

## EL TERREMOTO DE TOCOPILLA DEL 20 DE DICIEMBRE DE 1967

Issa KORT K \*

### RESUMEN

*Se analizan las características del terremoto del 20 de diciembre de 1967 en Tocopilla y los daños producidos en diferentes zonas de la ciudad. Basándose en los daños y tomando en cuenta la geología de la zona, las propiedades de los distintos suelos de la ciudad y el análisis de microvibraciones, se establece la distribución de intensidades sísmicas en la escala MSK 1964. Se encuentra una buena correlación entre las intensidades y las clases de suelo.*

### INTRODUCCION

El objetivo principal de este estudio es analizar con detalle los efectos producidos en las viviendas, edificios y obras civiles de la ciudad de Tocopilla, por el terremoto del 20 de diciembre de 1967 que afectó en forma parcial el norte grande de Chile, y que tuvo su epicentro en una zona cercana a la ciudad mencionada.

Para lograr esta finalidad se ha investigado la relación daños estructuras-suelo de fundación, basándose en el conocimiento de la geología zonal y propiedades de los suelos, y en encuestas de daños efectuadas detalladamente en gran parte de las estructuras existentes en la ciudad.

Asimismo, se han investigado las características intrínsecas del terremoto, determinando el hipocentro mediante un programa de computación, y estimando una distribución de intensidades en la ciudad, por medio de una encuesta exhaustiva de los daños ocurridos en la población y de los efectos producidos en los pobladores.

El autor en su estudio original completo, que constituyó su tesis para optar al título de ingeniero civil, abordó otros temas que no se incluyen en este artículo. Entre ellos estuvo un análisis especial de los daños en dos poblaciones y en un

---

\*Ingeniero de CORVI.

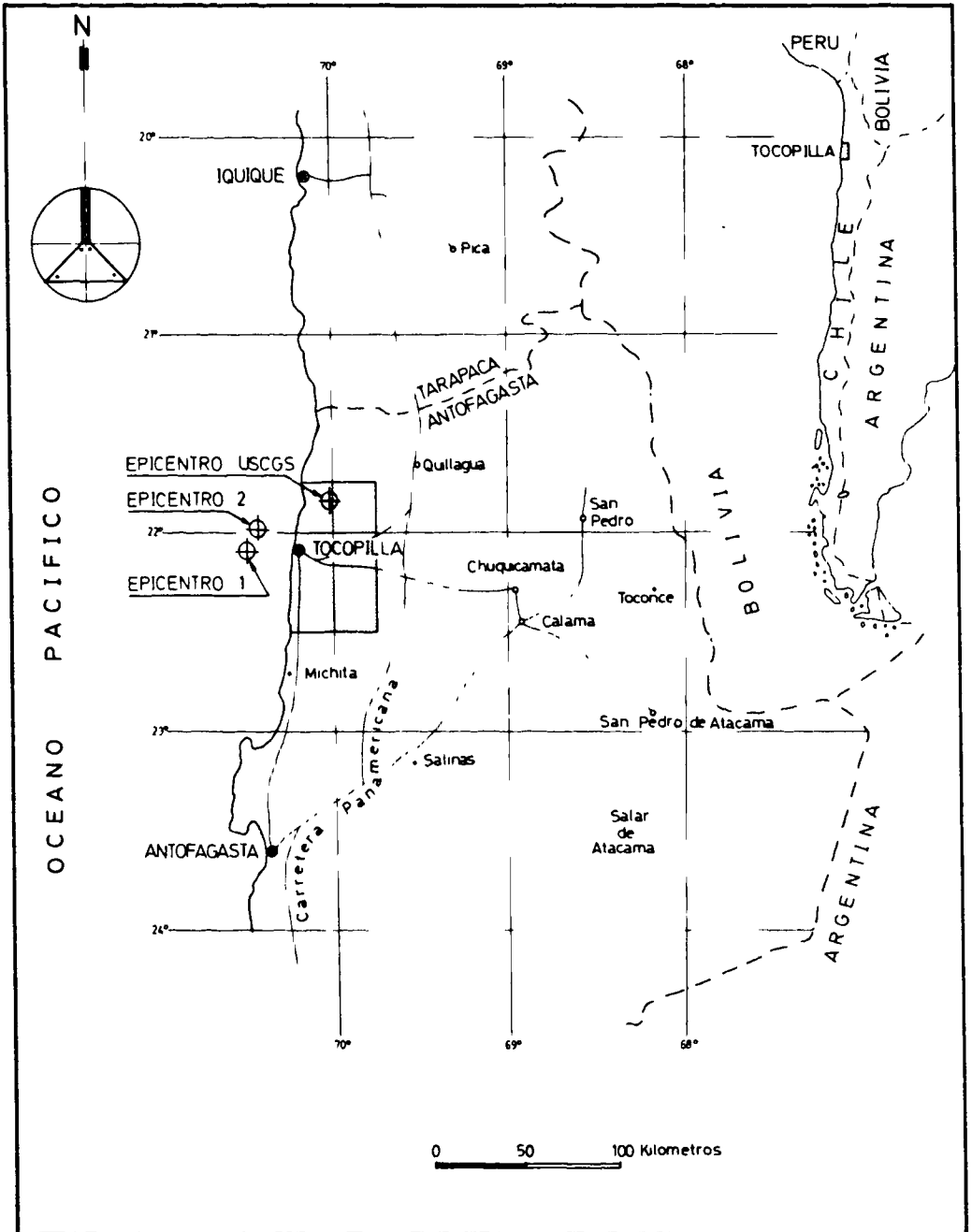


Fig. 1. Ubicación de Tocopilla.

edificio de los cuales se estudió el comportamiento durante el fenómeno sísmico. La finalidad de ese análisis era formular una explicación a la secuencia de daños en la estructura basándose en su forma y distribución y en hipótesis sobre comportamiento de la estructura frente a fuerzas horizontales. Este análisis es muy importante para determinar las soluciones de reparación y establecer qué partes

de la estructura deben ser reforzadas. Otro tema, al cual se le concedió especial atención, fue el de plantear algunas ideas para un proyecto de norma sobre reparaciones de edificios dañados por movimientos sísmicos.

El estudio incluido en el presente trabajo está basado en un gran número de antecedentes reunidos en la zona, y en trabajos realizados por varios investigadores.

El marco geológico regional así como el mapa de la geología de la ciudad provienen de los estudios y antecedentes reunidos por Talloni y Karzulovic<sup>1</sup>.

La zonificación de los suelos de la ciudad está apoyada en los estudios de geología mencionados anteriormente y en la exploración de numerosos pozos de reconocimiento excavados con este fin con su correspondiente muestreo y análisis de laboratorio, y en certificados de ensayos emitidos por IDIEM (1965 a 1968) para los estudios de mecánica de suelos de diversas obras construídas en la ciudad de Tocopilla.

Las propiedades dinámicas del suelo de fundación se han obtenido mediante mediciones de microvibraciones las que han sido interpretadas utilizando los criterios de K. Kanai y T. Tanaka<sup>2</sup>. Los métodos de elaboración de las mediciones de microvibraciones se basan en los estudios realizados por R. Lástrico<sup>3</sup>.

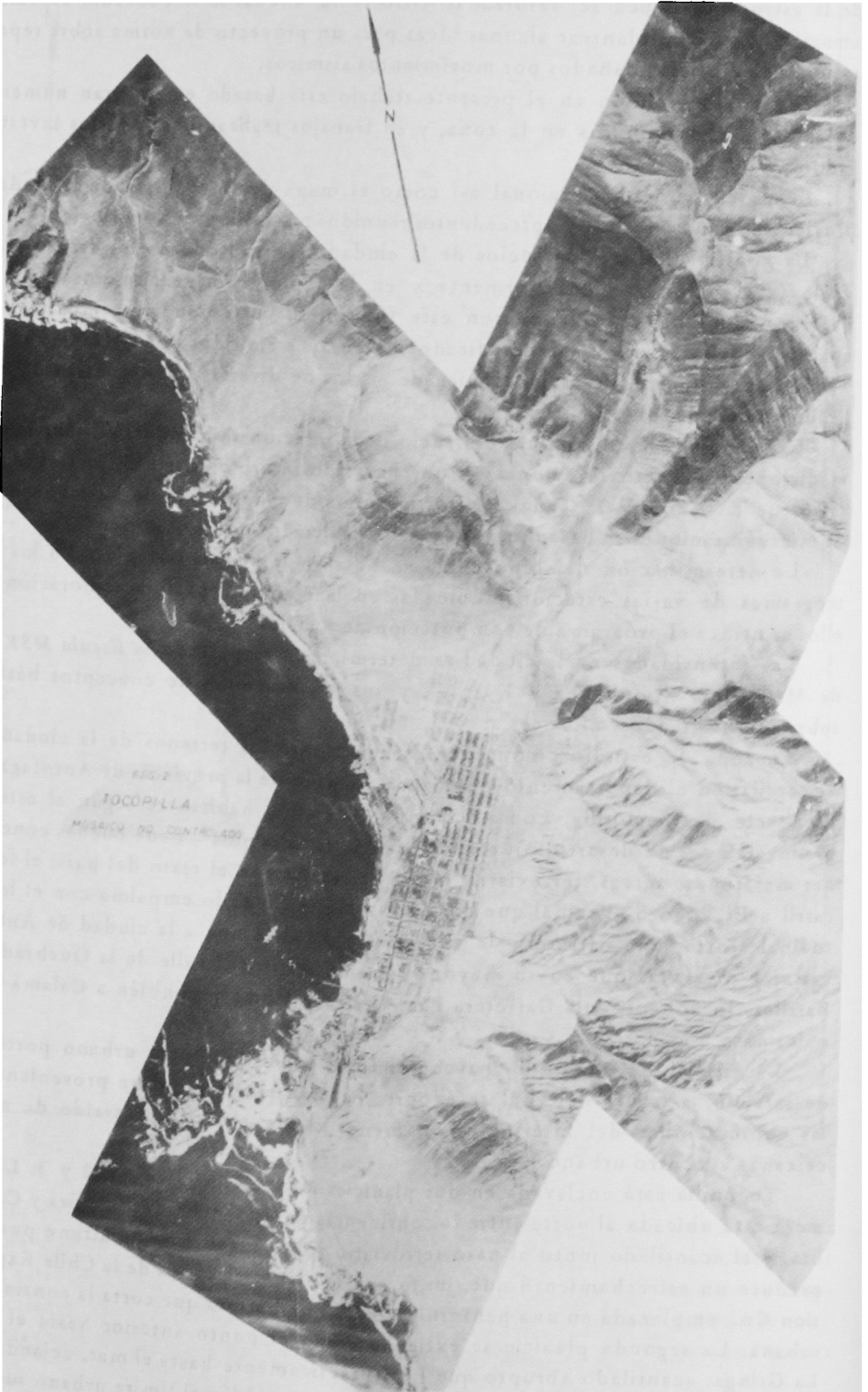
La determinación del hipocentro se basa en los datos obtenidos en los sísmogramas de varias estaciones ubicadas en la región, y para la elaboración de ellos se utiliza el programa de computación de R. Olea<sup>4</sup>.

Las intensidades en la ciudad se determinaron empleando la *Escala MSK.64* de Medvedev, Sponheuer y Kárnik<sup>5</sup> y sus explicaciones de conceptos básicos sobre su significado y alcances<sup>6</sup>.

La zona de estudio comprende esencialmente los terrenos de la ciudad de Tocopilla, en el departamento del mismo nombre de la provincia de Antofagasta. El puerto de Tocopilla, con poco más de 25.000 habitantes según el estudio pre-inversional de desarrollo urbano-regional de Tocopilla<sup>7</sup>, tiene buenas conexiones marítimas, aéreas, ferroviarias y por carreteras con el resto del país; el ferrocarril a El Toco o al ramal que conduce a María Elena lo empalma con el longitudinal Norte; una carretera de excelente calidad lo une a la ciudad de Antofagasta, y otra vía, que en su mayor extensión recorre el valle de la Quebrada de Barriles, lo conecta a la Carretera Panamericana Norte y también a Calama-Chuquicamata, Fig. 1.

La ciudad de Tocopilla ha cumplido el papel de centro urbano portuario de servicio, a través del cual se exporta en gran escala el salitre proveniente de las explotaciones del interior, y en menor escala el cobre extraído de minas cercanas al centro urbano.

Tocopilla está enclavada en dos planicies muy estrechas, Figs. 2 y 3. La primera está ubicada al norte entre la confluencia de las Quebradas Barriles y Carmelita, y el acantilado junto al paso ferroviario sobre nivel. En este último punto se produce un estrechamiento que, junto con la planta eléctrica de la Chile Exploration Co., emplazada en una península, forma una barrera que corta la continuidad urbana. La segunda planicie se extiende desde el punto anterior hasta el cerro La Gringa, acantilado abrupto que llega prácticamente hasta el mar, dejando sólo paso al camino a Antofagasta. Este punto señala también el límite urbano sur.





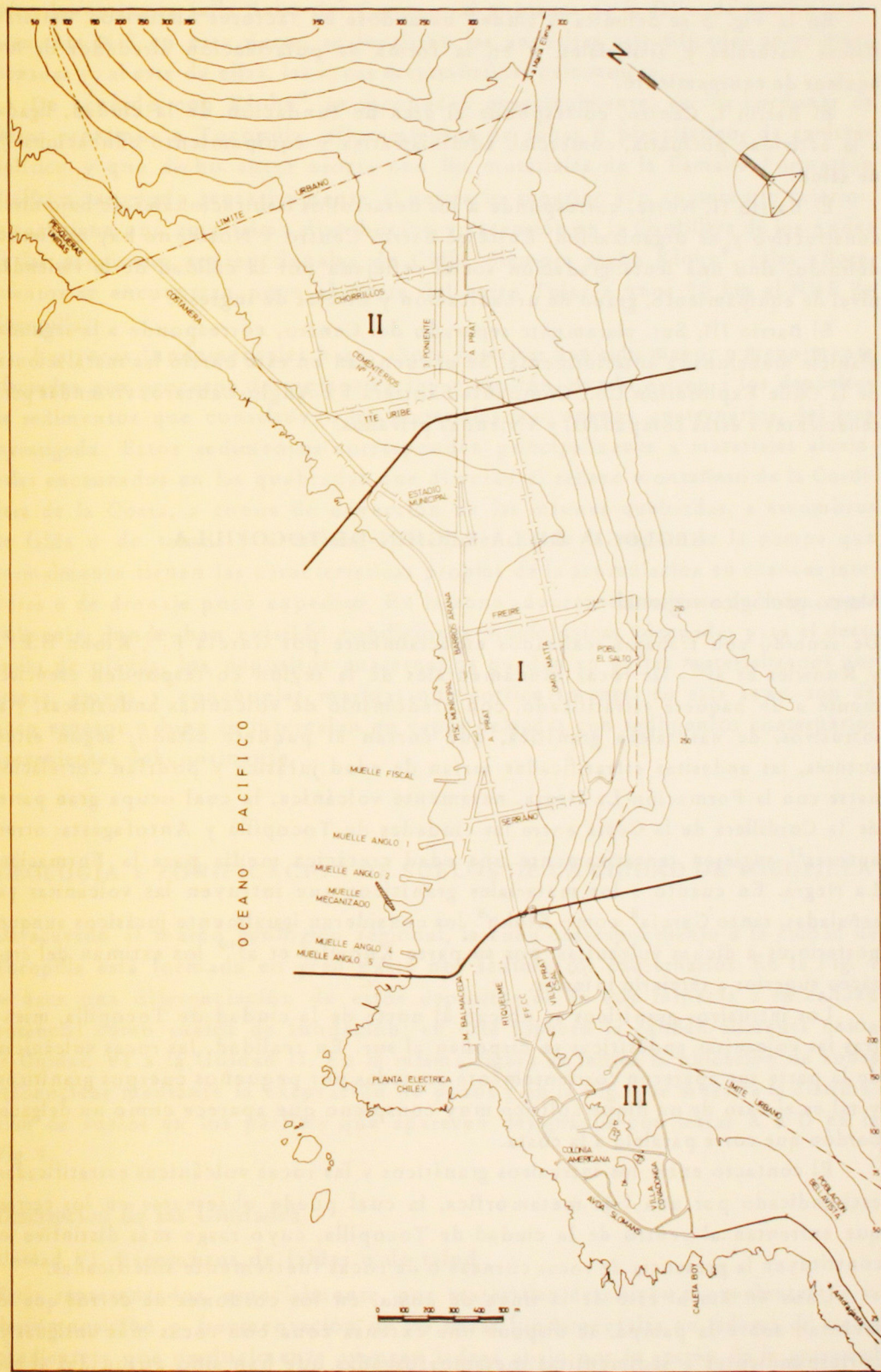


Fig. 3. Estructuración de barrios, Tocopilla.

En la Fig. 3 se delimita la ciudad basándose en factores históricos, barreras físicas naturales y artificiales, y en la forma de polarización alrededor de los núcleos de equipamiento.

El Barrio I, Centro, corresponde al área de fundación de la ciudad, ligada a la actividad portuaria, comercial, administrativa y equipamiento educacional y de salud.

El Barrio II, Norte, corresponde a los desarrollos habitacionales de bajo nivel constructivo y de organización. Entre el Barrio Centro y Norte, no hay un límite definido, sino una lenta gradación social reflejada por la calidad de la vivienda, nivel de equipamiento, grado de urbanización y niveles de ingreso.

El Barrio III, Sur, claramente separado del Centro, corresponde a la segunda planicie mencionada anteriormente. Se encuentran en este barrio las instalaciones de la Chile Exploration Co., Compañía Salitrera Ex-Anglo-Lautaro, viviendas pertenecientes a estas compañías, y viviendas privadas.

## GEOLOGIA DE LA REGION DE TOCOPILLA

### Marco geológico regional

De acuerdo con trabajos realizados especialmente por García F.<sup>8</sup>, Klohn H.E.<sup>9</sup>, y Knowles et al.<sup>10</sup>, las rocas fundamentales de la región corresponden esencialmente a un paquete estratificado, con predominio de volcanitas andesíticas, y a intrusivos, de naturaleza granítica, que cortan el paquete citado; según estos autores, las andesitas estratificadas serían de edad jurásica y podrían correlacionarse con la Formación La Negra, netamente volcánica, la cual ocupa gran parte de la Cordillera de la Costa entre las ciudades de Tocopilla y Antofagasta; otros autores<sup>11</sup> sugieren tentativamente una edad cretácica media para la Formación La Negra. En cuanto a los materiales graníticos que intruyen las volcanitas ya señaladas, tanto García<sup>8</sup> como Klohn<sup>9</sup> los consideran igualmente jurásicos aunque posteriores a dichas volcanitas; por su parte Knowles et al.<sup>10</sup> los estiman del cretáceo superior a terciario inferior.

Los intrusivos graníticos se ubican al norte de la ciudad de Tocopilla, mientras las volcanitas andesíticas se disponen al sur. En realidad, las rocas volcánicas de la parte sur aparecen corrientemente cortadas por pequeños cuerpos graníticos y tal es el caso de un dique aplítico muy conspicuo que aparece como un delgado cordón que corre paralelo a la costa.

El contacto entre los intrusivos graníticos y las rocas volcánicas estratificadas está indicado por una faja metamórfica, la cual puede observarse en los cerros que enfrentan al centro de la ciudad de Tocopilla, cuyo rasgo más distintivo lo constituyen la presencia de rocas córneas o de rocas fuertemente silicificadas.

Unos 40 km al este de la línea de costa, en los cordones de cerros que se levantan sobre la pampa, se dispone una extensa zona con rocas más antiguas y correspondientes a sedimentitas metamorfoseadas que han sido atribuidas al paleozoico. De acuerdo con Knowles et al.<sup>10</sup>, el límite occidental de las rocas metamórficas paleozoicas queda señalado por una falla que supone de extensión regio-

nal y denominada falla Salar del Carmen; al poniente de la falla, de rumbo prácticamente N-S en esta parte, se localizan las andesitas estratificadas antes mencionadas y, al este de ellas, las rocas metamórficas paleozoicas.

De acuerdo con Klohn<sup>9</sup> se reconocen ocasionalmente, en los cordones de cerros próximos a Tocopilla, afloramientos de tobas o piroclásticos de carácter riolítico y que dicho autor asocia con los materiales de la llamada Formación Riolítica, asignada tentativamente al terciario superior y/o cuaternario inferior, la cual tiene una amplísima distribución y extensión en la Cordillera de los Andes de las provincias septentrionales de Chile. Siempre según Klohn<sup>9</sup>, tales afloramientos se encuentran poco al norte del cerro Tolar a unos 20 km al NNE de Tocopilla.

Las rocas fundamentales hasta ahora descritas han sido mayor o menormente afectadas por procesos de meteorización y erosión, dando origen a los depósitos de sedimentos que constituyen los materiales más nuevos, cuaternarios, del área investigada. Estos sedimentos corresponden principalmente a materiales aluvionales encauzados en las quebradas que disectan el relieve montañoso de la Cordillera de la Costa, a conos de deyección de las mismas quebradas, a escombros de falda o de talud, y a rellenos o sedimentos de la región de la pampa que normalmente tienen las características propias de la acumulación en cuencas interiores o de drenaje poco expedito. En la zona adyacente a la línea de costa, especialmente donde han existido condiciones morfológicas adecuadas para el desarrollo de playas, los depósitos cuaternarios quedan en partes materializados por arenas, gravas y conchuelas marinas que corrientemente, en esta zona, son de poco espesor o bien se intercalan en capas delgadas con sedimentos cuaternarios provenientes del continente.

## GEOLOGIA Y ZONIFICACION DE SUELOS DE LA CIUDAD DE TOCOPILLA

De acuerdo al marco geológico regional, la zona correspondiente a la ciudad de Tocopilla está formada en gran parte por sedimentos cuaternarios. En la Fig. 4 se hace una diferenciación de estos depósitos en lo que respecta a su calidad potencial como suelos de fundación; en este aspecto la calidad aumenta desde la Unidad VI a la Unidad II. En la misma figura se indica la ubicación de zonas reconocidas mediante la excavación de pozos y en la Fig. 5 se muestra la distribución de suelos en los perfiles que aparecen designados con letras A a D en la Fig. 4.

### Descripción de las Unidades

#### Unidad VI. Escombros de faldas o de talud

Están representados, especialmente, por materiales detríticos provenientes de la descomposición o fragmentación de las rocas fundamentales en laderas de cierta pendiente y que gradualmente avanzan ladera abajo por la acción de la gravedad en un movimiento conocido con el nombre de corrimiento o reptación. El corrimiento de las cubiertas detríticas de laderas más o menos empinadas puede ser

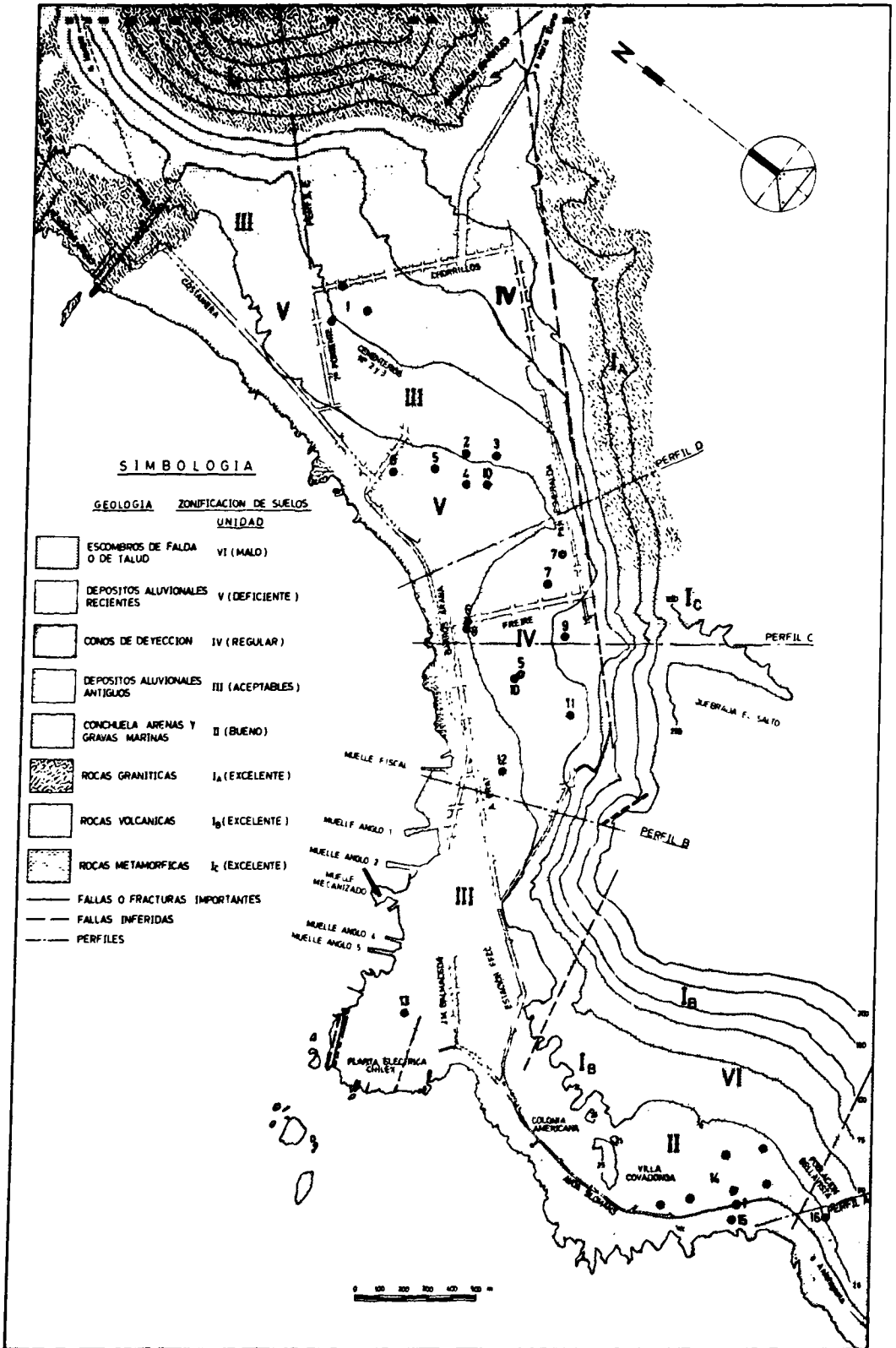


Fig. 4. Mapa geológico y de zonificación de suelos, Tocopilla.



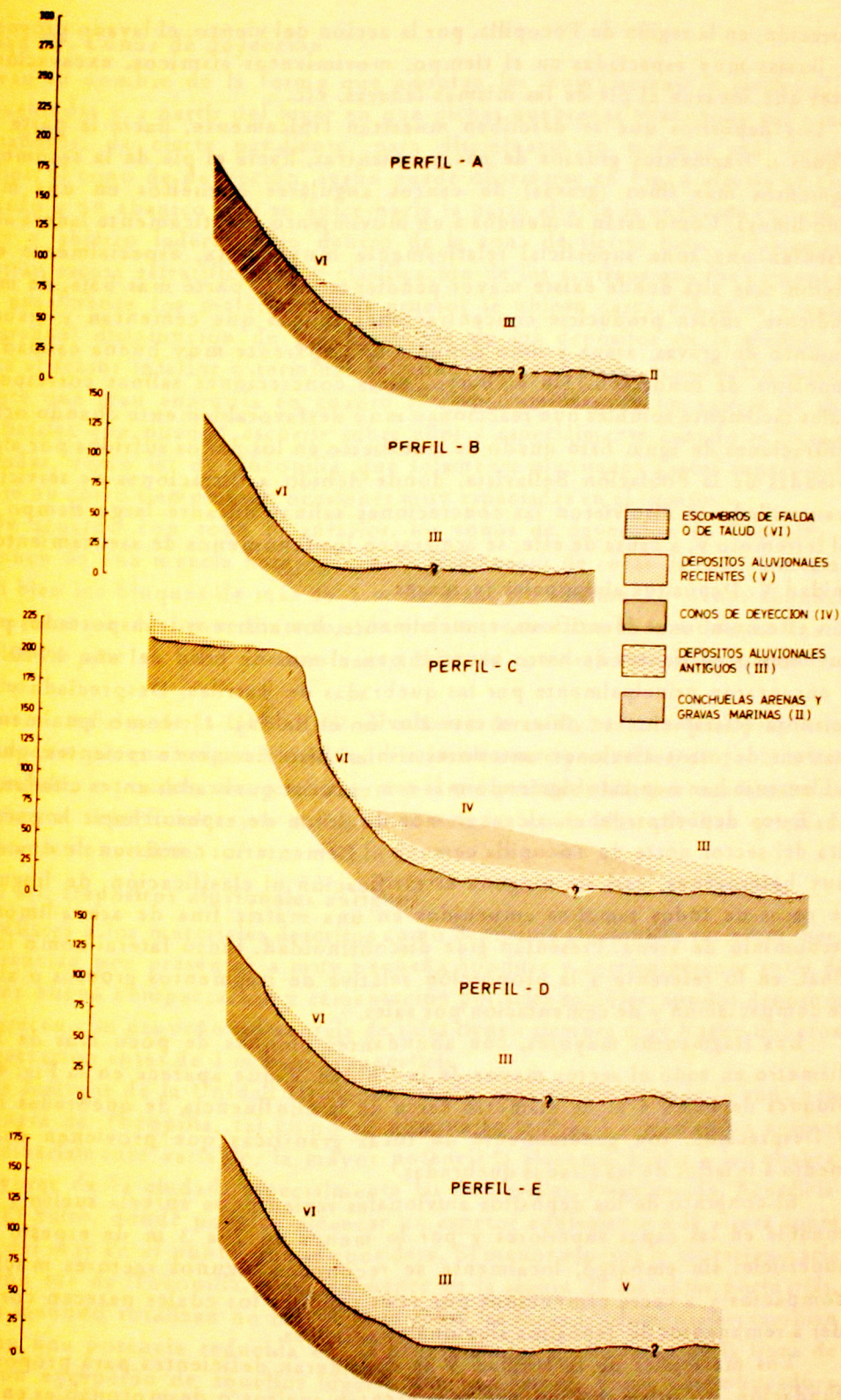


Fig. 5. Perfiles geológicos de Tocopilla.

favorecido, en la región de Tocopilla, por la acción del viento, el lavado provocado por lluvias muy espaciadas en el tiempo, movimientos sísmicos, excavación de cortes que socavan el pie de las mismas laderas, etc.

Los depósitos que se describen muestran típicamente, hacia la parte alta, bloques o fragmentos gruesos de rocas; mientras, hacia el pie de la escombrera, fragmentos más finos (gravas) de cantos angulares envueltos en una matriz areno-limosa. Como están sometidos a un movimiento prácticamente ladera abajo, presentan una zona superficial relativamente muy suelta, especialmente en la porción más alta donde existe mayor pendiente: en la parte más baja, de menor pendiente, suelen producirse concentraciones salinas que cementan y traban el conjunto de gravas, arena y limo dándole una aparente muy buena calidad para propósitos de fundación. Sin embargo, estas concreciones salinas corresponden a sales fácilmente solubles que reaccionan muy desfavorablemente cuando ocurren infiltraciones de agua. Esto quedó de manifiesto en los daños sufridos por algunas viviendas de la Población Bellavista, donde debido a filtraciones de servicios de alcantarillado se disolvieron las concreciones salinas durante largo tiempo antes del terremoto y, a causa de éste, se aceleraron los fenómenos de asentamientos.

#### Unidad V. Depósitos aluvionales recientes

Con este nombre se identifican, esencialmente, los acarrees transportados por los aluviones o corrientes de barro ocurridos en el mes de julio del año 1940 y que se encauzaron principalmente por las quebradas de Barriles, Despreciada y Beneficiadora (claramente se observa este aluvión en la Fig. 1); como igualmente los acarrees de otros aluviones, anteriores si bien históricamente recientes, que probablemente han ocurrido siguiendo más o menos las quebradas antes citadas.

Estos depósitos deben alcanzar más de 15 m de espesor hacia la parte más alta del sector norte de Tocopilla cercano al Cementerio; consisten de una mezcla muy heterogénea, casi sin ninguna estratificación ni clasificación, de fragmentos de rocas de todos tamaños embebidos en una matriz fina de arena-limosa con predominio de arena. Presentan gran discontinuidad, tanto lateral como longitudinal, en lo referente a la proporción relativa de fragmentos gruesos o al grado de compactación y de cementación por sales.

Los fragmentos mayores, con abundantes bloques de poco más de 1 m de diámetro en todo el sector mayor de la Unidad V que aparece en la Fig. 4 y con bloques de hasta 4 m de diámetro cerca de la confluencia de quebradas Barriles y Despreciada, son generalmente de rocas graníticas que provienen del curso medio a inferior de las citadas quebradas.

El conjunto de los depósitos aluvionales recientes se aprecia suelto y desmoronable en las capas superiores y por lo menos en 2 a 3 m de espesor bajo la superficie; sin embargo, localmente se reconocen algunos sectores mucho más compactos y a veces cementados por sales solubles los cuales parecen corresponder a remanentes de depósitos aluvionales antiguos.

Los materiales de la Unidad V se consideran deficientes para propósitos de fundación, no solamente porque se presentan sueltos o desmoronables en los primeros 2 a 3 m de espesor, sino también por su tendencia a ser movilizados hacia el mar en caso de ocurrir nuevos aluviones o corrientes de barro en Tocopilla.

#### Unidad IV. Conos de deyección

Derivan su nombre de la forma que adoptan las acumulaciones naturales al pie de quebradas y a partir del lugar en que dichas quebradas abandonan sus cauces montañosos, de cierta pendiente, para diseminarse en terrenos más bajos y amplios; el cono de deyección, según puede observarse en Fig. 4 semeja un cono acostado o un abanico con su ápice hacia la parte alta de la quebrada correspondiente y abierto ladera abajo dentro de la zona de tierras bajas. Típicamente muestran escasa estratificación y clasificación de los acarreos que los componen, pero usualmente los materiales más gruesos se ubican cerca del ápice y existe una gradual disminución de granulometría de los depósitos en la medida del avance al sector inferior o terminal del cono: por otra parte, manifiestan corrientemente una gran anarquía en cuanto al emplazamiento de los cauces de agua superficiales que pueden escurrir sobre ellos y especialmente cuando se trata de quebradas, como las de Tocopilla, que solamente mantienen gastos superficiales durante un corto tiempo y en ocasiones muy espaciadas en el tiempo.

De acuerdo con todo lo anterior, los conos de deyección de Tocopilla se componen de una mezcla heterogénea de fragmentos de rocas de todos los tamaños, si bien los bloques de más de 1 m de diámetro son mucho menos abundantes que en caso de los sedimentos aluvionales, envueltos en una matriz fina de arena-limosa que se hace predominante hacia la zona terminal o de menos cota del cono.

Los materiales de la Unidad IV se estiman de calidad regular para propósitos de fundación porque exigen fundaciones relativamente profundas, de 1 a 2 m bajo la superficie, y pueden ser actuados, aun a esa profundidad, por ocasionales escurrimientos superficiales y/o subterráneos en las quebradas que han originado los conos de deyección.

#### Unidad III. Depósitos aluvionales antiguos

Son similares a los materiales descritos como depósitos aluvionales recientes, pero se diferencian por presentar a muy pequeña hondura y corrientemente antes de 1 m, una buena compactación y cementación por sales solubles; aun los depósitos que aparecen con pequeño porcentaje de sales tienen siempre muy buena trabazón y compactación antes de 1 m bajo la superficie.

Los acarreos de la Unidad III tienen amplia repartición en toda la zona baja o costanera de Tocopilla, tal como se observa en la Fig. 4 y poseen un espesor extraordinariamente variable, la mayor potencia la alcanzan frente a las quebradas mayores de la ciudad, especialmente las de Barriles, Despreciada, Beneficiadora y El Salto, donde podrían alcanzar un espesor equivalente a la altura sobre el nivel del mar en el punto que se considere. El menor espesor lo muestran hacia la porción sur de Tocopilla, principalmente en la región de las obras portuarias, donde a menudo totalizan no más de 3 m sobre las rocas fundamentales; también presentan una potencia reducida en las proximidades y a lo largo de la línea de costa, con excepción de aquellos lugares que han servido como desembocadura en el mar de las quebradas principales y donde pueden alcanzar varios metros por debajo del nivel del mar. Esta situación se aprecia inmediatamente al poniente del camino que conduce a la Empresa Pesqueras Unidas y en la parte que

dicho camino enfrenta la zona de operación sitio de CORVI (sector más al norte de la ciudad); aquí se reconocen 1 a 3 m de materiales aluvionales recientes y, bajo ellos, 4 a 5 m de materiales aluvionales antiguos bien compactados que a veces muestran alguna estratificación y clasificación, como también rodados de cierto grado de redondeamiento, que documentan el desarrollo de acumulaciones propiamente fluviales en un conjunto que es predominantemente aluvial.

Los depósitos aluvionales antiguos pueden describirse en forma generalizada como una mezcla de grava y gravilla envueltas en abundante matriz fina de arena-limosa, todo el conjunto apretado o compacto a contar de 0,50 a 1,00 m bajo la superficie y cementado corrientemente por sales solubles con predominio de sal común (NaCl). Hacia las cotas altas aumenta el contenido de grava, que es normalmente angulosa, y aparecen frecuentemente bloques o cantos de poco más de 1 m de diámetro; hacia las cotas altas usualmente disminuye, por otra parte, el porcentaje de concreciones salinas. En la medida del avance a las cotas bajas o en dirección del mar, se incrementa el contenido relativo de la fracción fina de arena-limosa y desaparecen prácticamente los bloques o cantos aunque siempre subsiste una proporción importante y muy variable de grava y gravilla, además aumenta la frecuencia de sectores intensamente concrecionados por sales.

Estos materiales se consideran de calidad aceptable como suelos de fundación porque son adecuados a no más de 1 a 1,50 m bajo la superficie, si bien exigen precauciones contra el efecto de disolución por infiltración de aguas y de ataques a los hormigones por la presencia corriente de sulfatos en los terrenos.

## Unidad II. Conchuela, arenas y gravas marinas

Los depósitos correspondientes se ubican en la región costera del límite sur de Tocopilla, aproximadamente entre la Colonia Americana y la Población Bellavista, alcanzando su mayor extensión frente a Caleta Boy en los terrenos destinados a la nueva Población Miramar.

Los sedimentos marinos consisten de una mezcla de arena y abundante conchuela e intercalaciones de gravas aplanadas y redondeadas típicamente por la acción abrasiva del flujo y reflujo del oleaje; es decir, estas intercalaciones se presentan corrientemente cerca de la línea costera actual. A veces, especialmente a cota de pocos metros sobre el nivel del mar, aparecen capas de hasta 2 m de espesor compuestas casi exclusivamente de fragmentos de conchas englobados en arena y todo el conjunto extraordinariamente bien cementado por sales del tipo de cloruro de sodio, presumiblemente la más abundante, carbonato de calcio y probablemente sulfatos, los fragmentos de conchas son esencialmente restos de gastrópodos y pelecípodos, son claramente recientes o cuaternarios y, por su grado de cementación, corresponden propiamente a coquinas que pueden definirse como calizas fragmentadas, porosas y friables, compuestas casi exclusivamente de conchas actuales o recientemente extinguidas, cementados por arena y sales a manera de una roca.

Los materiales de la Unidad II se extienden en una faja de unos 300 m de ancho entre la línea costera y no más allá de la cota de los 20 m sobre el nivel del mar; son de repartición irregular y en general no alcanzan un espesor mayor de 2 m, probablemente su potencia máxima es inferior a los 3 m. Entre el mar y la costa de 10 m suelen mostrar capas continuas de hasta 2 m de material tipo



coquina que se apoyan directamente sobre rocas fundamentales volcánicas de Unidad I B; entre 10 y 15 m sobre el nivel del mar son frecuentes las intercalaciones de capas delgadas de sedimentos aluvionales; y, entre las cotas de 15 a 20 m sobre el nivel del mar, estas intercalaciones son mucho más comunes y usualmente las capas con conchuela llevan un porcentaje importante de gravas angulosas; además, las capas de conchuela son corrientemente de no más de 0,20 m de espesor y de carácter lenticular ubicándose de 1 a 3 m bajo la superficie.

Un perfil generalizado de los sedimentos analizados es el siguiente para la región situada entre la línea costera y aproximadamente la cota de 15 m sobre el nivel del mar.

Entre 0,00 y 0,15 m, una cubierta superficial de gravas, arenas y limos sueltos y desmoronables.

Entre 0,15 y 2,00 m, conchuela comentada por arena y sales, a veces con intercalaciones de materiales aluvionales (en capas separadas de la conchuela) también cementadas por sales.

Todo el conjunto es bueno para fundaciones en el material cementado, a profundidad del orden de 1 m bajo la superficie, siempre que se impida la infiltración de agua y, se considere una potencial acción dañina de las sales sobre los hormigones.

## Sismicidad

El último terremoto importante en la región de Tocopilla es el que se analiza extensamente en este estudio.

De acuerdo a lo observado en el terreno, este terremoto no habría reactivado fallas existentes en la zona.

Pero, en la historia sísmica de Tocopilla se destaca claramente la catástrofe del 9 de mayo del año 1877 que afectó, con daños notables, prácticamente toda la provincia de Tarapacá y parte septentrional de la de Antofagasta. El área de movimientos muy intensos se extendió entre Tacna por el norte y la localidad costera de Paposo por el sur; el terremoto fue sentido entre Santa, en territorio peruano, hasta la ciudad chilena de Concepción, es decir, en una longitud de 3.200 km. Quedaron destruidas especialmente localidades situadas al pie occidental de la Cordillera de los Andes o borde oriental de la pampa, tales como Calama, Chiuchío, Pica y Tarapacá; hubo daños notables en las cercanías de Iquique (pueblo de la Noria) y grietas profundas en la costa a unos 130 km al norte de Tocopilla (caleta de Chanavaya); además, fue intensamente conmovida toda la región de la Pampa del Tamarugal e igualmente la zona costera de Iquique hasta Antofagasta. Según Brügger<sup>12</sup> el movimiento sísmico fue muy fuerte en Tocopilla y era difícil mantenerse en pie, cayendo mucha gente al suelo: pero, el mismo autor menciona que las destrucciones de casas habitación no serían muy graves y ello lo justifica porque consistían casi exclusivamente de madera.

Siempre de acuerdo con Brügger<sup>12</sup>, el terremoto del año 1877 habría activado los principales sistemas de fallas de las provincias de Tarapacá y Antofagasta, principalmente aquellas rumbo más o menos N-S y que sitúa en la costa y en los bordes occidental y oriental de las cordilleras de los Andes y de la Costa respectivamente. En esto se puede decir, siguiendo a Muñoz Cristi<sup>13</sup>, que el terre-

moto de Tarapacá del año 1877 correspondió a una conmoción muy profunda, de gran magnitud, y de allí la extensión de la zona afectada; es probable, por otra parte, que la destrucción notable de los pueblos andinos antes enumerados - especialmente Calama, Chiuchío y Pica - esté ligada mas propiamente a la existencia de suelos desfavorables y con aguas subterráneas próximas a la superficie que al activamiento de fallas.

### Mediciones de microvibraciones

No es el propósito, al hacer estas mediciones, estudiar una microrregionalización sísmica para la ciudad de Tocopilla. Solamente se ha querido estimar las características dinámicas del suelo de fundación clasificándolo según los criterios establecidos por K. Kanai y T. Tanaka<sup>2</sup>, quienes realizaron mediciones sistemáticas de microvibraciones en muchísimos lugares del Japón.

Si un sismógrafo con una ampliación de 1.000 está funcionando en un lugar cualquiera, registra continuamente los movimientos del suelo. Comúnmente, las amplitudes de los movimientos varían de 0,1 a 1,0 micrones, y el rango de sus períodos desde 0.05 a 0.1 hasta 1.0 a 2.0 segundos.

Tales vibraciones del suelo son llamadas microvibraciones (también se usa llamarlas microtemblores o "microtremors") y son causadas principalmente por perturbaciones artificiales como el tráfico, maquinarias industriales, viento, golpe de olas en la costa, etc. y por lo tanto sus amplitudes serán más grandes cuanto mayor sea el nivel de ruido del medio ambiente.

Las curvas de distribución de períodos de microvibraciones, que se llamarán en adelante histogramas de frecuencia, tienen formas muy similares a los histogramas de frecuencia de terremotos en el mismo lugar<sup>2</sup>. En general el período predominante en sismos está íntimamente ligado con la máxima frecuencia de períodos de microvibraciones. Aun más, en lugares en que la curva de distribución del período de microvibraciones tiene una sola punta, ésta coincide plenamente con el período predominante en el sismo. Por otra parte, en un lugar en el cual la curva de distribución de períodos de microvibraciones tiene más de dos puntas, el período predominante de los sismos toma usualmente cualquiera de ellas y a veces muchas de ellas.

Los histogramas de frecuencia de microvibraciones, muestran una forma definida según sea el tipo de subsuelo y pueden ser clasificados en tres grandes grupos: grupo 1, curvas que muestran una punta aguda; grupo 2, curvas que tienen varias puntas; grupo 3, curvas planas.

### Clasificación de los suelos según Kanai

Kanai hace dos proposiciones para la clasificación de suelos en base a microvibraciones. Ambas no son excluyentes sino complementarias.

**Primera proposición para la clasificación de suelos.** Se ha establecido que los períodos predominantes, medio y mayor, cambian sus valores muy levemente cuando son medidos en diversas circunstancias en un mismo lugar. Kanai propone utilizar los dos últimos nombrados, en una clasificación práctica, aun cuando sus significados físicos no están totalmente aclarados. Al mismo tiempo entrega un diagrama que se ha obtenido a través de mediciones y aplicando la teoría de

los errores. Tal diagrama que corresponde a la primera clasificación de suelos, se muestra en la Fig. 6. Los símbolos I, II, III y IV representan las clases de suelos del Building Code of Japan.

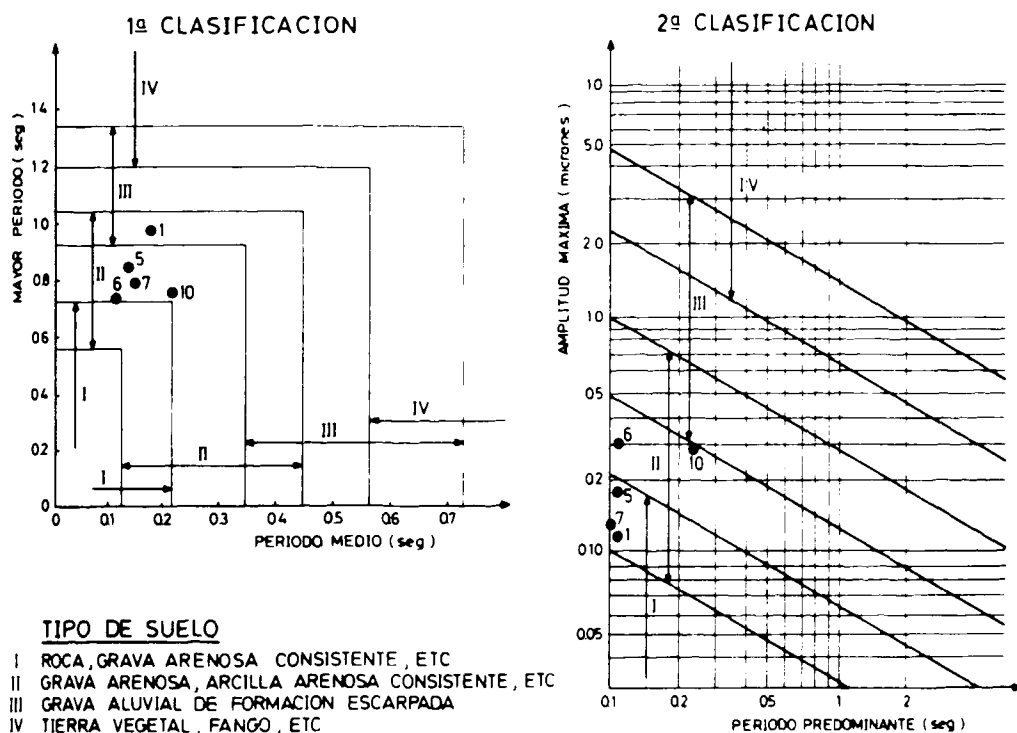


Fig. 6. Clasificación del suelo por medidas de microvibraciones según K. Kanai.

Segunda proposición para la clasificación de suelos. Se propone un segundo método, que debe considerarse auxiliar del primero, e incluye como factores la máxima amplitud obtenida y el período predominante. Nuevamente se entrega un diagrama obtenido con métodos semejantes a los de la primera clasificación. Este diagrama se muestra en la Fig. 6 y constituye la segunda proposición de Kanai para la clasificación de suelos. Los símbolos I, II, III y IV tienen el mismo significado anterior.

**Método de análisis de microtemblores**

Las grabaciones se efectuaron en papel previamente ahumado y con la amplificación necesaria para una velocidad de grabación de 1 cm/seg. R. Lástrico<sup>3</sup> ha estudiado varios métodos de análisis, proponiendo como el más conveniente, dentro de las limitaciones existentes, el de ampliar mediante un epidiascopio el trozo de grabación más representativo. Se copia la imagen proyectada, unas diez veces ampliada, y posteriormente se digitaliza de la siguiente manera: se traza una recta tal que deje por encima de sí la grabación y se mide la ordenada cada 0,02 seg. Los dígitos así obtenidos se perforan en tarjetas I.B.M., y se analizan con programas adecuados en el computador.

Tal es el método empleado aquí; la longitud de grabación que se analizó fue

de 10 s y el programa de computación utilizado es el confeccionado por R. Lás-trico<sup>3</sup>.

### Resultados obtenidos

Se analizaron solamente cinco mediciones de microvibraciones; sus ubicaciones pueden verse en la Fig. 4. La elección de estos puntos se hizo porque se conocían con certeza las características del suelo a través de pozos de reconocimiento excavados en esos lugares.

Los histogramas correspondientes pueden verse en las Figs. 7, 8, 9, 10 y 11. Los datos necesarios para las clasificaciones se han obtenido del análisis de las grabaciones mediante el computador, siendo ellos los que se dan en la Tabla I.

TABLA I  
DATOS OBTENIDOS DE LOS REGISTROS DE MICROTEMBLORES

Grabación N°	Período Predominante (seg)	Período Medio (seg)	Mayor Amplitud (micrones)	Mayor Período (seg)	% Períodos menores que 0,050 seg
1	0,1094	0,1844	0,1254	0,9734	18,95
5	0,1094	0,1422	0,1839	0,8359	29,36
6	0,1094	0,1137	0,3005	0,7343	30,38
7	0,0599	0,1473	0,1322	0,7991	19,83
10	0,2439	0,2250	0,2874	0,7616	13,92

En la Fig. 5 pueden verse los resultados de las clasificaciones, que también se dan en la Tabla II.

TABLA II  
CLASIFICACION DE LOS SUELOS A PARTIR DE MICROTEMBLORES

Grabación N°	Primera Clasificación de Kanai	Segunda Clasificación de Kanai
1	II - III	I - II
5	II	I - II
6	II	II
7	II	I - II
10	II	II

Si se comparan estas clasificaciones con el mapa geológico y zonificación de suelos, Fig. 4, se verá que coinciden plenamente, salvo el caso de la grabación 1 (Hostería) que discrepa un poco. Efectivamente, Kanai define el Grupo II como suelos de gravas arenosas, clasificables como diluviabiles o aluviales gravosos, y según se observa en la Fig. 4 estos suelos tienen estas formaciones geológicas y las mismas características.

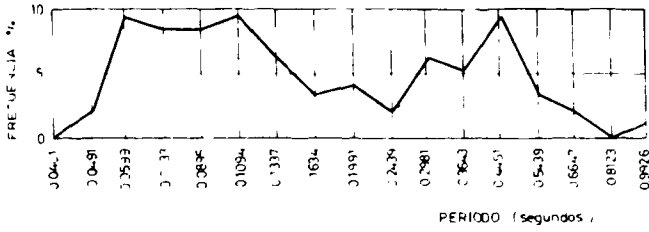


Fig. 7. Histograma Hostería. Grabación 1. Componente horizontal N-S.

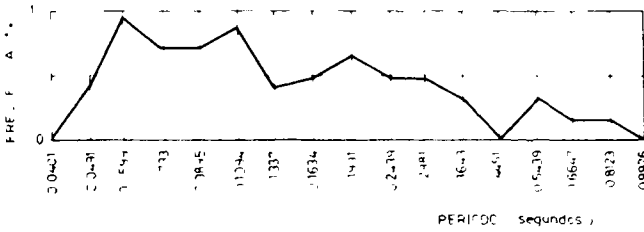


Fig. 8. Histograma edificio de Carabineros. Grabación 5. Componente horizontal E-W.

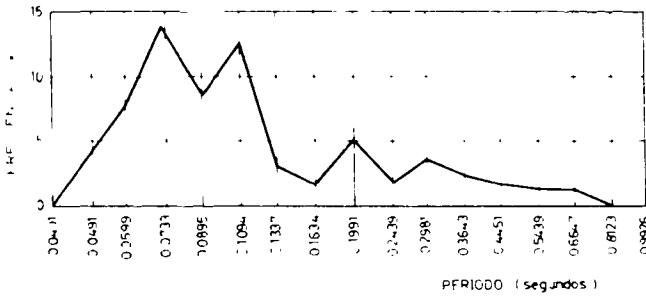


Fig. 9. Histograma edificio Corvi, manzana 3, Grabación 6. Componente horizontal N-S.

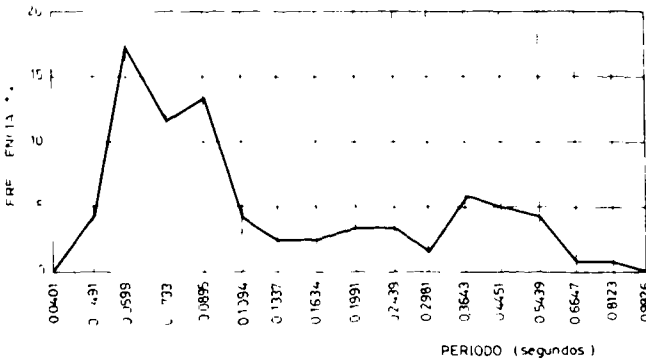


Fig. 10. Histograma proximidad de la población Santiago Amengual. Grabación 7. Componente horizontal E-W.

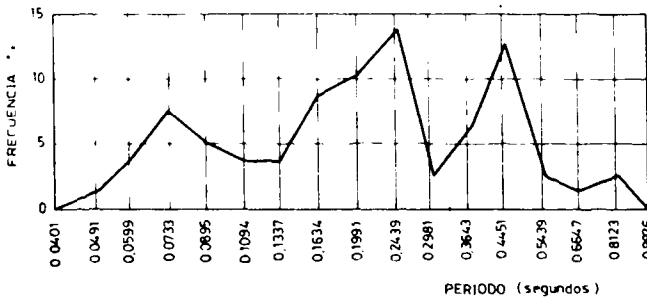


Fig. 11. Histograma edificio S.S.S. Grabación 10. Componente horizontal N-S.

En el caso de la grabación 1 (Hostería), la primera clasificación indica que este suelo corresponde a los grupos II - III, y la segunda clasificación lo clasifica como perteneciente a los grupos I - II. En realidad, en esta zona el suelo predominante es la roca que aflora en forma irregular, pero que de acuerdo a las exploraciones hechas indican que aparece en forma regular entre 2 a 3 metros de profundidad. Sobre la roca existen sedimentos marinos que consisten en una mezcla de arena, abundante conchuela e intercalaciones de gravas.

Posiblemente dos factores han influido en esta discrepancia: por un lado, la gran influencia del golpe de las olas ya que la ubicación de este punto dista unos 150 metros del mar; por otro lado, el relleno mencionado anteriormente.

## CARACTERISTICAS DEL SISMO EN TOCOPILLA

### Descripción del movimiento sísmico

El día 20 de diciembre de 1967 a las 10:25 horas local (2:25 GMT) se produjo un fuerte temblor que afectó en forma parcial el norte de Chile, siendo la ciudad de Tocopilla la más dañada.

El temblor sobrevino en forma brusca, con ruido subterráneo, causando bastante alarma y pánico. Los habitantes de esta ciudad sintieron el movimiento sísmico durante 60 segundos aproximadamente; difícilmente podían mantener el equilibrio, tanto dentro de sus viviendas como fuera de ellas. Sólo una muerte acaeció, la de un niño, y ella se produjo en la mañana del día siguiente debido al derrumbe de un muro de una vivienda.

Desde el 20 al 31 de diciembre de 1967 se observó un período de bastante actividad sísmica. Efectivamente, el nivel normal de temblores locales que se registran instrumentalmente en las estaciones sismológicas vecinas, alcanza a un promedio de 16 por día, y según se ve en la Tabla III este promedio se elevó notablemente durante el período señalado más arriba.

En la Tabla III se incluyen los datos del 18 y 19 de diciembre, y 1º, 2, 3, 4 y 5 de enero de 1968, como referencias del nivel normal de temblores. Cabe señalar que el día 27 de diciembre de 1967 se produjo un temblor fuerte de menor intensidad que aquel del 20 de diciembre (Información del Instituto de Geofísica y Sismología, Antofagasta, Universidad de Chile).

### Determinación del hipocentro

El United States Coast and Geodetic Survey (U.S.C.G.S.) dio como hora origen del temblor las 2 horas 25 min 21,6 seg  $\pm$  0,2 seg (GMT), y anunció para el hipocentro las siguientes coordenadas: *latitud* 21,85° S  $\pm$  4,7 km; *longitud*: 70.01° W  $\pm$  5,5 km; *profundidad normal foco*: 33 km, restringida; además fijó por *magnitud* 6,3 en la escala Richter.

Considerando estos datos, el epicentro estaría ubicado a unos 30 km al noreste de Tocopilla, Fig. 1.

En el instante de producirse el movimiento sísmico se encontraban en funcionamiento las siguientes estaciones sismológicas de la red de la provincia de

TABLA III  
REGISTRO DE TEMBLORES EN TOCOPILLA

Fecha	Número de Temblores
18-XII-1967	16
19-XII-1967	18
20-XII-1967	16
21-XII-1967	103
22-XII-1967	110
23-XII-1967	59
24-XII-1967	55
25-XII-1967	54
26-XII-1967	36
27-XII-1967	51
28-XII-1967	35
29-XII-1967	36
30-XII-1967	32
31-XII-1967	41
1- I -1968	23
2- I -1968	12
3- I -1968	14
4- I -1968	18
5- I -1968	17

Antofagasta: Antofagasta, Michilla y Calama. (Los sismógrafos restantes de Quillagua, Toconce y Salinas no funcionaron).

Basándose en la utilización de los sismogramas de estaciones ubicadas geográficamente cerca del epicentro, se determinó un nuevo hipocentro aplicando el programa de cálculo para computador digital confeccionado por el ingeniero señor Ricardo Olea M<sup>4</sup>.

La característica del modelo, hecho específicamente para la Zona Norte de Chile (Desierto de Atacama), que utiliza este programa es:

- Velocidad P en la corteza : 6,150 km/seg
- Velocidad P en el manto : 7,820 km/seg
- Velocidad S en la corteza : 3,550 km/seg
- Velocidad S en el manto : 4,520 km/seg
- Espesor de la corteza : 36 km en los 70,00° Longitud W  
y 22,50° Latitud S.
- Inclinación del moho : 11,5° E
- Rumbo de moho : N-S

Se disponía además de datos obtenidos de los sismogramas de Arequipa, La Paz, Peñas, Huancallo, Ñaña y Santiago.

En un primer intento, se utilizaron todos los datos; resultaron tiempos residuales muy altos, por lo cual se desechó el resultado de la ubicación del hipocentro así obtenido.

En un segundo intento, se utilizaron sólo los sismogramas de Antofagasta, Michilla, Calama y Arequipa, que son los puntos geográficos más cercanos a la

zona epicentral. Las coordenadas del hipocentro obtenidas de esta manera fueron: *latitud*: 22° 6' 47,2" S; *longitud*: 70° 29' 46,4" W; *profundidad del foco*: 62,3 km; *tiempo de origen*: 2 horas 25 min 22,9 seg (GMT).

En la Fig. 1 se puede observar la ubicación del epicentro 1, que queda a unos 28 km al oeste de la ciudad de Tocopilla. El hipocentro, en relación a Tocopilla, queda a 68 km aproximadamente.

Como son cuatro las variables que se buscan, utilizar sólo cuatro estaciones puede conducir a determinar erróneamente el hipocentro. De ahí que, en un tercer intento, se utilizaron los sismogramas de seis estaciones, Antofagasta, Michilla, Calama, Arequipa, La Paz y Peñas, y se fijó en 40 km la profundidad del foco. Las coordenadas de este nuevo hipocentro son: *latitud*: 21° 58' 34,0" S  $\pm$  7 km; *longitud*: 70° 26' 0,1" W  $\pm$  21 km; *profundidad del foco*: 40 km  $\pm$  2,47 km; *tiempo de origen*: 2 horas 25 min 22,0 seg  $\pm$  1,16 seg (GMT).

En la Fig. 1, se puede ver la ubicación de este nuevo epicentro 2, que queda a unos 25 km al N.O. de Tocopilla y que tomaremos como nuestra estimación definitiva.

Observaciones efectuadas en 1400 tumbas del cementerio, ubicado en el sector norte de la ciudad, arrojaron el siguiente resultado: 24 inclinadas y/o volcadas hacia el oeste; 62 inclinadas y/o volcadas hacia el norte; 5 inclinadas y/o volcadas hacia el sur-este, y 8 inclinadas y/o volcadas hacia el nor-este. Este resultado indica la existencia de dos direcciones preferenciales de volcamiento, norte y oeste, que pueden ser explicados por la ubicación del epicentro del sismo.

En un lugar ubicado a corta distancia del foco de un sismo se perciben principalmente dos tipos de ondas: ondas longitudinales (*P*) y ondas transversales (*S*). La velocidad de propagación de las ondas *P* es mayor que la de las ondas *S*, por lo que son percibidas en este orden. Normalmente las transversales tienen una mayor amplitud que las longitudinales (del orden de cinco veces).

De acuerdo a la posición relativa del cementerio y epicentro, las 24 tumbas inclinadas hacia el oeste deben haber sido afectadas por las ondas *P*, y las 62 tumbas inclinadas hacia el norte por las ondas *S*. La diferencia numérica de tumbas inclinadas se puede explicar por la mayor amplitud de las ondas *S* en relación a las ondas *P*.

## Estimación de la intensidad Escala MSK - 1964 en Tocopilla

### Generalidades

Para estimar la intensidad de este terremoto, se usará la *Escala MSK-64*, que es una versión mejorada de la *Escala Mercalli Modificada*, y cuya adopción ha sido recomendada universalmente por UNESCO. Sin embargo, si las dos escalas se utilizan adecuadamente deben indicar el mismo grado de intensidad para una misma localidad.

En la escala MSK-64, se utilizan varios indicios para señalar la intensidad del temblor, siendo la característica primordial el grado de daños en los edificios. La descripción de los efectos del temblor se hacen tomando en cuenta tres aspectos diferentes.

La percepción por los seres humanos y su ambiente.

Los efectos en edificios de cualquier tipo.



Los efectos en el subsuelo y alteraciones del agua subterránea y sistemas de aguas superficiales.

En el Apéndice 1, se expone la *Escala MSK-64* completamente y se dan más antecedentes sobre ella.

#### Zonificación de la ciudad de Tocopilla para el estudio de intensidades

La ciudad de Tocopilla se ha dividido en tres grandes zonas, considerando la semejanza de las estructuras en cada una de ellas, cuyas características se dan en los párrafos siguientes.

**Zona I.** En esta zona se encuentran principalmente las instalaciones de la Planta Eléctrica de la Chile-Exploration Co. (CHILEX), Sociedad Química y Minera de Chile (Ex Compañía Salitrera Anglo-Lautaro, C.S.A.L.), Estación de FF.CC. de El Toco - Tocopilla, y viviendas pertenecientes a estas dos compañías. Además, se encuentra la Población Bellavista; la Hostería y un pequeño balneario. (Caleta Boy).

Esta zona fue recorrida íntegramente y visitadas gran parte de sus instalaciones, de las cuales anotamos las observaciones más importantes a continuación.

La *Población Bellavista* es un grupo habitacional compuesto por 100 viviendas de un piso, formando unidades de 4 y 6 casas. Las viviendas están compuestas por muros exteriores de bloques huecos de 20 cm de espesor, refuerzos de pilares y cadenas, tabiques interiores de bloques de 10 cm, techo de losetas, sobrecimientos de bloques con armadura y cimientos continuos.

Las viviendas se clasificaron como Tipo C, según la clasificación de la escala *MSK-64*, y los daños que se observaron corresponden a la clase 2 de dicha escala.

En general, las grietas no tuvieron el carácter de grandes y profundas. Sin embargo, es menester dejar expresado que algunas viviendas sufrieron daños graves a causa de asentamientos diferenciales que se produjeron. Efectivamente, como el suelo de fundación contiene un alto porcentaje de sales solubles, el agua infiltrada las había disuelto y cuando sobrevino el sismo aceleró el fenómeno de asentamientos produciendo grietas de consideración. La Fig. 12 muestra daños típicos en esta población.

La *Hostería de Tocopilla* tiene estructura de hormigón armado de dos pisos.

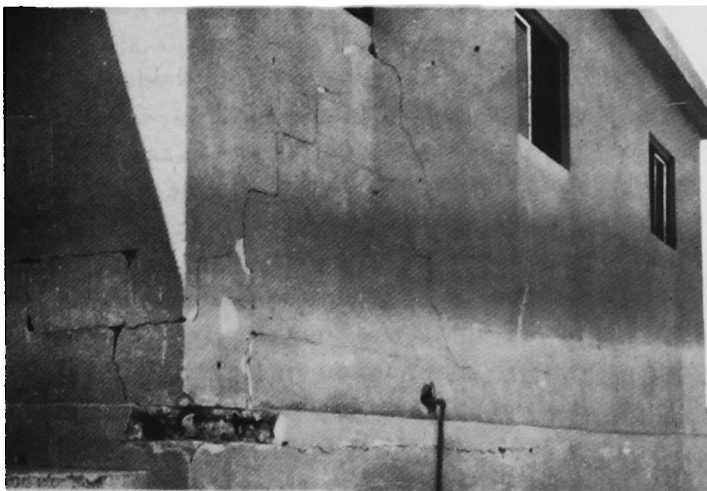


Fig. 12. Daños típicos en albañilerías de bloques. Población Bellavista.

De acuerdo a la escala MSK, no corresponde incluirla por ser estructura antisísmica. Sin embargo, se investigaron minuciosamente sus daños y se consideraron los efectos sobre las personas que allí habitan. Se ha clasificado esta estructura en Tipo C, pero para este estudio se la considera como un antecedente más.

En las *viviendas de la CHILEX* según informaciones obtenidas del Superintendente de la planta de la Compañía y de algunos moradores de ellas, prácticamente no hubo daños en sus estructuras. Se consideraron todos los efectos sobre las personas y los objetos.

Se trata de viviendas muy bien construidas; están formadas por: muros exteriores de paneles de madera con diagonales y pies derechos cubiertos con metal desplegado y estucados por el exterior, y con planchas de yeso por el interior; tabiques interiores hechos de planchas de yeso, cielos de planchas de yeso; tijerales de madera; techo de asbesto-cemento; piso de material plástico; radier de hormigón con mallas de refuerzo.

Las estructuras se clasificaron en Tipo C.

En las *viviendas de la C.S.A.L.* se distinguen dos clases. Una, cuya estructura es de madera, revestida en su exterior por calaminas y tablas en el interior, tabiques interiores de madera. La otra, cuya estructura está compuesta por muros exteriores de bloques huecos, tabiques interiores de bloques, losa entre el primer y segundo piso, pilares y cadenas de refuerzo.

Las dos clases de viviendas se clasificaron en Tipo C. En las primeras viviendas sólo se consideraron los efectos sobre personas y objetos, ya que daños en las estructuras no se observaron. En las segundas, las grietas no van más allá de la Clase 2.

**Zona II.** A esta zona se le prestó mayor atención debido a que es la más densa en viviendas y habitantes. Corresponde esta zona al centro de la ciudad y en ella se encuentran las casas comerciales, todos los servicios públicos y privados, edificios mayores de dos pisos y viviendas de diversas categorías. En consecuencia, se estimó que aplicar la encuesta de intensidad sísmica a toda esta zona falsearía finalmente el grado de intensidad, si no se tiene en cuenta la distribución recién señalada de los edificios.

En consecuencia se adoptó el procedimiento de recorrer manzana por manzana esta zona y elegir algunas de ellas tratando de abarcar un buen número de viviendas que fueran representativas de esta zona.

Se excluyeron todos los edificios de servicios públicos, los edificios mayores de 2 pisos y las casas comerciales. Cabe hacer notar, sin embargo, que la mayoría de ellos fueron visitados y aquellos cuyas estructuras eran de buena calidad (hormigón armado) fueron encuestados minuciosamente con el fin de estudiarlos especialmente e incluirlos en el catastro de daños. También se excluyeron todas las viviendas agrupadas en poblaciones, ya que en forma separada se hizo una encuesta a cada una de estas estructuras con el fin de repararlas posteriormente.

Ahora bien, este programa se elaboró considerando una primera encuesta que el Gobierno ordenó efectuar en toda la ciudad con el fin de avaluar "grosso modo" los daños y conocer así los auxilios que se prestarían a los damnificados. Ella estaba especialmente dirigida hacia aquellas viviendas cuyos propietarios son empleados u obreros y cuyos recursos son bajos.

Con el fin de seguir un orden en las encuestas, se enumerarán y se mencionarán los datos obtenidos en ellas.

*Primera encuesta.* Esta encuesta contó con la participación de 16 profesionales entre arquitectos, constructores civiles y técnicos en construcción. Ella considera los materiales ocupados en las viviendas y en forma porcentual los daños ocurridos.

Contabilizando 600 viviendas de esta zona se concluyó que:

- a) El 73,5 % de ellas corresponde a estructuras de madera cuyos muros están rellenos con hormigón de baja dosificación llevando en su interior una especie de malla de alambre. La tabiquería interior es generalmente de madera o hecha por el mismo sistema mencionado anteriormente.
- b) El 14,5 % de ellas son completamente de madera.
- c) El 12 % de ellas están hechas de bloques huecos con refuerzos de hormigón armado. En algunos casos tabiquería interior de madera. Esta conclusión, más la observación hecha en el terreno a las viviendas, permitió clasificar las estructuras en Tipo B.

Los mayores daños en toda la ciudad se produjeron en el sector comprendido por las calles Guillermo Matta y Sucre, más o menos entre las calles Colón y Santa Rosa.

*Segunda encuesta.* Esta encuesta se aplicó de acuerdo al programa anteriormente mencionado. De ella se han deducido todos los efectos del sismo sobre las personas, objetos y estructuras.

*Tercera encuesta.* Esta encuesta sólo se refiere a las viviendas agrupadas en poblaciones y que están destinadas a ser reparadas; describen todos los daños de la estructura en forma bien precisa.

Ella ha permitido clasificar el tipo de vivienda y la clase de daños producidos:

- a) *Población Santiago Amengual.* Construída en el año 1962, consta de 24 viviendas pareadas.

Son casas de dos pisos, con muros soportantes de bloques huecos de 20 x 20 x 40 cm y tabiques interiores de bloques de 10 cm, losa entre el primero y segundo piso, pilares, cadenas y vigas de refuerzo, cubierta de asbesto-cemento sobre tijerales de madera.

La estructura de ellas es de Tipo C. Se produjeron daños Clase 1 en la mayoría, Clase 2 en la mayoría, Clase 3 en muchas y Clase 4 en algunas.

En las Figs. 13 y 14 se ven algunos de los daños producidos.

- b) *Población Rafael Sotomayor.* Construída en 1961, consta de 36 viviendas.

Son casas de un piso, formada por dos cuerpos, muros exteriores de bloques huecos de 20 x 15 x 40 cm, cadenas de refuerzo y pocos pilares, tabiques interiores de bloques de 10 cm, techumbre de asbesto-cemento sobre viguetas de acero.

La estructura de ellas es de Tipo B. Los daños fueron de Clase 1 en la mayoría, Clase 2 en la mayoría, Clase 3 en la mayoría y Clase 4 en muchas.

En las Figs. 15 a 18 se muestran viviendas dañadas de esta población.

- c) *Población O'Higgins.* Fue construída en 1946 y consta de 76 viviendas.

Son casas de un piso, muros exteriores de bloques huecos de 20 cm, pilares y cadenas de refuerzo, y tabiques de bloques de 10 cm, techumbre



Fig. 13. Población Santiago Amengual. Daños característicos en una de las casas.



Fig. 14. Población Santiago Amengual. Grieta profunda en sobrecimiento.

de asbesto-cemento apoyada sobre tijerales de madera. Algunas casas tienen subterráneo.

La estructura de ellas se clasificó como de Tipo B. Se detectaron daños de Clase 1 en la mayoría, Clase 2 en la mayoría, Clase 3 en muchas y Clase 4 en algunas.

d) *Población Domingo Latrille*. Se construyó en 1948 y está formada por 72 viviendas pareadas (de dos, cuatro y seis casas).

Son casas de dos pisos, muros soportantes de bloques huecos de 20 cm.

Fig. 15. Daños en la fachada de una casa de Población Rafael Sotomayor.

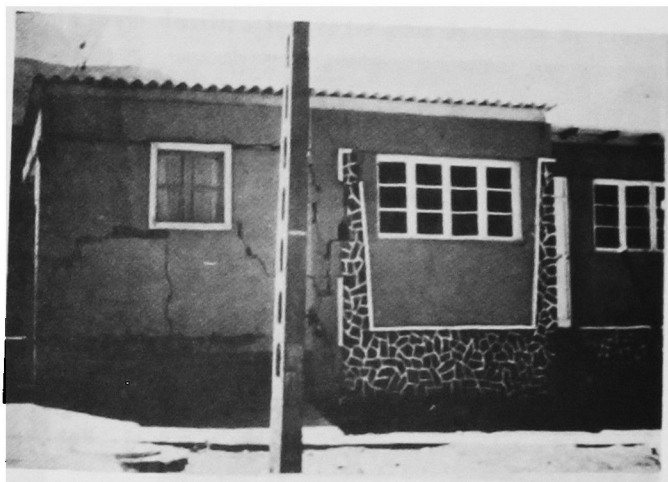
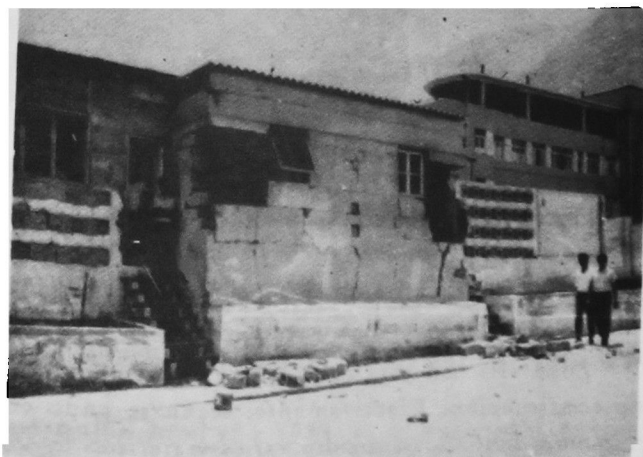
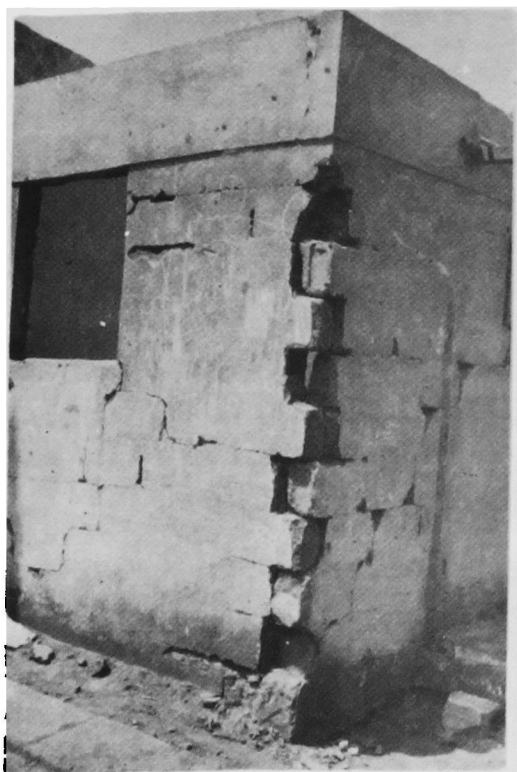


Fig. 16. Grietas en albañilería de bloques, Población Rafael Sotomayor.

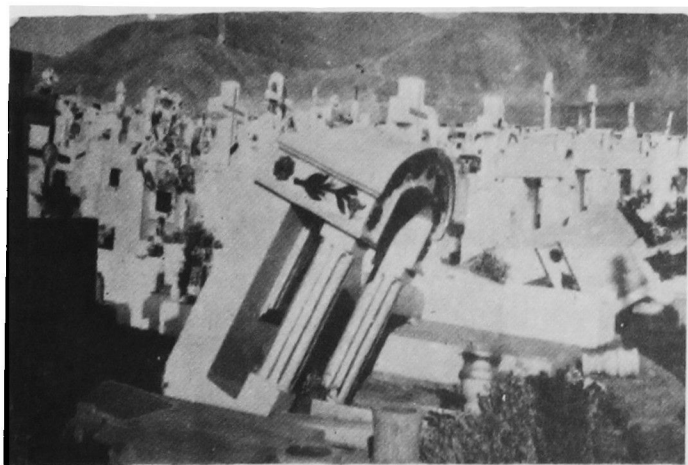


Fig. 17. Población Rafael Sotomayor. Daños característicos de una casa.





**Fig. 18. Vivienda dañada en demolición, Población Rafael Sotomayor.**



**Fig. 19. Cementerio. Capilla inclinada.**

pilares, cadenas y vigas de refuerzo, tabiques interiores de bloques de 10 cm, losa entre el primero y segundo piso, techumbre de asbesto-cemento apoyada sobre tijerales de madera.

Se clasificaron en el Tipo C. Los daños fueron de Clase 1 en la mayoría, Clase 2 en muchas y Clase 3 en algunas.

**Zona III.** En esta zona las viviendas no cumplen, en general, con las normas de construcción. Efectivamente, según se pudo constatar las casas son estructuralmente débiles, ocupando varios materiales de construcción como madera, cala-

minas y rellenos de concreto de baja dosificación entre pies derechos de muros exteriores.

De acuerdo a la escala MSK se clasificaron las viviendas en Tipo A.

Muchas de estas estructuras sufrieron daños severos y destructores, habiéndose producido separaciones de muros y derrumbes que dejaron casi inhabitable la vivienda. Se podría decir que algunas se desarmaron.

El cementerio que se encuentra en esta zona, fue visitado e incluso encuestado ya que se observó que muchas capillas (tumbas) y lápidas se volcaron e inclinaron, Fig. 19.

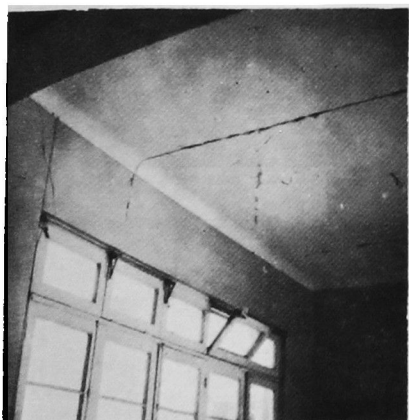


Fig. 20. Galería de unión entre bloques del Hospital.



Fig. 21. Marquesina en la terraza del Hospital.

*Otras observaciones.* Además de las poblaciones y viviendas que ya se han mencionado, se encuestaron con mucho detalle los daños de otros edificios y poblaciones. En esa operación se observaron y anotaron los daños de las estructuras inspeccionadas, según una metodología ideada por el ingeniero Santiago Arias S.; también se fotografiaron los elementos dañados que ofrecían más interés. Dentro de este grupo daremos información de algunos de los que aparecen más ilustrativos.

El edificio del Hospital, construido en el año 1939, es de hormigón armado, consta del bloque hospitalario, de tres pisos y un piso zócalo, y del bloque ad

ministrativo de tres pisos; ambos están unidos por galerías cubiertas. En las Figs. 20 a 23 se muestran los daños más importantes que experimentó el Hospital.



Fig. 22. Daños en un pilar extremo de la marquesina del Hospital.



Fig. 23. Grieta en la marquesina del Hospital.

Los edificios de departamentos de Carabineros de Chile son de cuatro pisos, de hormigón armado, Fig. 24. En ellos se produjeron grietas en las juntas de hormigonado, como se ve en las Figs. 25 y 26.

En los edificios del Servicio de Seguro Social, que están formados por dos cuerpos de cuatro pisos y uno de cinco, de hormigón armado, no hubo daños en las partes estructurales; pero sí, en los tabiques, en los balcones y en las once





Fig. 24. Edificios de departamentos de Carabineros de Chile. Se observan las grietas en las juntas de construcción.

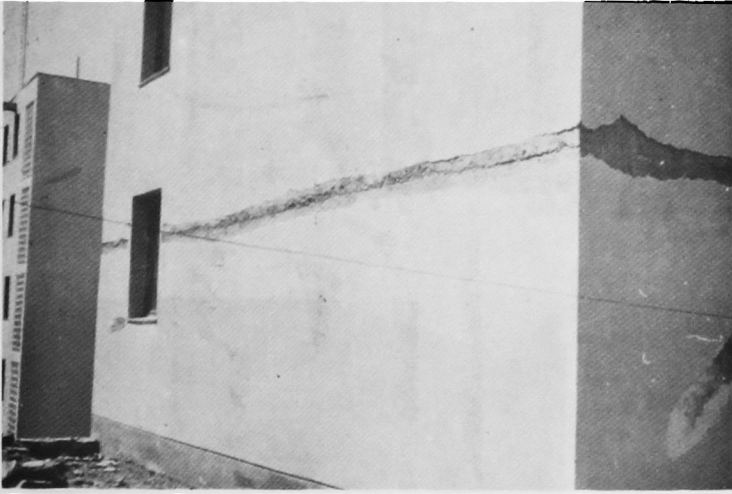


Fig. 25. Detalle de grieta en junta de hormigonado. Edificio de Carabineros.

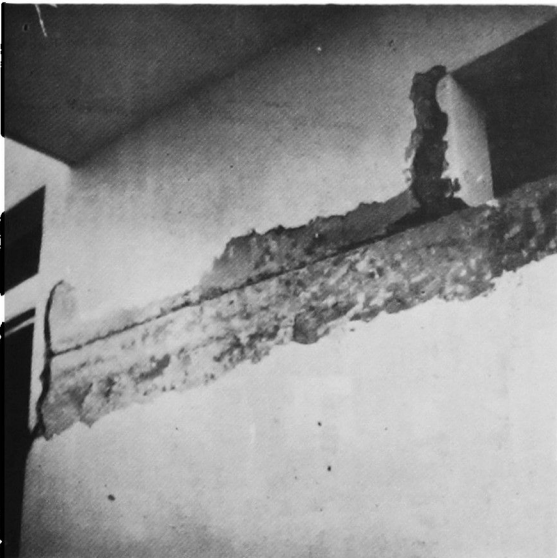


Fig. 26. Detalle de grieta en junta de hormigonado. Edificio de Carabineros.

chimeneas de los incineradores, que se cizallaron en su base como se ve respecto de una de ellas en la Fig. 27.

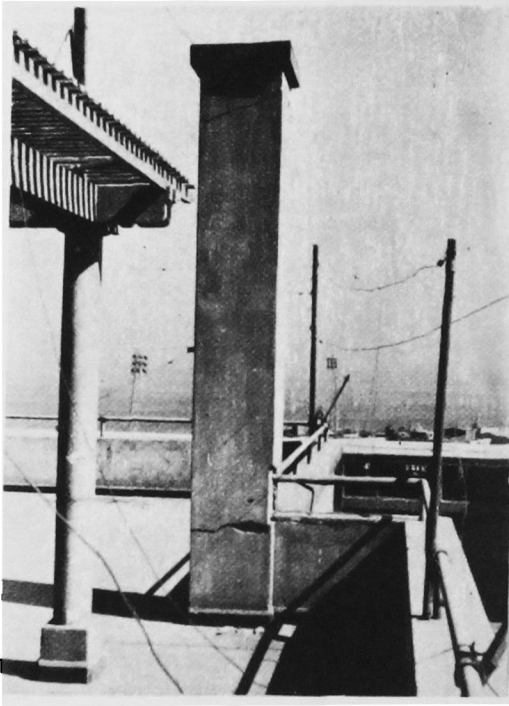
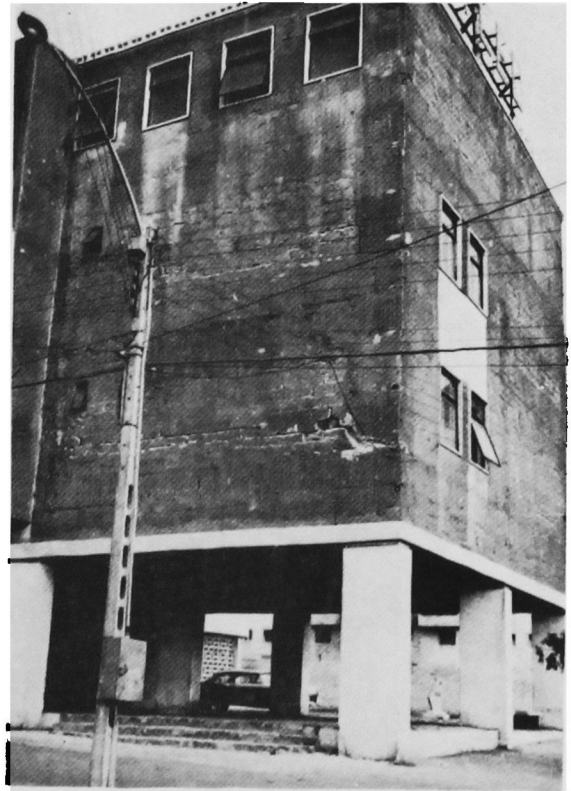


Fig. 27. Grieta en la base de la chimenea de un incinerador. Edificio del Servicio de Seguro Social.

Fig. 28. Cuerpo A del Liceo Coeducacional.



El Liceo Co-educacional consta de tres cuerpos, dos de ellos de 4 pisos y el otro de 3. Es de hormigón armado con gran número de muros de bloques macizos. Fue construido en 1960. Hay una caja de escalas en el cuerpo de tres pisos que está coronada, a la altura del techo, por un estanque de agua. Sobre la losa del techo, en los tres cuerpos, había una sobrecarga de  $750 \text{ kg/m}^2$  constituida por dos capas de bloques huecos que cumplían la función de aislantes térmicos. En las Figs. 28 a 34 se muestran los efectos más destacados que el terremoto produjo en el Liceo.

Fig. 29. Liceo Coeducacional.



Fig. 30. Caja de escaleras y estanque de agua potable del Liceo Coeducacional.



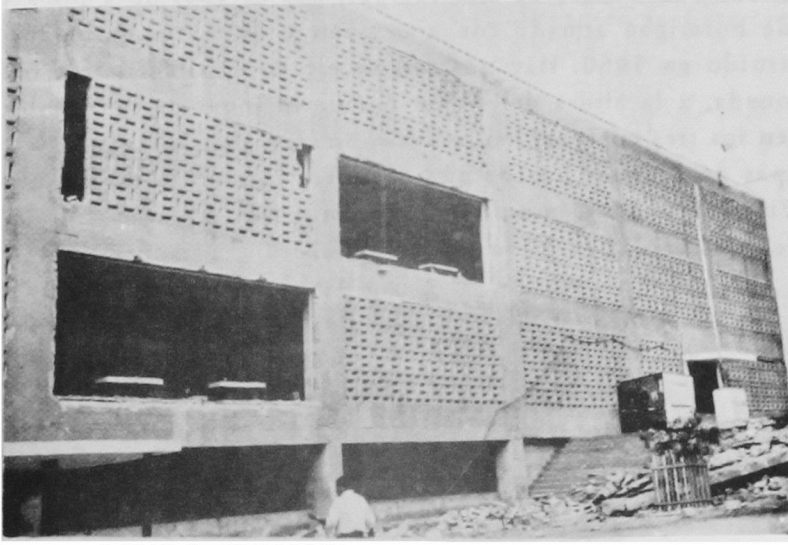


Fig. 31. Vaciado de muros ornamentales. Liceo Coeducacional.

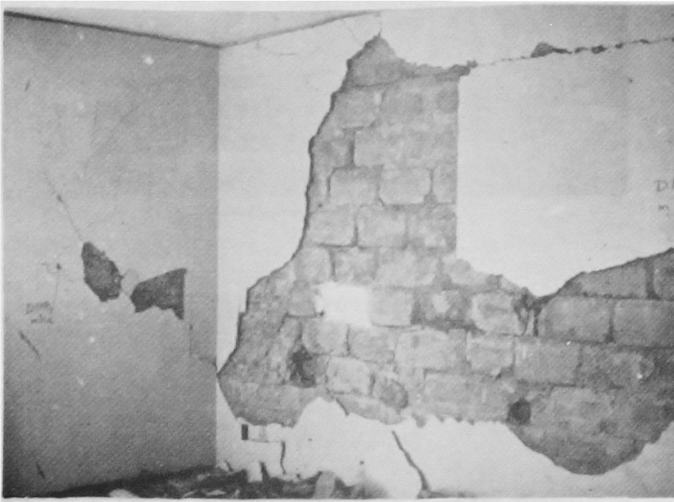


Fig. 32. Daños en un muro interior del cuerpo A. Liceo Coeducacional.



Fig. 33. Corredor de tercer piso. Liceo Coeducacional.

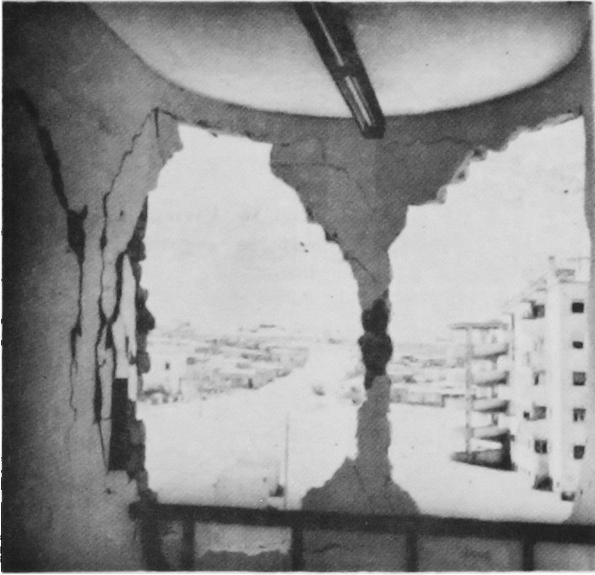


Fig. 34. Vaciado de los bloques de la caja de escaleras, vista desde el interior del Liceo Coeducacional.

Por último, en Fig. 35 se muestra una construcción de dos pisos con los muchos daños que le infirió el sismo y en la Fig. 36 se aprecia la estructura de su segundo piso, que queda a la vista por haberse demolido los muros, y que es representativa de un sistema constructivo que se repite bastante en Tocopilla.

#### Resultados

Las intensidades del terremoto en la ciudad de Tocopilla se han establecido tomando en cuenta los daños en las estructuras y los efectos sobre las personas y objetos; pero, además, se tuvieron presente todos los antecedentes relacionados con la formación geológica de los suelos y sus características obtenidas a través de exploraciones y ensayos de laboratorios.



Fig. 35. Vivienda dañada por el sismo.

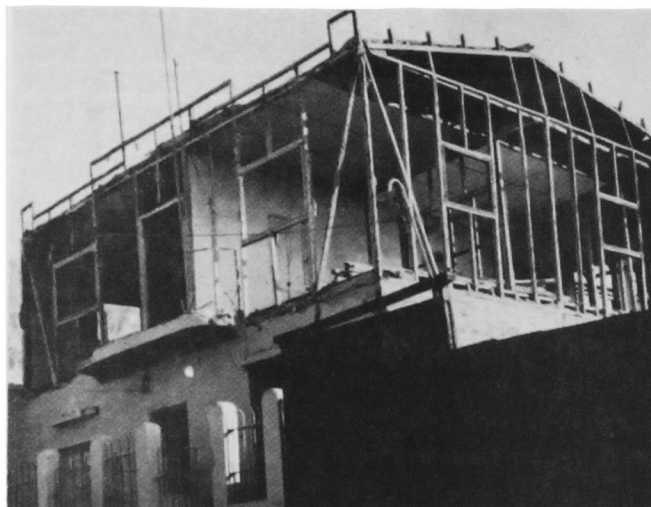


Fig. 36. Vivienda de la Fig. 35 con su segundo piso demolido.

Después de analizar exhaustivamente los daños se llegó a una distribución de intensidades que se muestra en la Fig. 37. Ellas fluctúan entre los grados VII y VIII de la *Escala MSK*. Si comparamos la Fig. 37 con la 4 se ve que la intensidad aumenta hacia el sector norte de la ciudad, alcanzando los mayores valores en aquellas zonas en que el suelo es o de formación aluvial o del tipo de conos de deyección. Este hecho comprueba una vez más que el mayor número de daños se produce en aquellos suelos cuyas compacidades son bajas.

Cabe hacer notar que se produjeron mayores daños en las periferias de los conos de deyección, y cerca de los contactos entre los materiales aluviales antiguos y recientes.

### CONCLUSIONES

Los resultados del estudio de este terremoto han permitido obtener conclusiones que puedan resumirse como sigue:

- 1) El epicentro del terremoto del 20 de diciembre de 1967 estuvo ubicado a unos 25 km al N.O. de la ciudad de Tocopilla. La magnitud en la escala Richter fue de 6,3 (U.S.C.G.S.).
- 2) La geología y la zonificación de suelos en Tocopilla permite dividirlos en varias unidades de acuerdo a su calidad como terrenos de fundación. Los mejores suelos se encuentran en el sector sur de la ciudad donde la roca aflora en varios lugares o se encuentra a poca profundidad de la superficie, y donde la existencia de conchuelas-arenas y gravas marinas se hallan fuertemente cementadas por sales. Hacia el sector central y norte de la ciudad, la calidad de los suelos empeora debido a su origen aluvial, sin embargo, en aquellas zonas donde los depósitos corresponden a aluviones antiguos, los suelos presentan buenas características de poder de soporte debido a la cementación por sales (esta cualidad es sólo aparente por cuanto las sales son solubles). Finalmente en aquellas zonas, especialmente hacia el norte de la ciudad,



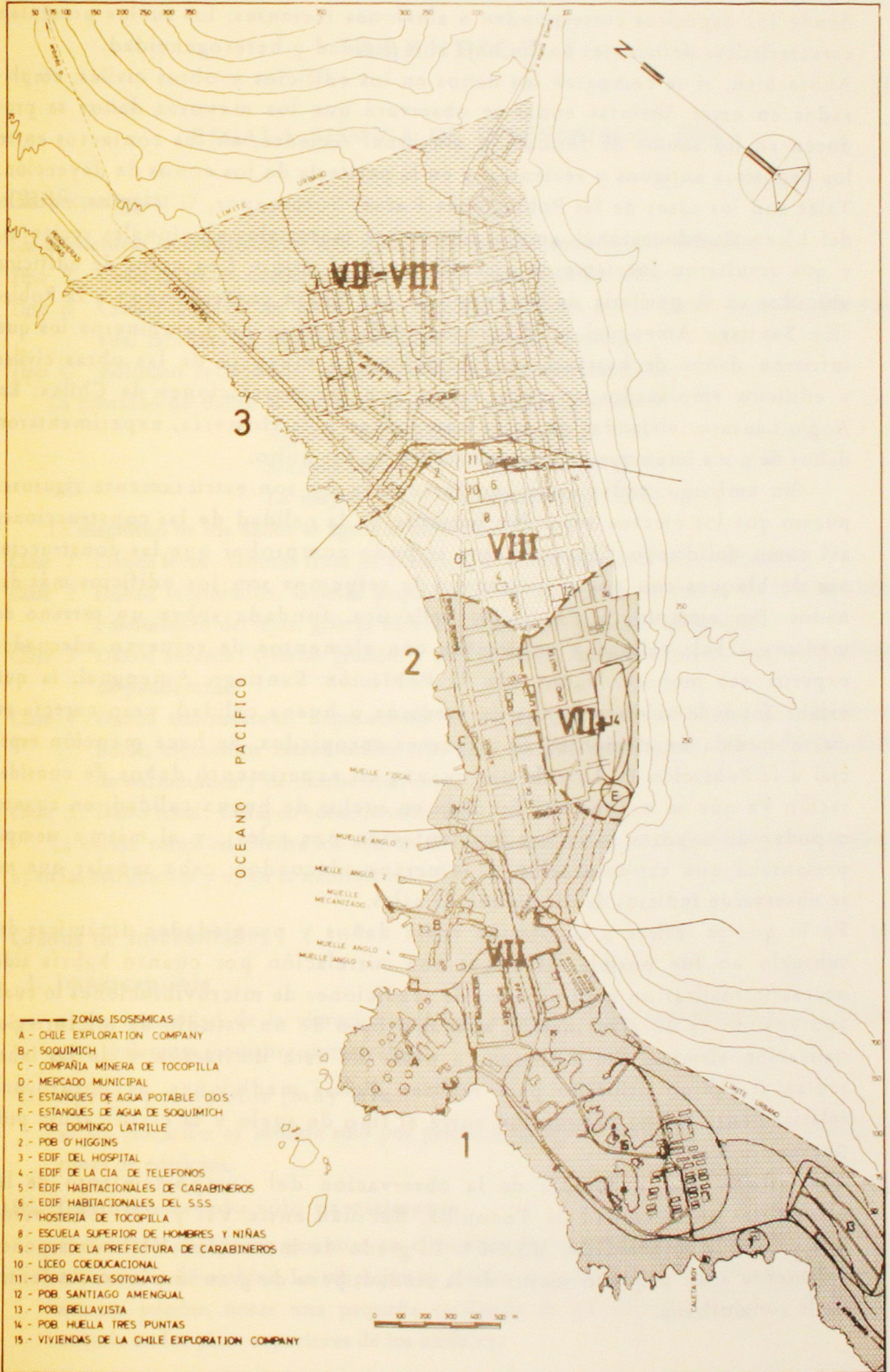


Fig. 37. Distribución de intensidades en la ciudad de Tocopilla.

donde los depósitos corresponden a aluviones recientes, los suelos presentan características deficientes por su baja compacidad y heterogeneidad.

- 3) Ahora bien, si se comparan los daños en los edificios y obras civiles, emplazados en estas distintas zonas se observará que los mayores daños se producen en los suelos de formación aluvional reciente, en los contactos entre los depósitos antiguos y recientes, y en la periferia de los conos de deyección. Tales son los casos de las Poblaciones Rafael Sotomayor, O'Higgins, edificio del Liceo Co-educacional, emplazados sobre materiales aluvionales recientes, y que resultaron fuertemente afectados por el sismo. Los casos de edificios ubicados en la periferia de los conos de deyección corresponden a la Población Santiago Amengual y edificio de la Prefectura de Carabineros los que sufrieron daños de bastante consideración. La mayoría de las obras civiles y edificios emplazados en roca, como son las instalaciones de Chilex, Ex Anglo-Lautaro, viviendas de estas compañías y la Hostería, experimentaron daños de poca importancia o simplemente no los hubo.

Sin embargo, todas estas comparaciones no son estrictamente rigurosas puesto que los efectos dependen bastante de la calidad de las construcciones así como del diseño. Especialmente se pudo comprobar que las construcciones de bloques con pocos elementos de refuerzos son los edificios más dañados. Por ejemplo, la Población Bellavista, fundada sobre un terreno de mediana a baja calidad y construida con elementos de refuerzo adecuados experimentó menores daños que la Población Santiago Amengual, la que estaba fundada sobre terrenos de mediana a buena calidad, pero carecía en cierta medida de elementos de refuerzos apropiados. Se hace mención especial a la Población D. Latrille por cuanto no experimentó daños de consideración ya que se encontraba fundada en suelos de buena calidad, en cuanto a poder de soporte se refiere (cementación por sales), y al mismo tiempo presentaba una estructuración y refuerzos adecuados; cabe señalar que no se observaron indicios de disolución de sales.

- 4) En lo que se refiere a la relación entre daños y propiedades dinámicas del subsuelo no fue posible establecer una correlación por cuanto habría sido necesario realizar un gran número de mediciones de microvibraciones lo cual, aun cuando es de gran interés, es más propio de un estudio de microrregionalización sísmica. Sin embargo, a pesar de esta limitación y de las inherentes al equipo utilizado para realizar dichas mediciones, se obtuvo una relativamente buena correlación entre el tipo de suelo y la clasificación propuesta por Kanai.
- 5) Las intensidades, deducidas de la observación del comportamiento de las estructuras en la ciudad de Tocopilla, fluctúan entre VII y VIII de acuerdo a la escala de Intensidades *MSK-64*. El grado de intensidad VIII corresponde solamente a un pequeño sector de la ciudad, pero de gran importancia dentro de la zona urbana.



## A P E N D I C E I

### ESCALA SISMICA DE INTENSIDADES MSK

#### Clasificaciones

Las estructuras se clasifican en tres tipos, excluyendo estructuras antisísmicas.

*Tipo A* Casas de pirca, construcciones rurales, casas de adobe o barro.

*Tipo B* Construcciones de ladrillo sin reforzar, edificios prefabricados y de bloques macizos, tabiquerías pesadas, edificios de piedra labrada.

*Tipo C* Edificios reforzados, estructuras de madera bien diseñadas.

La cantidad de daños se califican según los siguientes términos:

<i>Algunos, pocos (as)</i>	Alrededor de 5 %
<i>Muchos (as)</i>	Alrededor de 50 %
<i>La mayoría</i>	Alrededor de 75 %

La magnitud de los daños se agrupan en 5 clases.

*Clase 1* Daños leves. Grietas finas en el estuco, caída de pequeños trozos de estuco.

*Clase 2* Daños moderados. Grietas pequeñas en muros, caída de trozos mayores de estuco, corrimiento de tejas, grietas en chimeneas, caen partes de chimeneas.

*Clase 3* Daños severos. Grietas grandes y profundas en muros, caída de chimeneas y tabiques de panderetas.

*Clase 4* Daños destructores. Separaciones en muros, parte de los edificios pueden derrumbarse, elementos estructurales separados pierden su cohesión, derrumbe del relleno de entramados y de muros interiores.

*Clase 5* Daño total. Colapso total de edificios.

La escala toma en cuenta los efectos de los terremotos a) en las personas y su ambiente, b) en las estructuras y c) en la naturaleza.

#### Grados de intensidades

##### I. Imperceptible

a) La intensidad de la vibración está bajo el límite de perceptibilidad humana: el sismo sólo se detecta mediante sismógrafos.

##### II. Apenas perceptible (muy leve)

a) La vibración es sentida sólo por personas en reposo, especialmente en los pisos superiores de edificios.

##### III. Débil, observado sólo parcialmente

a) Sentido por pocas personas en el interior de los edificios; en el exterior sólo en circunstancias favorables. La vibración es similar al paso de un camión liviano. Observadores atentos pueden notar una pequeña oscilación de los objetos colgantes, un poco más notoria en los pisos superiores de los edificios.

##### IV. Observado por muchos

a) Sentido por muchas personas en el interior, por pocas en el exterior de los edificios.

Algunas personas despiertan, pero casi nadie se asusta. La vibración es similar al paso de un camión pesado. Vibración de puertas, ventanas y vajilla. Crujido de pisos y muros. Los muebles comienzan a balancear. Los objetos colgantes oscilan débilmente. Los líquidos en envase abierto se agitan levemente. El movimiento es perceptible dentro de los vehículos detenidos.

#### **V. Las personas despiertan**

a) Sentido por la mayoría en el interior, por muchas personas en el exterior. Muchas personas despiertan. Pocas arrancan al exterior. Los animales se inquietan. Los edificios vibran notoriamente. Objetos colgantes oscilan notablemente. Los cuadros chocan contra las paredes o se desvían de posición. Los relojes de péndulo se detienen ocasionalmente. Objetos inestables pueden volcarse o desplazarse. Puertas y ventanas abiertas se mueven y golpean. Los líquidos se derraman en pequeña cantidad de envases repletos. La vibración parece análoga a la producida por un objeto pesado que cayera dentro del edificio.

b) Pueden producirse daños leves (Clase 1) en algunos edificios de tipo A.

c) A veces se notan cambios en el flujo de las vertientes.

#### **VI. Las personas se asustan**

a) Sentido por la mayoría, tanto en el interior como en el exterior. Muchas personas se asustan en los edificios y arrancan hacia el exterior. Unos pocos pierden el equilibrio. Los animales domésticos arrancan de sus establos. En algunos casos puede quebrarse la vajilla y cristalería, y pueden caer libros. Es posible que los muebles pesados se muevan, y pueden sonar campanas pequeñas.

b) Daños de Clase 1 en algunos edificios de tipo B y en muchos de tipo A. Algunos edificios del tipo A sufren daños de Clase 2.

c) En algunos casos pueden presentarse grietas hasta de 1 cm de ancho en terrenos húmedos; deslizamientos ocasionales en regiones montañosas; se observan cambios en el flujo de las vertientes y en el nivel de agua de los pozos.

#### **VII. Daños en los edificios**

a) La mayoría de las personas se asusta y corre hacia el exterior. Muchas encuentran dificultad en sostenerse de pie. La vibración es sentida por personas manejando vehículos. Suenan incluso campanas grandes.

b) Se provocan daños de Clase 1 en muchos edificios de tipo C; daños de Clase 2 en muchos edificios de tipo B; daños de Clase 3 en muchos edificios de tipo A, y de Clase 4 en algunos de tipo A.

En casos aislados se producen deslizamientos en terraplenes con gran pendiente; grietas en las carreteras; daños en las uniones de tuberías; grietas en muros de piedra.

c) Se forman olas en la superficie del agua, y se enturbia debido al lodo del fondo. Cambios en el flujo de las vertientes y en el nivel de agua de los pozos. En algunos casos las vertientes dejan de correr, o vertientes secas vuelven a manar. En casos aislados se deslizan partes de riberas de arena o grava.

#### **VIII. Destrucción de edificios**

a) Susto y pánico; incluso los conductores de vehículos se perturban. Se quiebra una que otra rama y caen de los árboles. Se mueven incluso los muebles pesados, y algunos se vuelcan. Las lámparas colgantes se dañan parcialmente.

b) Muchos edificios de tipo C sufren daños de Clase 2, y algunos de Clase 3; muchos edificios de tipo B sufren daños de Clase 3, y algunos de Clase 4; muchos edificios de tipo A sufren daños de Clase 4, y algunos de Clase 5. Rotura ocasional de las uniones de tuberías. Los monumentos y estatuas se mueven y giran. Las lápidas se vuelcan y caen. Muros de piedra se derrumban.

c) Derrumbes pequeños en cuevas y terraplenes con pendiente fuerte; grietas en el terreno hasta de varios centímetros de ancho. Se enturbia el agua en los lagos. Aparecen nuevas lagunas. Las vertientes dejan de correr, y vertientes secas vuelven a manar. En muchos casos se producen cambios en el flujo y nivel de las aguas.

#### IX. Daños generales en edificios

a) Pánico general; daño considerable en los muebles. Los animales corren despavoridos y "gritan".

b) Muchos edificios de tipo C sufren daños de Clase 3, algunos de Clase 4; muchos edificios de tipo B sufren daños de Clase 4, algunos de Clase 5; muchos edificios de tipo A sufren daños de Clase 5. Caen columnas y monumentos. Daños considerables en los estanques; las tuberías subterráneas se rompen parcialmente. En casos aislados se tuercen las líneas ferroviarias y se dañan las carreteras.

c) En terreno plano se observan comunmente inundaciones de agua, lodo y arena. Grietas en el terreno hasta de 10 cm, y aun mayores en riberas y pendientes; aparece gran cantidad de grietas menores en el terreno; desprendimiento de rocas, numerosos deslizamientos y escurrimientos de suelo; se observan grandes olas sobre el agua. Las vertientes dejan de correr, y vertientes secas vuelven a manar.

#### X. Destrucción general de edificios

b) Muchos edificios de tipo C sufren daños de Clase 4, algunos de Clase 5; muchos edificios de tipo B muestran daños de Clase 5; la mayoría de los edificios tipo A sufren destrucción de Clase 5. Los diques y represas sufren daños críticos, y se observan daños severos en los puentes. Las líneas ferroviarias se tuercen levemente. Las tuberías subterráneas se quiebran o tuercen. Se observan ondulaciones en el pavimento de las carreteras.

c) Se observan grietas en el terreno de hasta varios dm, a veces hasta de 1 m de ancho. Se producen grietas anchas a lo largo de las riberas de los cursos de agua. El terreno suelto se desliza a lo largo de pendientes pronunciadas. Se pueden producir deslizamientos considerables en riberas y costas abruptas. Se producen cambios del nivel de agua en los pozos, en áreas costaneras desplazamientos de arena y lodo; el agua de los ríos, lagos, canales, etc. se derrama violentamente sobre el terreno vecino. Aparecen nuevos lagos.

#### XI. Catástrofe

b) Daños severos incluso en edificios bien construidos, puentes represas y líneas ferroviarias; las carreteras quedan inservibles, las tuberías subterráneas se destruyen.

c) Daños considerables en el terreno debido a grandes grietas y fisuras, como también a desplazamientos horizontales y verticales; numerosos derrumbes y desprendimiento de rocas.

#### XII. Cambios en el paisaje

b) Graves daños o destrucción de casi todas las estructuras ubicadas sobre o bajo el

nivel del suelo.

c) Cambia radicalmente la superficie del terreno. Se observan abundantes grietas en el terreno, acompañadas de extensos desplazamientos verticales y horizontales. Desprendimiento de rocas, y deslizamiento de las riberas sobre grandes extensiones; se producen "tacos" en los ríos; aparecen cascadas, y los ríos cambian de curso.

#### REFERENCIAS

1. TALLONI, P. y KARZULOVIC, J. *Estudio geotécnico del aluvión del año 1940 en Tocopilla*, Departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1968.
2. KANAI, K. y TANAKA, T. On microtremors. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, vol. 39, 1961.
3. LASTRICO, R. *Relación entre los daños en los terremotos de 1960 y los suelos de fundación de Valdivia*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, U. de Chile, 1967.
4. OLEA, R. *Determinación de hipocentros y su aplicación al estudio del Norte de Chile*. Publicación N° 43, Depto. de Geofísica y Geodesia, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, U. de Chile, 1967.
5. MEDVEDEV, S.; SPONHEUER, W.; y KARNIK, V. *Neue Seismische Skala*. Deutsch Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Heft 77, Akademie Verlag, Berlin, 1964.
6. *Seismic Intensity Scale MSK 1964 Instructions and Questionnaire*. Publication N° 48 of the Institut für Geodynamik, 69 Jena (DDR), Burweg 11, der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Forschungsgemeinschaft, 1967.
7. WLASS, CONSULTORES DE PLANIFICACION. *Estudio preinversional de desarrollo urbano-regional de Tocopilla*, Ministerio de la Vivienda y Urbanismo, 1968.
8. GARCIA, F. *Geología del Norte Grande de Chile*, Depto. de Geología, Universidad de Chile, Edición auspiciada por Empresa Nacional del Petróleo, 1967.
9. KLOHN, H.E. *Yacimientos de cobre y uranio en el distrito minero de Tocopilla*. Memoria de prueba para optar al título de Geólogo, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1961.
10. KNOWLES ET AL. *Exploración de minerales radioactivos en Chile. Primera Parte: Provincias de Tarapacá y Antofagasta*, Instituto de Investigaciones Geológicas, Publicación N° 18, 1964.
11. ALARCON Y VERGARA. *Nuevos antecedentes sobre la geología de la Quebrada El Way*. Depto. de Geología (ex-Instituto de Geología), Publicación N° 26, U. de Chile, 1964.
12. BRUGGEN, J. *Fundamentos de la geología de Chile*, Editorial Instituto Geográfico Militar, Santiago de Chile, 1950.
13. MUÑOZ CRISTI, J. *Sismología de Chile, en Geografía Económica de Chile*, Corporación de Fomento de la Producción, Tomo I, Santiago de Chile, 1950.

#### THE EARTHQUAKE OF DECEMBER 20th, 1967 IN TOCOPILLA, CHILE

##### SUMMARY:

*This earthquake is analysed in its main characteristics and in the damages produced upon the buildings. A distribution of seismic intensities in Tocopilla in the MSK 1964 scale is presented.*