño de los estanques de agua potable ubicados en los techos de los edificios y la necesidad de desalojar algunos edificios.

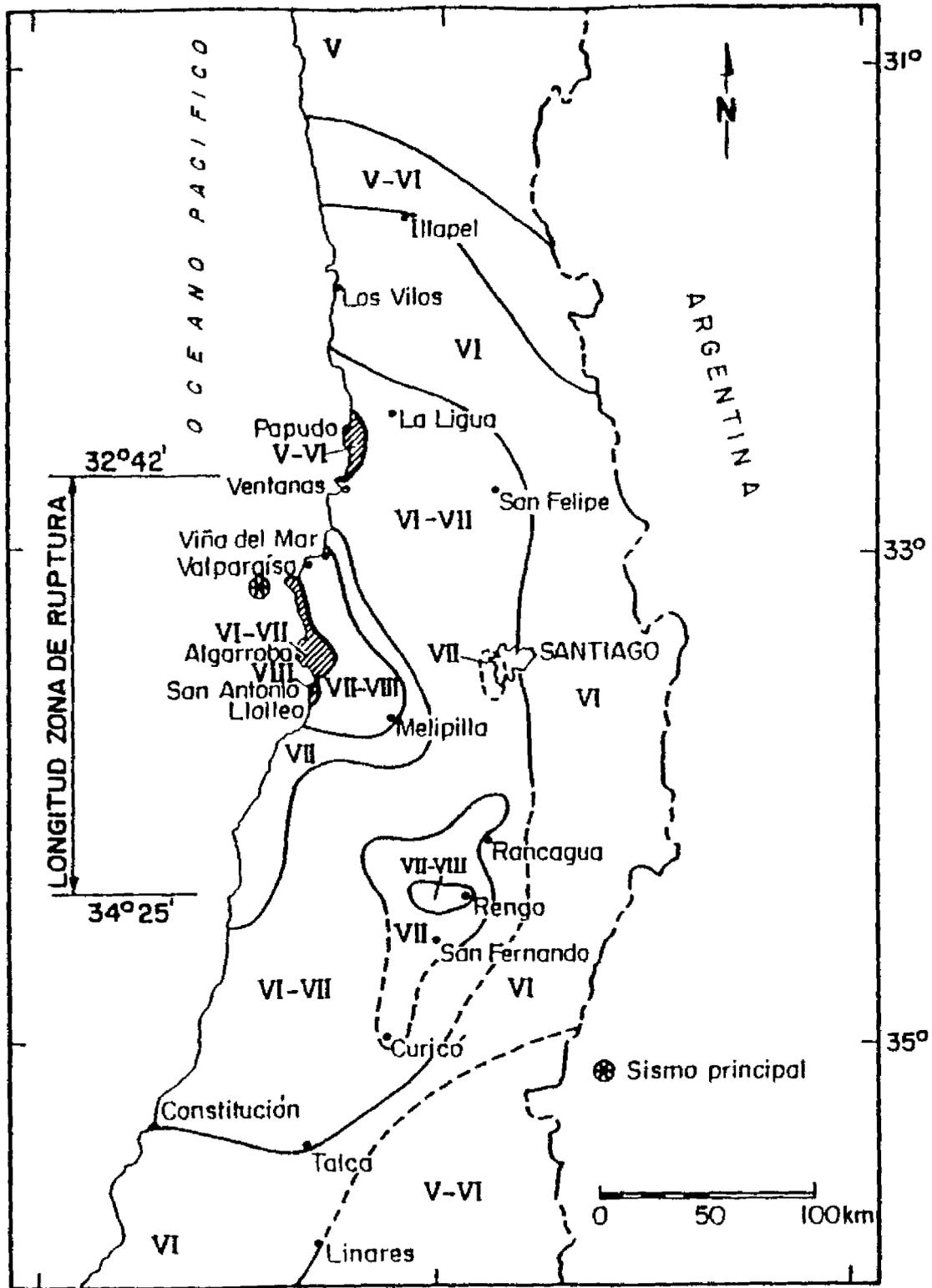


Figura 2.3 ISOSISTAS DEL TERREMOTO DEL 3 DE MARZO DE 1985, ESCALA DE MERCALLI MODIFICADA [Kausel, 1985]

En la tabla 2.1 se entrega el resumen de los distintos sismos que han afectado la zona de Santiago y San Antonio.

Tabla 2.1 Resumen de sismos históricos.

SISMO	Magnitud y Referencia.	Intensidad MM en Santiago	Intensidad MM en San Antonio
17 de Marzo de 1575	7 a 7 1/2 (Lomnitz, 1971)	Sin Información	Sin Información
13 de Mayo de 1647	8 1/2 (Lomnitz, 1971)	XI	Sin Información
8 de Julio de 1730	8 3/4 (Lomnitz, 1971)	Sin Información	Sin Información
19 de Noviembre de 1822	8 1/2 (Lomnitz, 1971)	VII a VIII	X
6 de Diciembre de 1850	7 a 7 1/2 (Lomnitz, 1971)	VII	Sin Información
16 de Agosto de 1906	8.2 (Comte, 1985)	VII a VIII (Menéndez, 1991)	VIII a IX (Menéndez, 1991)
4 de Septiembre de 1958	6.9 (Lomnitz, 1961)	Sin Información	Sin Información
28 de Marzo de 1965	7.1 (D.G.F, 1965)	VII (Medone, 1972)	VI a VII (Monge et al, 1965)
8 de Julio de 1971	7.5 (D.G.F, 1971)	VI a VII (Medone, 1972)	VII (Osorio, C., 1995)
3 de Marzo de 1985	7.8 (D.G.F, 1985)	VII a VIII	VIII a IX

Al analizar los sismos que han afectado la zona central de Chile se aprecian algunas similitudes importantes; entre las que se destacan:

i.- La mayoría de los sismos importantes tiene su epicentro costas afuera.

ii.- Las zonas de ruptura abarcan longitudes superiores a 150 km, con la excepción del sismo de 1971.

iii.- Con la excepción del sismo de 1730, los maremotos o tsunamis que acompañan estos terremotos son de baja magnitud. Esto se contrasta con los sismos de la zona Norte y Sur de Chile; en estas zonas, los terremotos de magnitudes similares a los que han sido detallados, en su mayoría van acompañados por tsunamis de magnitudes moderadas a fuertes y han sido los causantes de una gran proporción de los daños del evento sísmico.

iv.- Los movimientos verticales de la costa son permanentes y de signo positivo (solevantamiento).

v.- El período de recurrencia de los sismos con magnitudes del orden de 8 grados en la escala de Richter es de 82 ± 6 años.

2.4 Riesgo de Tsunami en San Antonio

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

En los casos en que se han producido tsunamis se tienen antecedentes de que la devastación producida por el terremoto mismo es completada por el tsunami. Además, se destaca el caso del terremoto del 8 de Julio de 1730 en que un terremoto ocurrido en la zona central de Chile produjo la destrucción de Concepción debido al tsunami que desencadenó este sismo.

La información de los tsunamis que han afectado a la ciudad de San Antonio es bastante escasa. Al igual que el resto del litoral central, los terremotos que han afectado esta zona no han producido tsunamis de magnitudes significativas. Los antecedentes disponibles sobre tsunamis en la zona de San Antonio son los siguientes:

9 Mayo 1877, Terremoto de Tarapacá: Se observan olas en San Antonio; los daños fueron menores y sólo fueron arrastrados los botes que estaban en los varaderos.

Terremoto del 16 agosto 1906: Amplitudes máximas llegaron a 4 o 5 pies por encima de la marca de la marea alta. No se reportan daños ocasionados por el tsunami.

Es importante destacar que los grandes tsunamis originados frente a Arica e Iquique prácticamente no han afectado a la zona de San Antonio. Además, esta zona ha sido afectada en menor proporción que el promedio de las costas chilenas entre Arica y Chiloé.

Según los antecedentes recopilados, podría estimarse un tsunami grado 2.0 como máximo para el terremoto de 1877 y se observa sólo uno de este grado desde 1562 a la fecha.

En la tabla 2.1 se detallan los distintos grados de un tsunami, además de los daños producto de los mismos.

Tabla 2.2 Escala de grados de un tsunami [Monge J., 1975].

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 y superiores	Daños extendidos a lo largo de más de 500 Km. de costa.

Una altura máxima de 10 m. equivale a una amplitud de 5 m. o bien, una altura máxima de 5 m. sobre el nivel medio del mar cuando alcanza la costa.

Según el estudio de riesgo de tsunami realizado por Jhony Claret (1982), se estima que el mayor tsunami esperado para San Antonio corresponde a uno de grado 2.0 y le asigna una baja probabilidad de ocurrencia.

Considerando estos antecedentes, las áreas potenciales de inundación se han calculado para un tsunami de grado 2.0 como máximo. Las alturas de ola que se han utilizado para determinar el área potencial de inundación son de 7 y 10 metros como caso extremo. Como se muestra en la fig 2.4, el área de inundación comprende la zona baja ubicada entre el sector de Barrancas y de Llo-Lleo. Este es un sector de relleno natural proveniente de la gran cantidad de sedimentos que el río Maipo acarrea y que la corriente marina arrastra hacia ese sector.

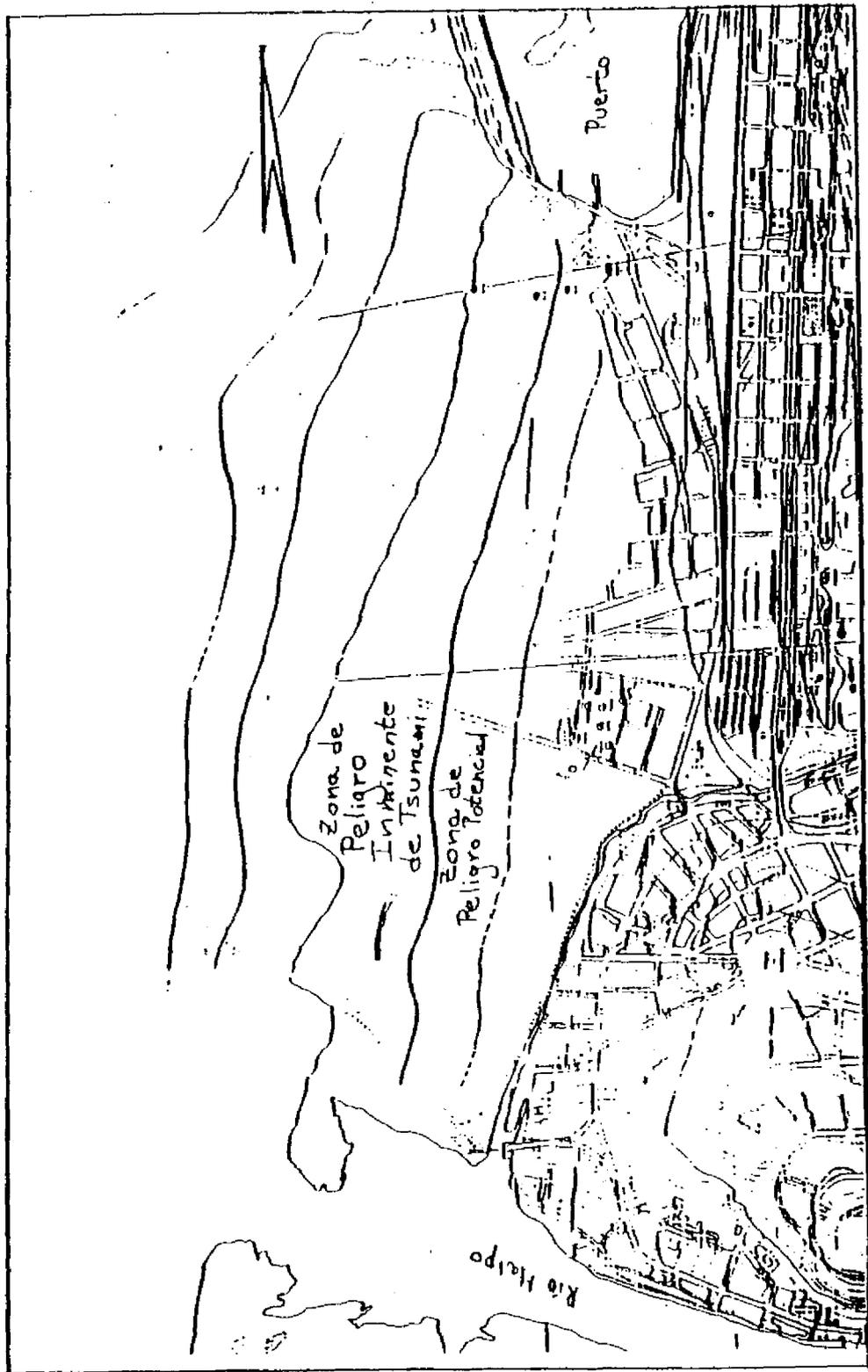


Figura 2.4 AREAS POTENCIALES DE INUNDACION PARA LA CIUDAD DE SAN ANTONIO (Claret J. 1982)

2.5 Microzonificación Sísmica

La microzonificación sísmica tiene como objetivo establecer una subdivisión de un área en zonas más pequeñas, considerando que la acción sísmica puede tener distintas intensidades debido a condiciones locales del suelo y subsuelo. Estas condiciones pueden atenuar la acción sísmica cuando se trata de roca o suelo duro, o amplificar la acción en el caso de suelos blandos.

2.5.1 Microzonificación sísmica de Santiago

Después del terremoto del 3 de Marzo de 1985 se realizaron numerosos trabajos de recopilación de antecedentes de los daños en las viviendas, edificios públicos y servicios en general en la zona afectada por el sismo. Esta información permitió hacer una microzonificación de varias ciudades de la zona central.

En particular, en la ciudad de Santiago se destacan las siguientes diferencias:

i.- La zona correspondiente a la comuna de Las Condes es la que presentó una menor intensidad de daños; esta zona se caracteriza por corresponder su suelo de fundación a la llamada grava del Mapocho.

ii.- Las comunas centrales como Santiago, Estación Central, San Miguel, Providencia y Ñuñoa, ubicadas sobre la llamada grava de Santiago, presentaron intensidades moderadas, entre VII y VIII para las tres primeras y grado VII para las dos últimas.

iii.- La zona que experimentó mayores intensidades corresponde a las comunas de Renca, Cerro Navia, Pudahuel, Quinta Normal Lo Prado y Maipú, caracterizadas por suelos finos y cenizas pumicíticas (Pudahuel y Maipú); observando un aumento de la intensidad para una menor profundidad de la napa freática. Una

intensidad similar se obtuvo en la comuna de Puente Alto; según la caracterización geológica, esta comuna está ubicada sobre depósitos del Río Maipo de características diferentes a los encontrados al norte de esta comuna.

La figura 2.5 muestra las distintas unidades geológicas presentes en la ciudad de Santiago; unidades que muestran una clara correlación con las distintas intensidades producidas por el sismo del 3 de Marzo de 1985. Estas intensidades se muestran en la figura 2.6.

En la tabla 2.3 se identifican las comunas de cada una de las 4 microzonas que se establecen a partir de los datos mostrados en la figura 2.6 y se indican los valores esperados de la intensidad para un sismo de magnitud máxima de 8.5 grados en la escala de Richter.

Tabla 2.3 Valores de intensidades para las distintas microzonas de Santiago (Monge J., Pinto J., Astroza M., 1993).

Microzona	Comunas	I MSK ₁₉₈₅	I MSK _{máx}
SA1	Las Condes	6.5	7.2
SA2	Conchalí, Vitacura, Providencia, Nuñoa, San Joaquín, Pedro Aguirre Cerda, Lo Espejo, La Cisterna, San Ramón, La Granja, El Bosque, La Florida.	7.0	7.7
SA3	Quilicura, Huechuraba, Lo Barnechea, Recoleta, Independencia, Santiago, Estación Central, Cerrillos, San Miguel, La Reina, Peñalolén, Macul, La Pintana, San Bernardo.	7.5	8.2
SA4	Renca, Pudahuel, Cerro Navia, Quinta Normal, Lo Prado, Maipú, Puente Alto.	8.0	8.7

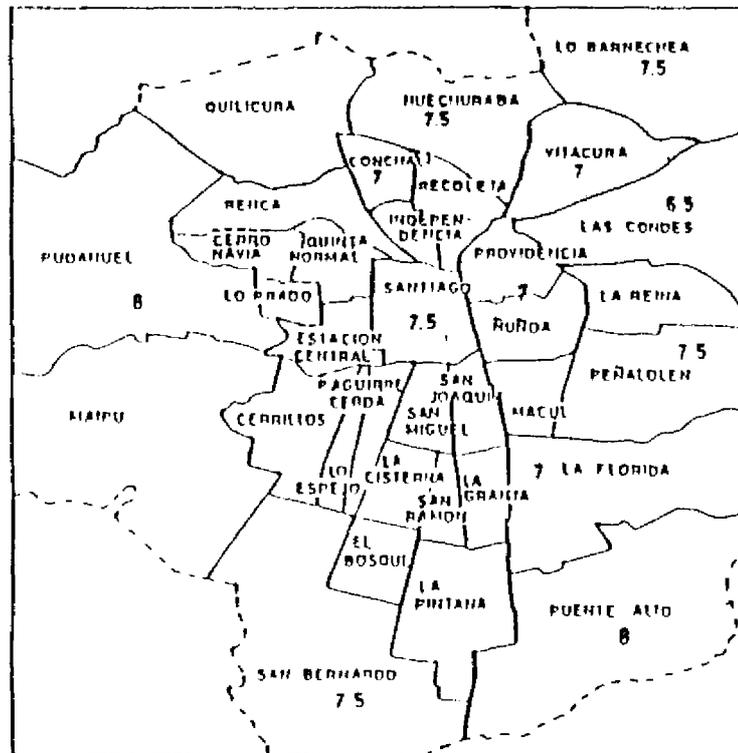


Figura 2.6 MICROZONAS SISMICAS DE LA CIUDAD DE SANTIAGO. GRADOS DE INTENSIDAD MSK DEL SISMO DEL 3 DE MARZO DE 1985 (Monge J., Astroza M., 1991)

2.5.1.1 Comuna de Providencia

Del estudio realizado por Hernández (1987) pueden destacarse los siguientes aspectos de la comuna:

i.- La comuna de Providencia geológicamente puede subdividirse en tres sectores:

Sur del Río Mapocho:

El subsuelo de este sector corresponde al relleno sedimentario formado por los arrastres fluviales del río Mapocho. Consiste básicamente en granos de tamaño hasta 10 a 12", relativamente limpios y redondeados; estos sedimentos son homogéneos y de mediana a alta compacidad. La napa de agua se encuentra entre los 15 y 20 m. en las cercanías del Mapocho y alcanza profundidades bajo los 60 m. hacia el límite sur de la comuna.

Barrio Bellavista:

En esta zona se encuentran rellenos artificiales y la grava de Santiago; sin embargo, estudios de suelos efectuados para la construcción de los edificios de los canales de televisión han permitido identificar arcillas hasta profundidades por debajo de los 5m.

Pedro de Valdivia Norte:

En general, Pedro de Valdivia Norte es una zona de rellenos artificiales, de espesor variable, ya que se han rellenado canales y canteras que habían en la zona; normalmente a los 4 m. de profundidad se llega a suelo firme. Se destaca el estudio realizado para la construcción del Hotel Sheraton en el que se deja constancia de que en la zona existe un relleno artificial

de 14 m. de espesor, formado por diversos materiales, incluido basuras.

El análisis de las encuestas de daños de esta comuna se realizó subdividiendo la comuna en 9 sectores (2 sectores para el Barrio Bellavista, 1 sector para Pedro de Valdivia Norte y los 6 restantes sectores correspondientes a la zona al sur del Mapocho).

Para el sector en que se ubica el hospital de Neurocirugía se obtuvieron las intensidades más bajas de la comuna y entre las más bajas de todo Santiago; resultado esperable ya que, según estudios de mecánica de suelos, los ripios tienen un excelente comportamiento sísmico y la napa freática se encuentra a profundidades del orden de 50 m., lo que favorece este buen comportamiento observado.

En la figura 2.7 se presenta un esquema de la comuna de Providencia. En este esquema se destacan los distintos grados de intensidad del sismo del 3 de Marzo de 1985, determinados a partir de los daños. Se muestra además la ubicación aproximada del hospital de Neurocirugía.

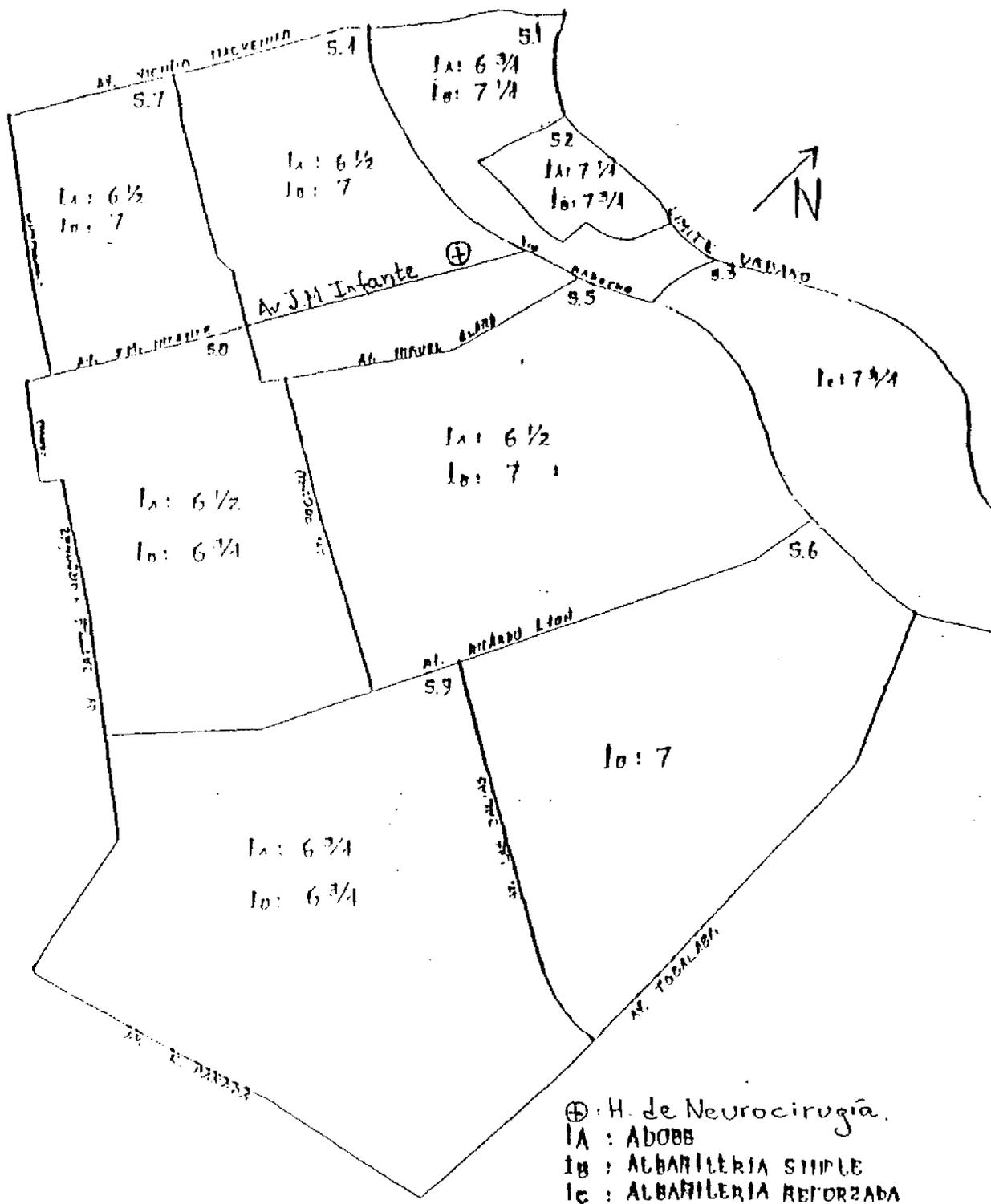


Figura 2.7 MICROZONIFICACION SISMICA DE LA COMUNA DE PROVIDENCIA. GRADOS DE INTENSIDAD MSK DEL SISMO DEL 3 DE MARZO DE 1985. (Hernández J. 1987)

2.5.2 Microzonificación sísmica de San Antonio

De los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad de San Antonio se puede destacar el trabajo de estudio de suelos realizado por Claret J. (1982). Posteriormente al sismo del 3 de Marzo de 1985 se realizaron numerosas encuestas de daños y sus resultados fueron recopilados en el estudio realizado por la empresa Geotécnica Consultores para el Ministerio de Vivienda y Urbanismo. De estos trabajos se pueden destacar los siguientes aspectos:

i.- Características Geológicas

La zona en que se ubica San Antonio posee dos grandes unidades morfológicas: Plataforma Submarina y Cordillera de la Costa. Entre estas se ubica la playa con un ancho máximo de 400 m. El área urbana de esta ciudad se ubica principalmente en el área de la Cordillera de la Costa, la cuál está caracterizada a su vez por las tres unidades siguientes:

- Cerros con alturas de 100 a 200 m., tales como el cerro Centinela, Cerro Tralca y Cerro La Viuda.

- Terrazas desarrolladas a partir de los 100 m.s.n.m.; estas constituyen superficies planas producidas por la erosión marina en tiempos pasados.

- Quebradas, siendo las principales las de los esteros Arévalos y El Sauce. Estas desaguan una red de drenaje secundario con varias quebradas menores.

Las unidades geológicas que afloran en San Antonio son, de más antiguo a nuevo, un basamento rocoso, cubierto por rocas sedimentarias arenosas o de coquinas y a su vez cubiertas, en algunas zonas, por arenas de dunas. Las características más importantes de estas unidades geológicas son las siguientes:

Basamento Rocoso

El basamento rocoso de San Antonio está constituido por rocas ígneas y metamórficas silíceas. Su alta densidad y bajo grado de alteración-meteorización son características que las hacen recomendables como suelo de fundación. Afloramientos aislados se encuentran en el lecho del estero Arévalos, en la zona urbana de la Quebrada Huallipen y en el "Peñón de la Viuda".

Coquinas de Miramar Grande

En el cajón de la quebrada Arévalos, a la cota de 70 m.s.n.m., afloran depósitos bien consolidados y cementados de coquinas y areniscas calcáreas. Las coquinas están constituidas por fragmentos de conchas de organismos marinos de esqueleto calcáreo, muy compacto y cementadas por carbonato de calcio.

Arenas de dunas

Las arenas de dunas constituyen la mayor parte del suelo de fundación de Barrancas y de la zona sur de San Antonio. Su distribución es bastante regular, tomando una forma de lengua orientada en dirección noreste. Se encuentran desde los 5 m.s.n.m. hasta la cota 200 m.s.n.m.; y su distribución estaría controlada por los valles de los esteros Arévalos y El Sauce y la dirección, sureste, predominante de los vientos.

Estos depósitos corresponden a arena fina muy bien seleccionada, con granulometría muy homogénea y con ausencia de granulometría arcillosa; su color gris oscuro está determinado por un alto contenido en minerales de hierro.

Sus características geotécnicas son: una baja compacidad, nula cementación y excelente drenaje. Su mala compactación es señal de riesgo de deslizamiento en taludes fuertes, superiores al "ángulo de reposo", aproximadamente de 30° a 35°; taludes mayores a este ángulo se afirman gracias a raíces vegetales.

ii.- Suelos de Fundación

a.- Los tipos de suelo presentes en la ciudad de San Antonio van desde el tipo I hasta el tipo IV, de acuerdo a la clasificación estipulada en la norma NCh 433 of 93.

b.- El suelo tipo I está presente en los afloramientos del basamento rocoso; principalmente en el sector norte de la ciudad. Esta zona tiene una menor densidad habitacional que el resto de las zonas de la ciudad.

c.- Los suelos tipo II están constituidos en su mayor parte por las arenas de dunas presentes en la zonas altas frente al puerto y la zona de Llo Lleo. Esta es una de las zonas residenciales importantes de San Antonio y se ubica además el hospital analizado en esta memoria.

d.- Los suelos tipo III están presentes en las zonas bajas del puerto, Llo Lleo y en la zona céntrica de la ciudad (en la zona del antiguo cauce del estero Arévalo); estos provienen principalmente de las depositaciones más recientes que las que constituyen los suelos de tipo II.

e.- En una zona del lecho del estero Arévalo se identificó un suelo de características menos favorables aún que la de los tipos anteriores. La zona es bastante reducida y corresponde al sector céntrico de la ciudad. Esta es la única zona con suelo tipo IV identificada en esta ciudad.

Todas estas zonas se identifican en la figura N° 2.8, figura en que se ubica aproximadamente el emplazamiento del hospital analizado en esta memoria.

Con las encuestas de daños producidos por el sismo del 3 de Marzo de 1985 se pudo determinar las intensidades en diferentes sectores de la ciudad, las que se resumen en la figura N° 2.9. De esta figura se puede destacar:

i.- Las zonas con mayor intensidad de daños corresponden a las zonas de tipo de suelo III y a las de tipo II ubicadas en zonas de pendientes; estas zonas corresponden a los sectores 1, 3, 4, 6, 9, 13, 16, 17, 19 y 20.

ii.- Las zonas con una menor intensidad de daños corresponden a los sectores 7, 8, 10, 11 y 12; las dos primeras, a pesar de estar fundadas en suelos de tipo III, pueden tener este menor nivel de daños debido a que son zonas relativamente planas. Los otros tres sectores mencionados corresponden a suelos de tipo II constituídos principalmente por areniscas, conglomerados y fangolitos continentales. De acuerdo con el estudio de Geotécnica Consultores; estos suelos son de mejor calidad que la arena presente en las demás zonas que corresponden a suelo tipo II.

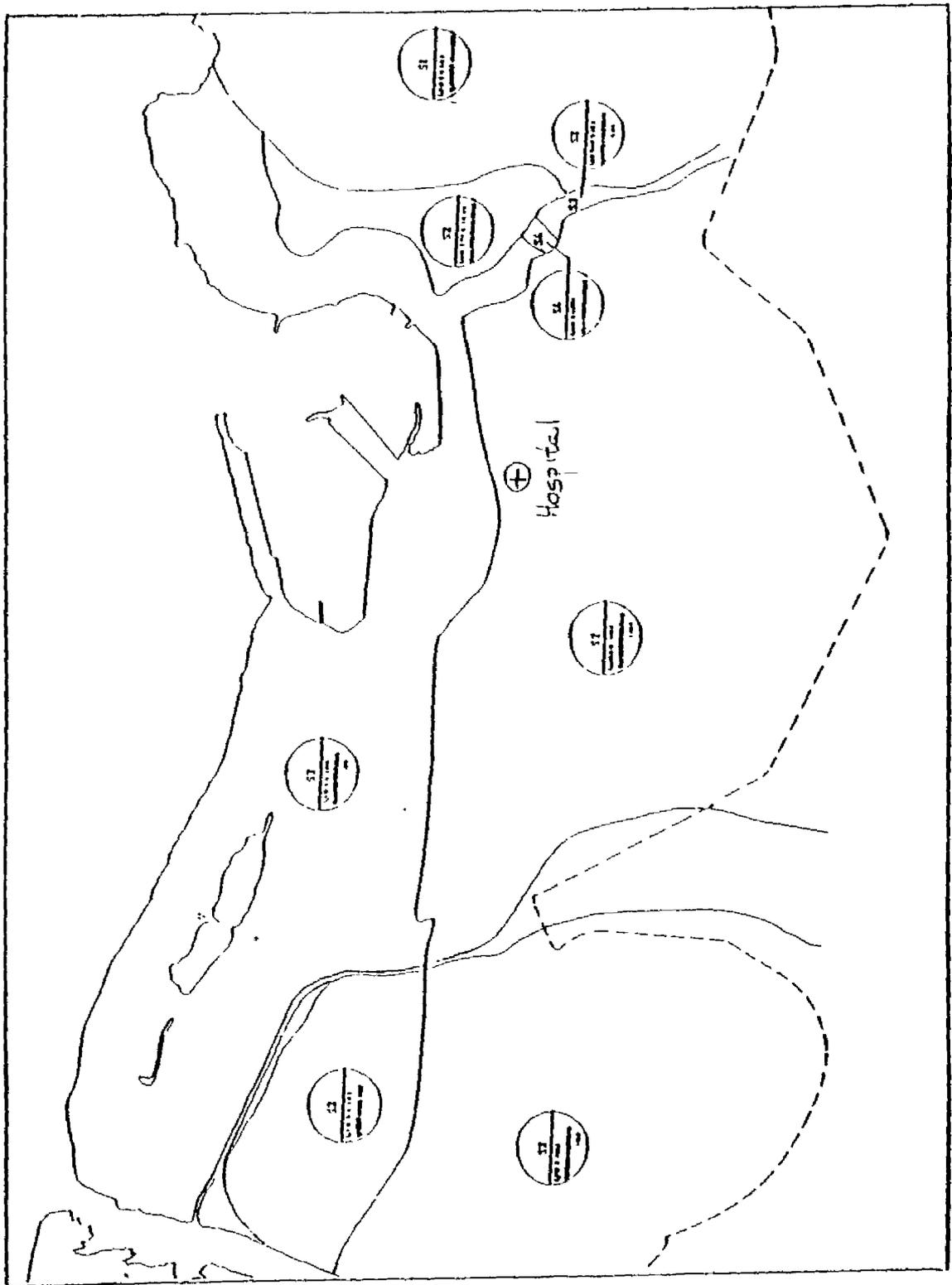


Figura 2.8 CLASIFICACION DE SUELOS DE LA CIUDAD DE SAN ANTONIO. (Geotécnica Consultores, 1988)

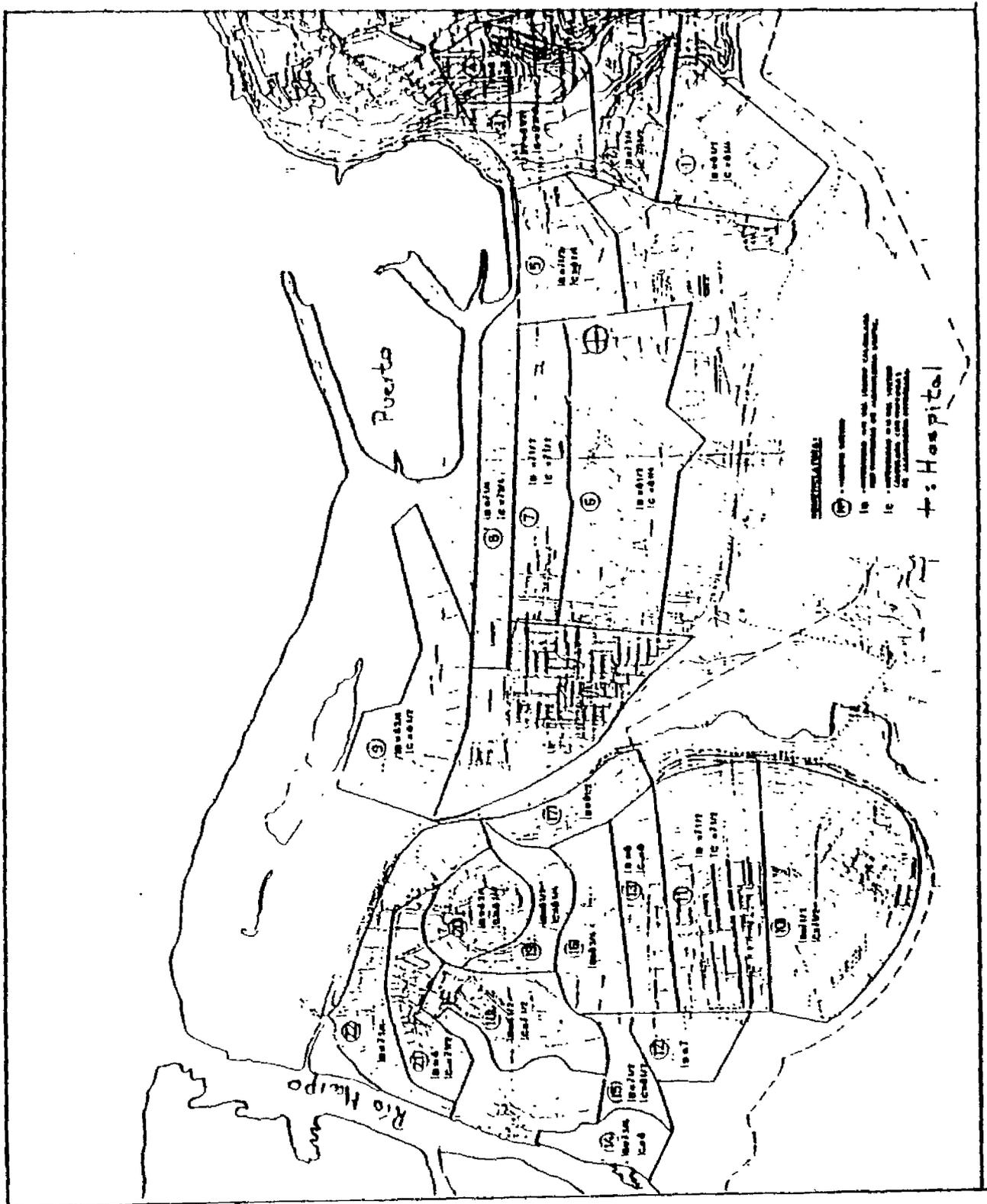


Figura 2.9 MICROZONIFICACION SISMICA DE SAN ANTONIO. GRADOS DE INTENSIDAD MM DEL SISMO DEL 3 DE MARZO DE 1985. (Geotécnica Consultores, 1988)

2.6 Intensidades máximas esperadas

La estimación de las intensidades máximas esperadas para una zona o ciudad específica es bastante útil para poder predecir los efectos que pudiera tener un sismo severo y de baja probabilidad de ocurrencia.

La metodología (Monge J., Kausel E., Astroza M., 1993) utilizada para esta determinación considera algunos aspectos como los siguientes:

En Chile, y otras zonas de actividad sísmica de subducción, los mayores terremotos son los que se producen por la interacción de las placas. Esta zona está limitada al oeste por la fosa marina y alcanzando hacia el este profundidades del orden de 40 Km. siguiendo la pendiente del llamado plano de Benioff.

Debido a que la zona de contacto está limitada en profundidad, el ancho de la superficie de ruptura de sismos mayores debe extenderse principalmente hacia la fosa. Esto se traduce en que la posición del eje hipocentral medio, que corresponde a la línea trazada en forma paralela a la costa y que pasa por la posición del hipocentro o foco del terremoto, se traslada hacia el oeste. En resumen, terremotos mayores tienen un hipocentro y baricentro de la superficie de ruptura más alejado que en el caso de terremotos de menor intensidad.

Considerando la información histórica, se concluye que una magnitud de 8.5 grados en la escala de Richter es la magnitud máxima esperada en la zona de interés.

El terremoto de Marzo de 1985, en la zona central de Chile, alcanzó una magnitud de 7.8 grados y tuvo un foco situado aproximadamente a unos 40 Km. costa afuera y 20 Km. de profundidad; por este motivo, la posición del eje hipocentral del terremoto máximo probable debe quedar a más de 40 km. de la costa. Se estima por lo tanto que el eje hipocentral del terremoto máximo queda a 60 km. de la costa y a 20 Km. de profundidad.

La estimación de las intensidades máximas se realiza utilizando la fórmula de Barrientos, contrastada con la información de intensidades del terremoto de 1985.

Todos estos antecedentes permitieron hacer la estimación de las intensidades máximas esperadas para la zona de Santiago y el litoral central (Astroza M., et al., 1997); estas estimaciones se indican en la tabla 2.3.

Tabla 2.4 Intensidades máximas esperadas para las comunas de Providencia y San Antonio. Ms = 8.5. (Astroza M., et al., 1997).

Comuna	Imáx
Providencia	7 1/2 a 8
San Antonio	8 1/2 a 9