

PODER EJECUTIVO NACIONAL
MINISTERIO DE OBRAS Y SERVICIOS PUBLICOS
SUBSECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS
INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCION SISMICA

**I
N
P
R
E
S**

- 1 - ANALISIS SISMOTECTONICO Y SU APLICACION A LA ESTIMACION DEL PELIGRO SISMICO
- 2 - EL SISMO DE TUCUMAN DEL 9 DE MAYO DE 1981

**PUBLICACION
TECNICA N° 7**

Octubre de 1981

REPUBLICA ARGENTINA

PODER EJECUTIVO NACIONAL
MINISTERIO DE OBRAS Y SERVICIOS PUBLICOS
SUBSECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS

INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCION SISMICA

I N P R E S

- I - ANALISIS SISMOTECTONICO Y SU APLICACION A LA ESTIMACION DEL PELIGRO SISMICO
- II - EL SISMO DE TUCUMAN DEL 9 DE MAYO DE 1981

PUBLICACION TECNICA N° 7

San Juan, octubre de 1981

DIRECTOR NACIONAL

ING. JULIO S. AGUIRRE RUIZ

En toda reproducción total o parcial de los artículos contenidos en esta publicación deberá citarse su procedencia y enviar copia al INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCIÓN SISMICA

PODER EJECUTIVO NACIONAL
MINISTERIO DE OBRAS Y SERVICIOS PUBLICOS
SUBSECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS

INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCION SISMICA
INPRES

ANALISIS SISMOTECTONICO Y SU APLICACION
A LA ESTIMACION DEL PELIGRO SISMICO

SAN JUAN, OCTUBRE DE 1981

I N D I C E

- RESUMEN.
1. INTRODUCCION.
 2. CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ACTIVIDAD SISMICA REGIONAL.
 3. RASGOS TECTONICOS Y MORFOLOGICOS.
 - 3.1. MARCO TECTONICO GENERAL.
 - 3.1.1. ZONA NORTE.
 - 3.1.3. ZONA CENTRAL.
 - a) AREA ORIENTAL.
 - b) AREA OCCIDENTAL.
 - 3.1.3. ZONA SUR.
 4. SISMICIDAD, TECTONICA Y VULCANISMO.
 - 4.1. HIPOCENTROS Y ESTRUCTURAS.
 - 4.1.1. ZONA NORTE.
 - 4.1.2. ZONA CENTRAL.
 - 4.1.3. ZONA SUR.
 - 4.2. TERREMOTOS DESTRUCTIVOS.
 - 4.3. VULCANISMO.
 5. AREAS SISMOTECTONICAS.
 - 5.1. ZONA NORTE.
 - 5.1.1. AREA DE LA PUNA.
 - 5.1.2. AREA DE SIERRAS SUBANDINAS.
 - 5.2. ZONA CENTRAL.
 - 5.2.1. AREA DE ATACAMA.
 - 5.2.2. AREA DE PIPANACO-GALAN.
 - 5.2.3. AREA DE TOCOPILLA-COPIAPO.
 - 5.3. ZONA SUR.
 - 5.3.1. AREA DE PRECORDILLERA.
 - 5.3.2. AREA DE COPIAPO-ILLAPEL.
 - 5.3.3. AREA SANTIAGO-VALPARAISO.
 - 5.3.4. AREA DE LAS SIERRAS DE CORDOBA Y SAN LUIS.
 - 5.3.5. AREA DE LA RIOJA Y CATAMARCA.
 - 5.3.6. AREA DE MENDOZA SUR.
 - 5.4. AREA PRECORDILLERA.
 6. CONCLUSIONES.
 7. LISTADO DE SISMOS DESTRUCTIVOS.
 8. BIBLIOGRAFIA.

ANALISIS SISMOTECTONICO Y SU APLICACION
A LA ESTIMACION DEL PELIGRO SISMICO

Por Juan C. CASTANO
Hugo E. BASTIAS

RESUMEN

Un análisis detallado de la actividad sísmica entre los 20 y 34 grados de latitud sur, muestra una falta de uniformidad en la distribución de dicha actividad, tanto en superficie como en profundidad. (Figura 1).

En un intento de relacionar esa falta de uniformidad con los grandes rasgos tectónicos y morfológicos, se han delimitado tres grandes zonas con características sismotectónicas diferentes.

En cada una de estas zonas se analizan los principales sistemas de fracturación y su posible relación con algunos de los siguientes aspectos: cambio de densidad epicentral, distribuciones hipocentrales, profundidades focales predominantes, presencia de volcanes activos y localización de los terremotos destructivos; distinguiéndose once áreas que, para la evaluación del riesgo sísmico, pueden considerarse como unidades independientes.

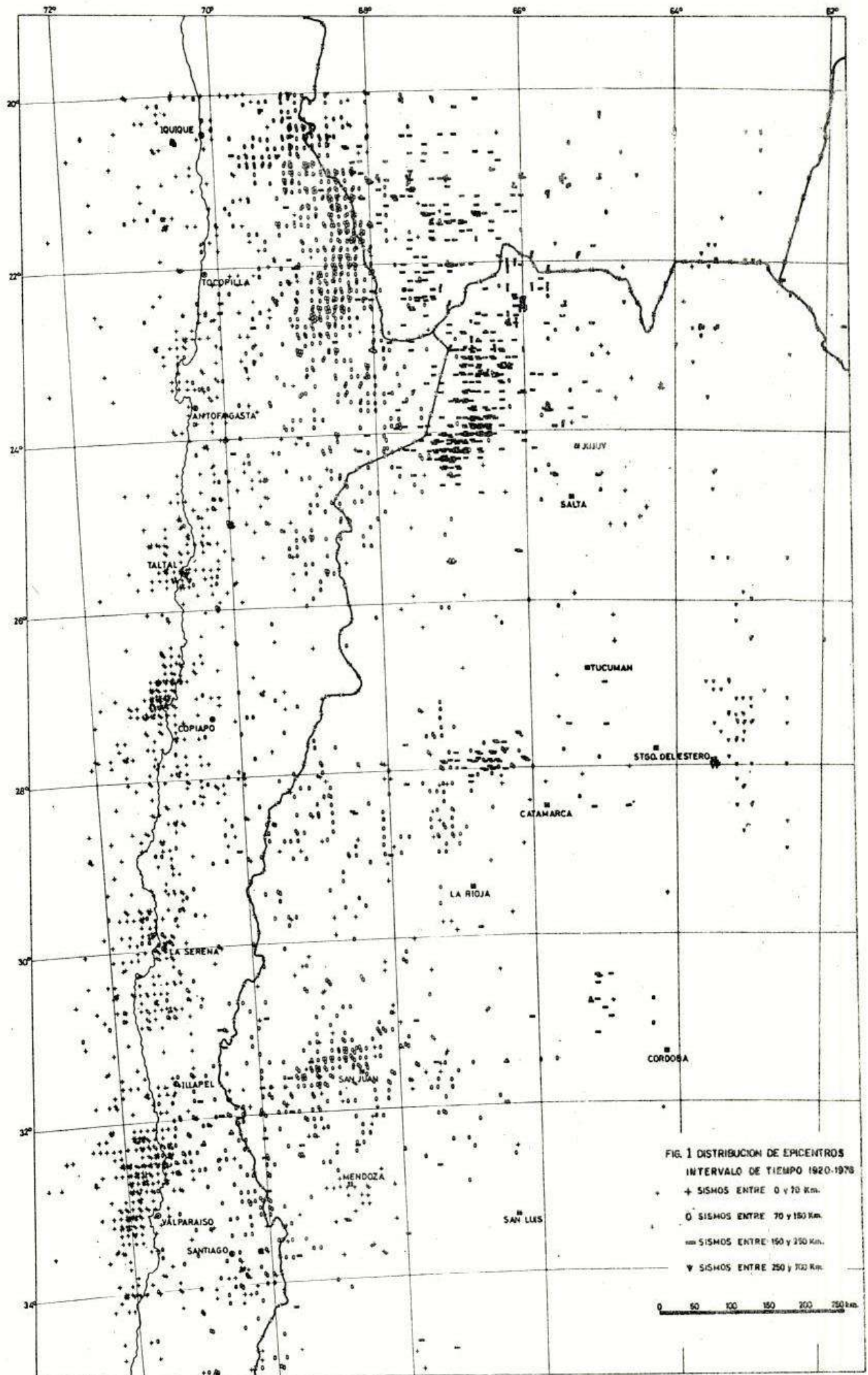
En una de ellas, el Area de Precordillera, se han efectuado estudios preliminares para localizar sectores de fracturación moderna, que corresponderían a fuentes potenciales de movimientos sísmicos.

1 - INTRODUCCION

Como consecuencia de la aplicación directa de la Teoría de la Tectónica de Placas, se ha considerado generalmente al borde continental sudamericano como parte de la zona de subducción simple correspondiente a la Placa de Nazca en su encuentro con la Placa Sudamericana. Esto debido a que, considerando el fenómeno en gran escala, el mismo se ajusta bastante bien a un modelo de este tipo. Sin embargo, la diversidad de los ambientes morfoestructurales observados al efectuar un análisis más detallado, así como la falta de uniformidad en la distribución de la actividad sísmica, nos llevan a pensar en la posible presencia de campos de esfuerzos activos en el presente régimen sismotectónico, que podrían dividir a la región estudiada en zonas con características sismotectónicas particulares para cada una de ellas y que como consecuencia de su interacción darían como resultado el modelo de subducción simple adoptado hasta el presente.

* JEFE DEPARTAMENTO SISMOLOGIA

** JEFE AREA INVESTIGACIONES SISMOLOGICAS.



La presencia de estos "campos", queda definida en algunos casos, por grandes zonas de fracturación y deformación, de características continentales y con desarrollo vertical que posiblemente supere el espesor cortical.

Aceptando la hipótesis, una consecuencia sería la definición de zonas con diferentes niveles de actividad sísmica, bajo el presente marco de esfuerzos.

Individualizando dichas zonas, se podrán estudiar en detalle, con el fin de determinar el riesgo potencial del área en sí y de cada una de las fuentes localizadas dentro de dicha área.

2 - CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ACTIVIDAD SISMICA REGIONAL

En la figura 2 se han dibujado los epicentros de los sismos ocurridos en la región en estudio en el intervalo de tiempo 1920-1976. Los datos fueron obtenidos de distintas fuentes de información, especialmente de los boletines del USGS, del ISC, del BCIS y de diferentes instituciones de nuestro país. En dicha figura se puede observar la falta de uniformidad en la distribución de la actividad sísmica, notándose áreas con una gran densidad de eventos sísmicos y otras con una casi completa ausencia de los mismos.

Con el objeto de visualizar con mayor claridad esa localización preferencial de la actividad sísmica, se ha confeccionado un mapa con las curvas de distribución anual de ocurrencia de sismos, trazadas dividiendo la región en una cuadrícula de $1^\circ \times 1^\circ$ y volcando, en el punto central, el número promedio anual. Dichas curvas, que se presentan en la figura 3, muestran algunos aspectos que se detallan a continuación.

- a) Existen dos zonas que se destacan por el elevado promedio anual de actividad sísmica y que, además, sus valores máximos presentan una tendencia a alinearse en direcciones preferenciales. La primera de ellas, que denominaremos Zona Norte, abarca el área comprendida, aproximadamente, entre los 20 y 25 grados, con un eje en dirección aproximada N 45 W. La otra, que llamaremos Zona Sur, está localizada entre los 30 y 34 grados, con un eje en dirección N 60 E.
- b) La zona que queda encerrada entre estos ejes de máximas

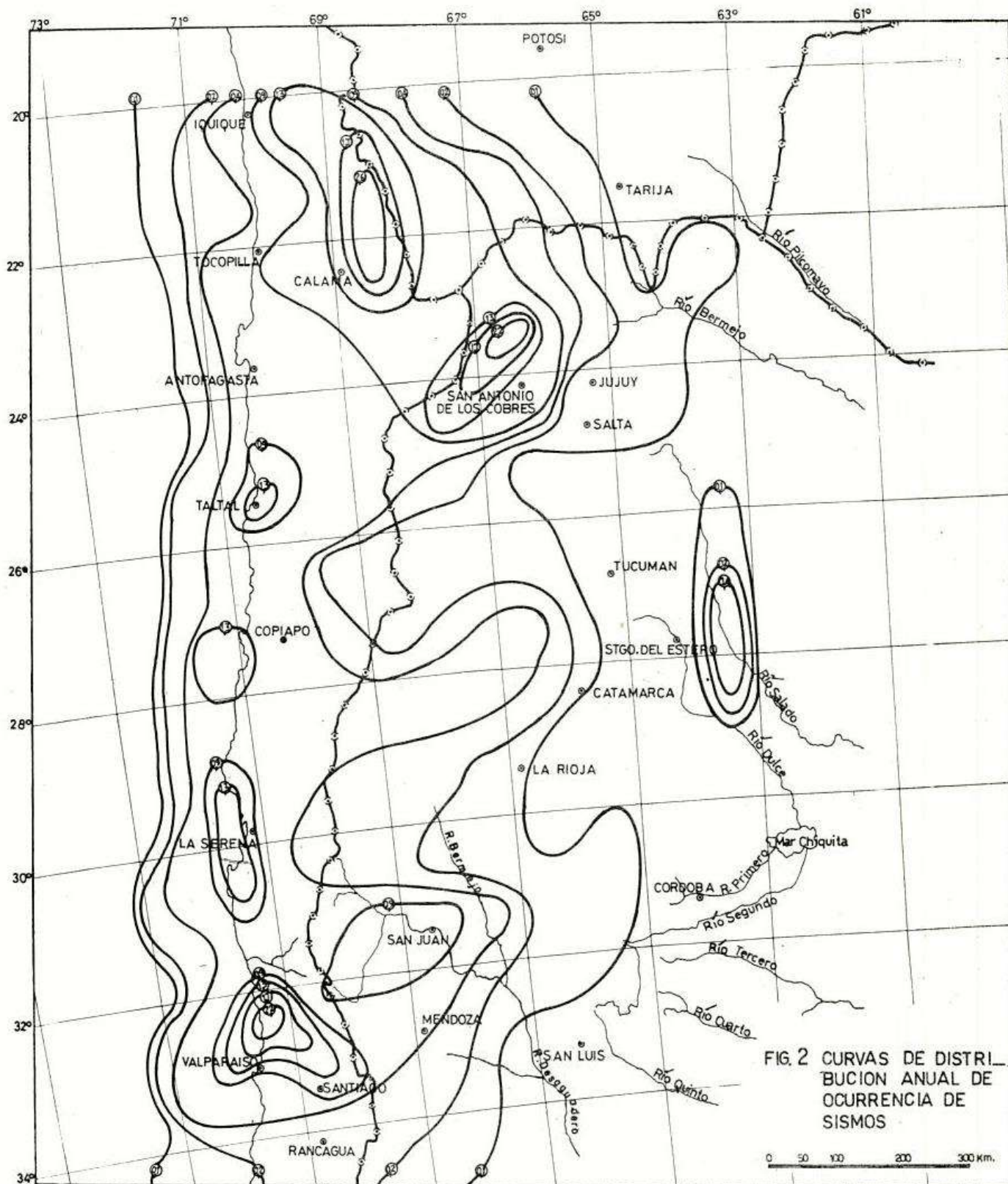
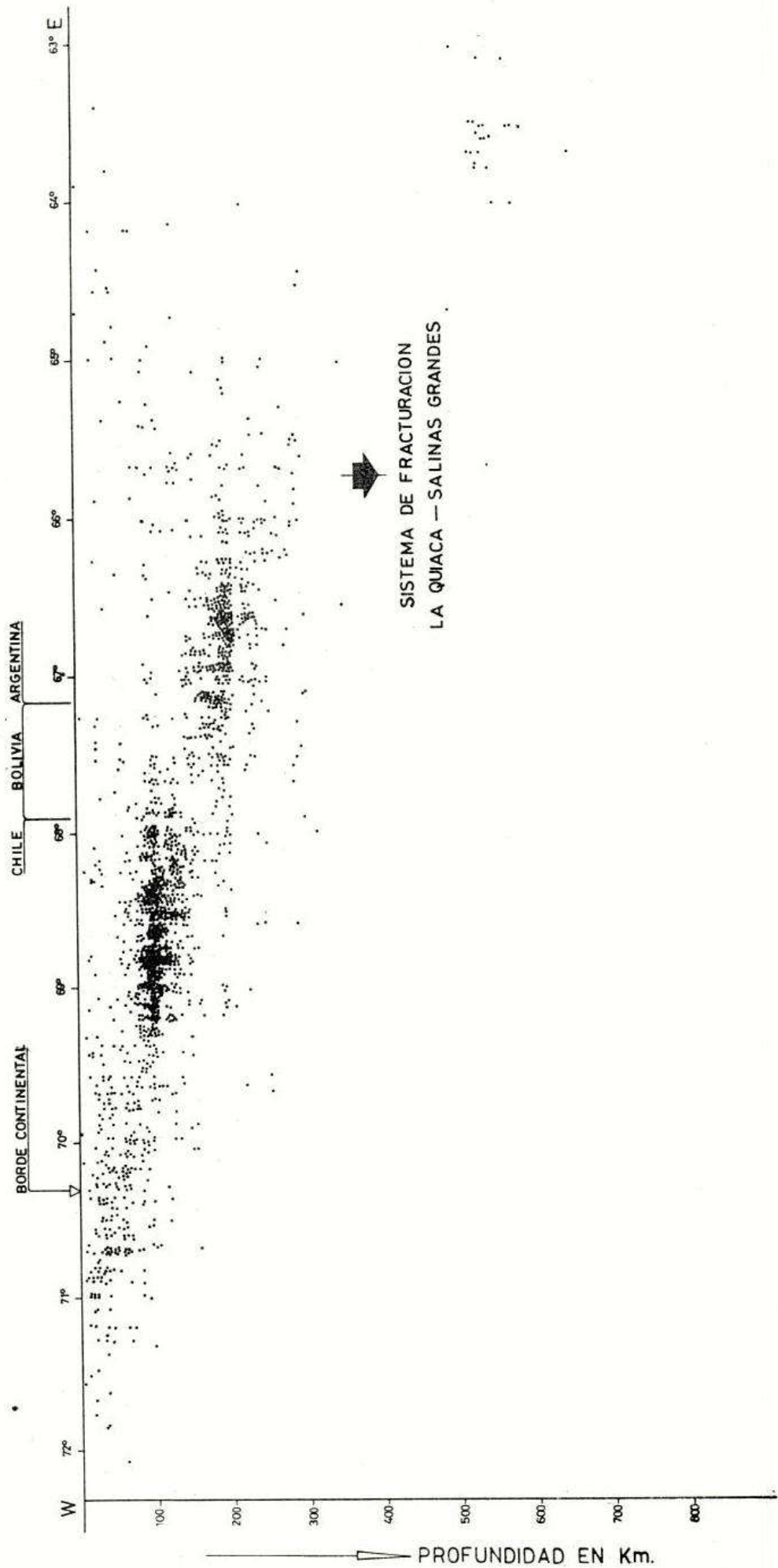


FIG. 2 CURVAS DE DISTRIBUCION ANUAL DE OCURRENCIA DE SISMOS

FIG. 3
DISTRIBUCION VERTICAL DE LA ACTIVIDAD SISMICA EN LA ZONA NORTE



densidades sísmicas, que individualizaremos como Zona Central, muestra tres características diferentes: la primera corresponde a una localización de la actividad sísmica en núcleos por curvas cerradas, en coincidencia con el borde continental. La segunda se refiere a una concentración de sismos de foco profundo en un sector comprendido por los 63° y 64° Oeste y los 26° y 29° Sur. La tercera de estas características destacables es la baja actividad sísmica existente en el sector central de esta zona.

Con el objeto de analizar la distribución vertical de los hipocentros, se confeccionaron tres perfiles transversales, uno para cada zona. Estos perfiles se obtuvieron proyectando sobre un plano vertical, de dirección Este-Oeste, todos los hipocentros correspondientes a cada una de las zonas. Dichos perfiles se presentan en las figuras 4, 5 y 6.

El perfil de la Zona Norte (figura 4) muestra algunas particularidades que analizaremos a continuación. En primer lugar se observa una concentración notable de hipocentros en dos sectores, el primero localizado entre los 68° y $69,2^{\circ}$ Oeste, con una profundidad focal entre 75 y 150 Km y el segundo ubicado entre los $66,2^{\circ}$ con una profundidad focal entre 175 y 200 Km.

A partir de los 66° hacia el este la densidad hipocentral disminuye considerablemente para estas profundidades, aumentando, en cambio, la actividad superficial, especialmente entre los $63,5$ y 65° . A su vez aparece el sector de sismos de focos profundos entre los 63° y 64° , con una profundidad focal entre 525 y 575 Km.

En lo referente al perfil de la Zona Central (figura 5) se observa una acumulación de hipocentros en coincidencia con el borde continental, extendiéndose entre los $70,8$ y $71,5^{\circ}$ y entre los 5 y 50 Km de profundidad.

Al igual que en el perfil de la Zona Norte existe una concentración de sismos de foco profundo ubicado entre los 63 y 64° , con la diferencia que, en este caso, la profundidad focal varía entre 550 y 600 Km.

El perfil de la Zona Sur (figura 6) se caracteriza por una acumulación de hipocentros en un horizonte bien defi

FIG. 4
DISTRIBUCION VERTICAL DE LA ACTIVIDAD SISMICA EN LA ZONA CENTRAL

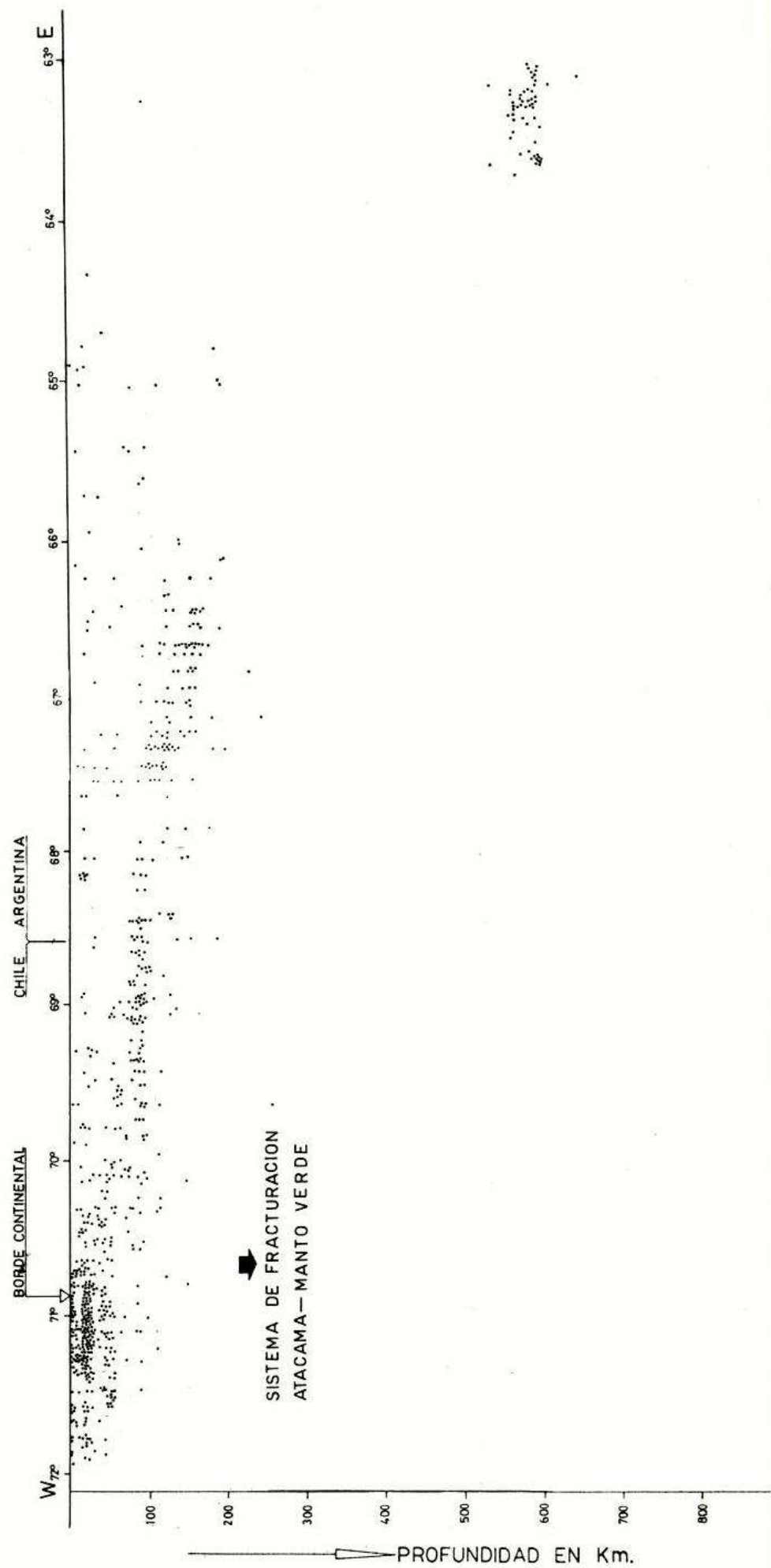
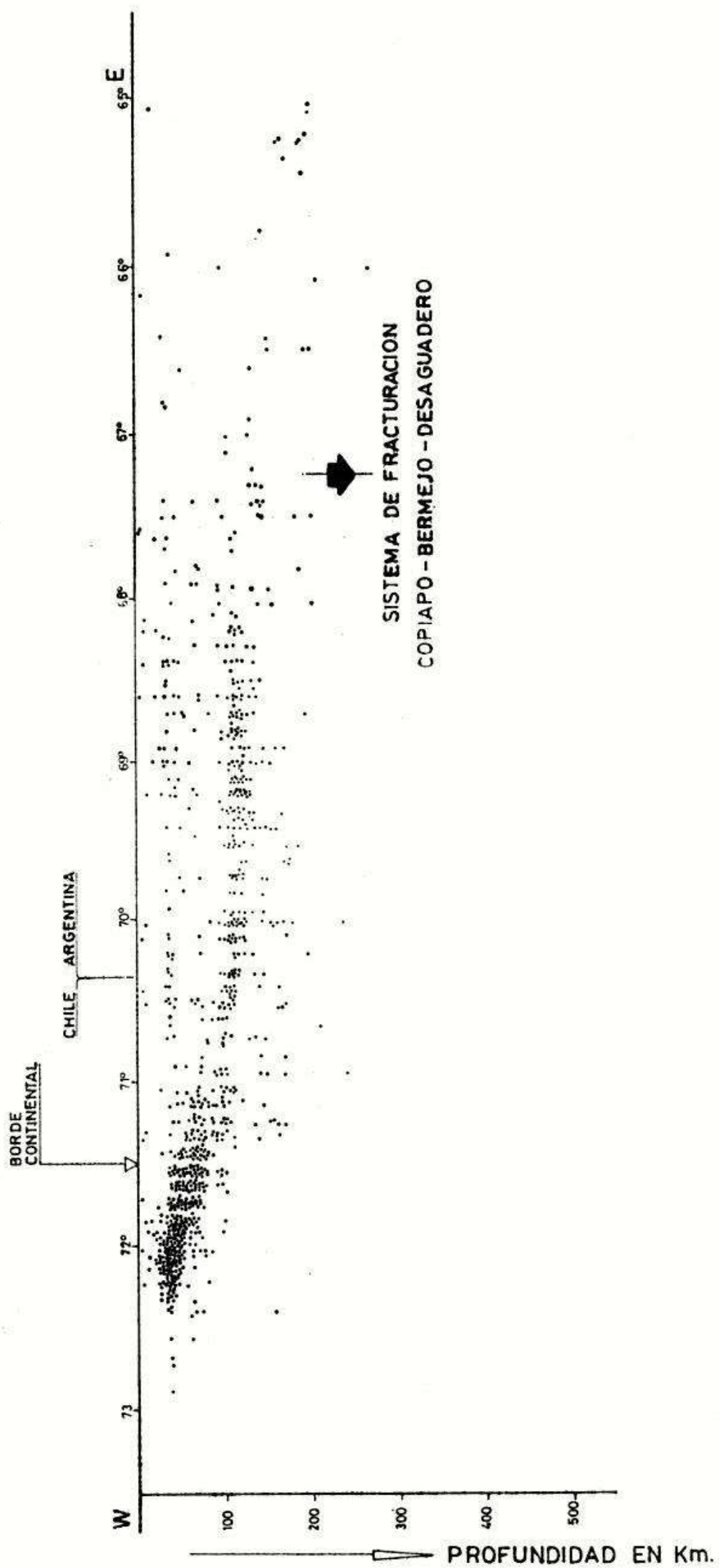
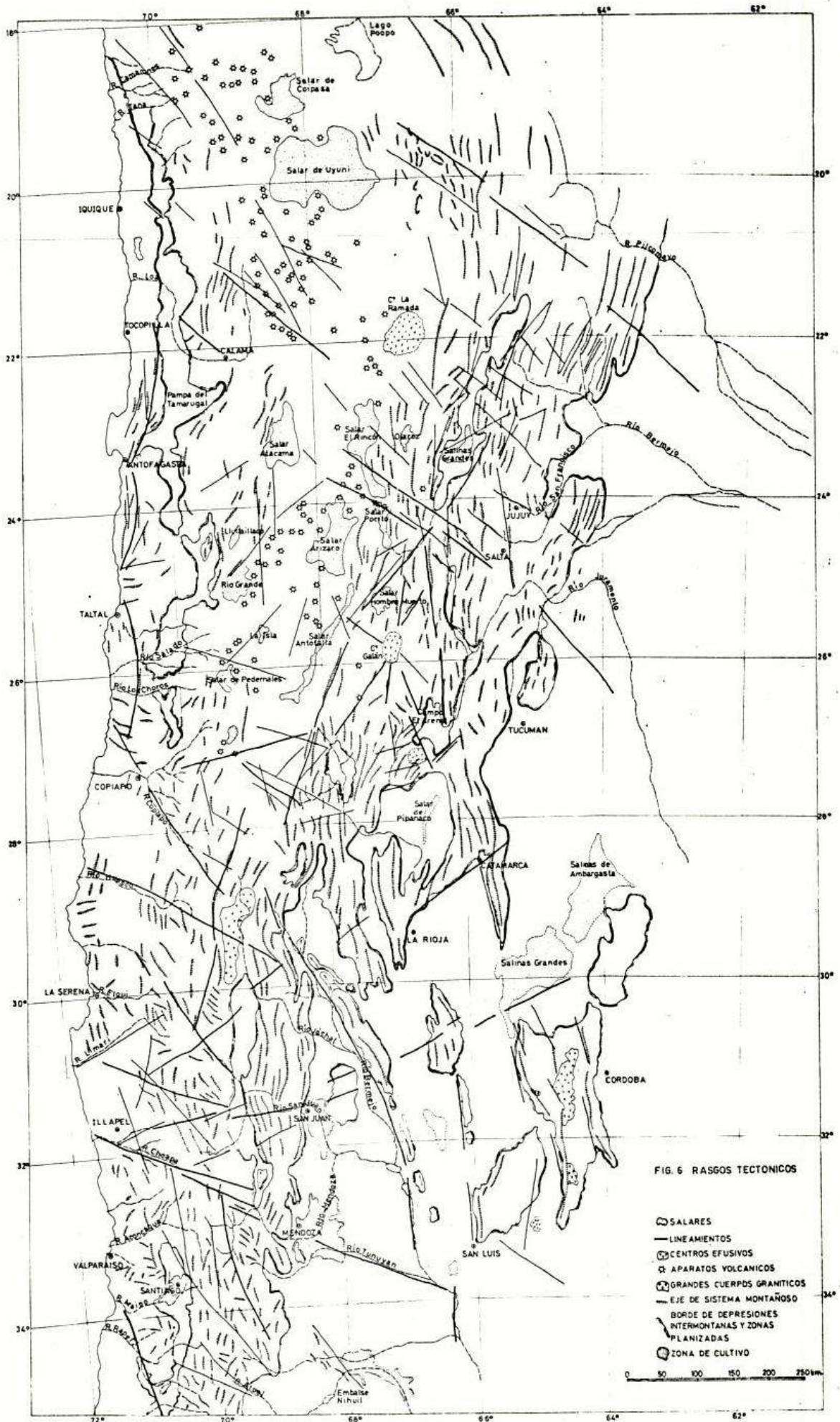


FIG. 5

DISTRIBUCION VERTICAL DE LA ACTIVIDAD SIMICA EN LA ZONA SUR





do, que se extiende desde los 72,4 hasta los 68° en forma mas o menos continúa, variando su profundidad media entre los 50 y 100 Km de oeste a este.

A diferencia de los dos perfiles anteriores no se observa la presencia de sismos de focos profundos.

3 - RASGOS TECTONICOS Y MORFOLOGICOS

La zona analizada tiene unos 2.200 Km de longitud y un ancho promedio de 700 Km. Una superficie tan extensa, presenta variados tipos de ambientes geográficos, ambientes geográficos, ambientes geológicos y dominios estructurales.

En la literatura geológica clásica, se encuentra la región dividida en provincias geológicas, unidades tectónicas y unidades morfoestructurales. En general estas divisiones limitan áreas de una determinada sucesión estratigráfica o un estilo estructural y a veces de determinados rasgos geomorfológicos. Es común también la reconstrucción de cuencas sedimentarias, cuya paleogeografía en la mayoría de los casos es compleja.

Considerando los fines del trabajo, el cual trata de verificar la existencia de una relación entre formas, estructuras y sismicidad, se decidió realizar una división en formas y zonas de manera tal que ellas evidencien la acción de esfuerzos generados en profundidad.

Lógicamente una "Forma Actual" es la resultante de la interacción de procesos a través del tiempo geológico y la distribución de la sismicidad es indicadora de un estado de tensiones actuales que en la mayoría de los casos no representa las tensiones actuantes cuando se constituyó la "Forma" como tal. Pero, desplazamientos e inflexiones en una forma o conjunto de formas, pueden ser elementos guías en la determinación de los parámetros rectores de la sismicidad.

En otro factor considerado es la Tectónica. En este punto se tomó en cuenta sólo aquellos rasgos rectilíneos o más exactamente, conjunto de rasgos que representan la presencia de un fenómeno de alcance regional o continental y por consiguiente su evolución en profundidad sobrepasa el desarrollo cortical.

La información básica fue obtenida de mosaicos de

imágenes Landsat en diferentes escalas y ampliaciones en Banda 7; 5 y falso color. Los mapas preliminares fueron completados con recopilaciones de mapas geológicos y tectónicos, reconstrucciones paleogeográficas y análisis de la bibliografía existente (figura 7).

3.1. - MARCO TECTONICO GENERAL

El análisis detallado de los rasgos tectónicos obtenidos nos indica que tanto los lineamientos mayores como los ejes de cadenas montañosas tienen direcciones preferenciales. Asimismo las áreas volcánicas se encuentran bien definidas, manifestándose de esta forma acciones diferenciales de esfuerzos según la zona cortical considerada. Los límites no son netos, advirtiéndose una interdigitación de fenómenos.

Las zonas de fracturación transversal se manifiestan claramente con desplazamientos de cadenas montañosas, alineación de centros volcánicos y formación de valles transversales a las estructuras.

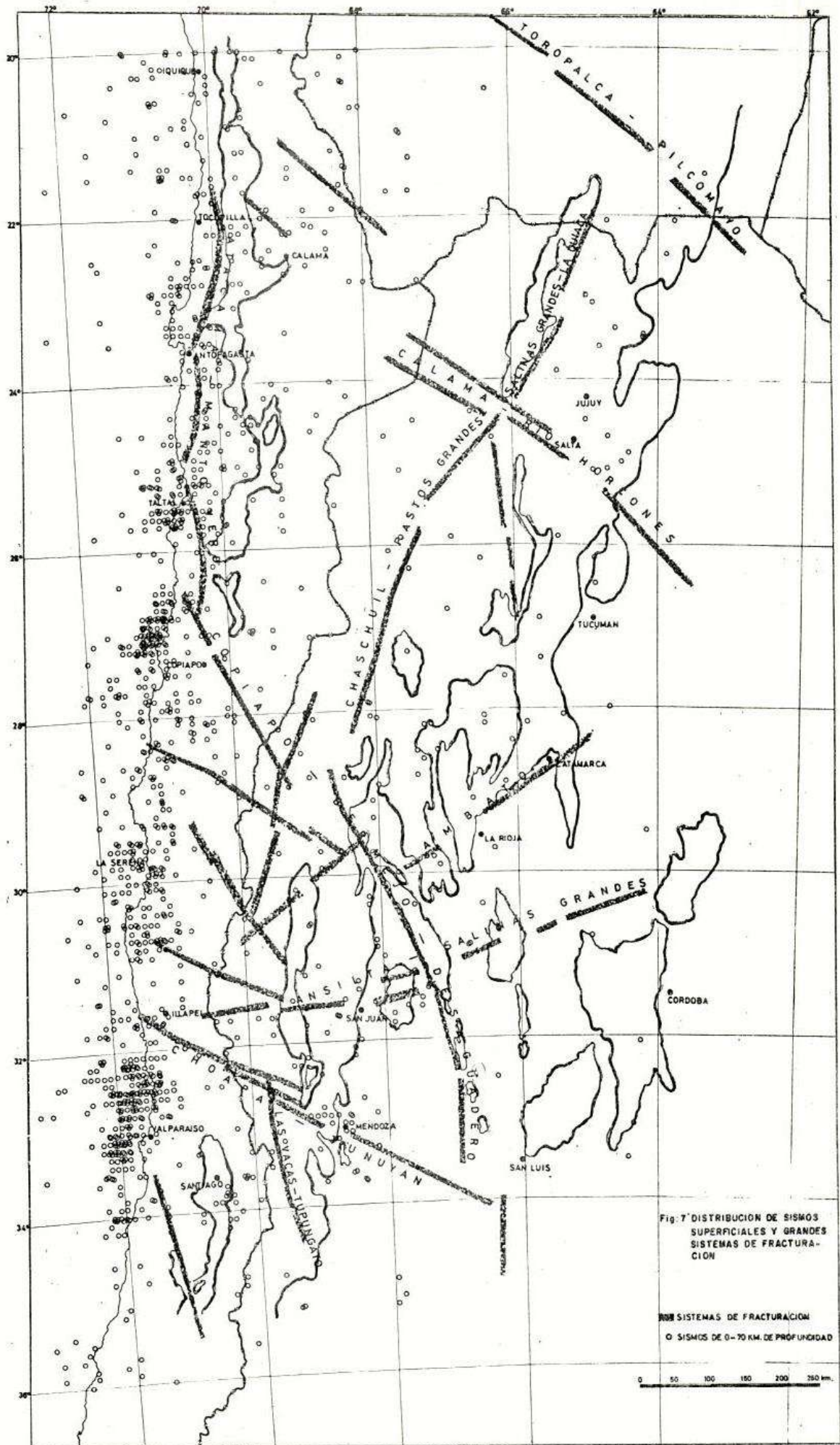
Estas zonas por sus características, se consideran como una manifestación de eventos de fracturación profunda que han sido reactivados en forma diferencial en los distintos períodos geológicos.

Según los rasgos generales considerados, se pueden establecer para la región analizada tres dominios tectónicos donde existe la manifestación notoria de un fenómeno en especial. Dichos dominios se detallan a continuación.

3.1.1. - ZONA NORTE

Las cadenas montañosas presentan una dirección media predominante $N^{\circ} 10^{\circ}E$. La presencia de fracturación transversal es notoria, con buena continuidad y rumbo general $N 50^{\circ}O$. Aparentemente este sistema está confinado entre dos megaestructuras que le sirven de límites norte y sur, respectivamente.

El límite norte coincide con la alineación de los ríos Toropalca, Intiyuro y Pilcomayo, la que a su vez constituye una zona donde comienza la inflexión de las cadenas montañosas, ya que hacia el norte las mismas se presentan con un rumbo Noroeste bien definido. Dicho lineamiento está relacionado con el límite Norte del magmatismo terciario de Bolivia



el cual se manifiesta en forma nítida hacia el Oeste del mismo.

El límite sur, que tiene características de continuidad continental, se extiende desde la localidad de Calama (Chile), a través de las cordilleras de La Sal, hasta el río Horcones en la llanura Chaco-Paranense, con dirección N 50° O. Esta alineación se manifiesta, en las cordilleras de La Sal por medio de fracturación transversal a los plegamientos de sedimentitas del terciario inferior; en ambiente de la Puna con la alineación volcánica Olacapato-San Gerónimo Negro de Chorrillos (12) y en ambiente de cordillera oriental por los marcados valles transversales de las quebradas Carrillas y Toro.

La acción de estos lineamientos como bordes de cuenca para los sucesivos depósitos sedimentarios es bien conocida, asignándosele participación activa en los períodos Cámbrico y Ordovícico, Cretácico Medio y Terciario Superior (1) (20).

Otro sistema de fracturación característico de esta zona tiene rumbo N 10° E, correspondiéndose con la dirección de las principales cadenas montañosas.

El área deprimida denominada La Quiaca-Salinas Grandes (12) es una manifestación geomórfica con ese rumbo y posiblemente constituya una evidencia de este sistema de fracturación regional. Dicha depresión sirve, además, como límite entre el ambiente de Puna y el de Cordillera Oriental.

En la latitud de San Antonio de los Cobres (23,5° Sur) se produce un acuñamiento del área deprimida, coincidiendo con el límite sur de la zona que estamos analizando, continuándose luego desplazada hacia el oeste, con la depresión Pastos Grandes - Centenario, Salar Hombre Muerto, Salar Incahuasi, Laguna Parulla y depresión de Chaschuil. Esta zona deprimida en su último tramo se manifiesta en forma más notoria al servir de límite entre un sector occidental caracterizado por gran cantidad de aparatos volcánicos bien formados relieve sumamente abrupto, y un sector oriental con muy pocos conos volcánicos definidos y relieve más suavizado.

3.1.2. - ZONA CENTRAL

Sus límites están dados por el sistema de fracturación Calama-Río Horcones y el denominado sistema Copiapó-Bermejo-Desaguadero (figura 7), que se describe al tratar la zona sur.

En esta zona no existe una tendencia nítida en el sentido de la fracturación. Las formas no se presentan definidas, existiendo una interdigitación de las mismas, evidenciando la superposición de fenómenos geológicos y tectónicos. En términos generales diferenciamos dos Areas: una oriental y una occidental.

a) AREA ORIENTAL

Se extiende hacia el Este de la depresión Pastos Grandes-Chaschuil, descrita anteriormente. El paisaje predominante se caracteriza por el desarrollo de cadenas montañosas, con rumbos norte-sur y una tendencia de las mismas hacia una dirección noroeste, principalmente en el extremo austral.

En esta Area se observan dos fenómenos tectónicos de importancia, que son: un evento magmático terciario y una depresión intermontana de forma más o menos circular. El primero, aparentemente, está relacionado con una fracturación radial de un amplio sector. El conjunto volcánico tiene una superficie aproximada de 1.100 km², presentando elevaciones de hasta 6.000 metros sobre el nivel del mar, en coincidencia con su sector central. Dicho sector central, donde se destaca el Cerro Galán (figura 7), podría constituir un centro resurgente de una gran caldera de explosión, similar a la caldera Valles de Nuevo México (35). Por otra parte, el análisis de imágenes satelitarias muestra que el área afectada por la fracturación radial es sumamente extensa con un proceso de abovedamiento cortical de características regionales.

El otro fenómeno lo constituye una depresión intermontana de forma mas o menos circular, que abarca una superficie de alrededor de 10.000 Km² y que presenta una tectónica bastante compleja. En su extremo norte se observan estructuras arqueadas (2). El límite sureste lo configuran cadenas

de bloques fallados en su flanco occidental y el límite oeste está constituido por el bloque de las Sierras de Velazco, fallado en su flanco oriental. La diferencia de cota entre el nivel medio de cumbres y el sector central, que contiene el Salar de Pipanaco (Figura 7), se superior a los 1.500 metros.

b) AREA OCCIDENTAL

Se extiende al oeste del sistema Pastos Grandes Chaschuil, desarrollándose casi enteramente en territorio chileno. Morfológicamente podemos reconocer dos sectores: uno en coincidencia con el límite argentino chileno, caracterizado por su intenso vulcanismo Cuaternario-Plioceno superior, que cubre la casi totalidad de las estructuras, y otro, sin vulcanismo, que se desarrolla paralelo al límite de la costa, desde la localidad de Tocopilla al norte, hasta las proximidades del río Copiapó. En este último se reconocen tres segmentos de trazo mas o menos curvilíneo (45), que son: el de la falla de Atacama, el del salar del Cármen y el de Manto Verde. El primero se extiende desde la desembocadura del río Loa en el Pacífico hasta la localidad de Antofagasta, siendo la evidencia geomórfica muy nítida en su último tramo.

El segmento del salar del Cármen comienza en la Caleta Coloso y tiene una muy buena expresión geomórfica, con un valle angosto que se extiende hasta la localidad de Paposo, donde se pierde bajo el océano.

El tercer segmento se desarrolla desde la localidad de Taltal hasta las proximidades de Copiapó, donde las evidencias geomórficas se obliteran, no pudiéndose asegurar una continuidad neta hacia el sur.

3.1.3. - ZONA SUR

Se extiende al sur de los sistemas de fracturación Ambato y Copiapó-Bermejo-Desaguadero.

En el sector chileno, la cordillera de la Costa, entre los 29° y 34° S, se manifiesta como un área montañosa de relieves abruptos, con una predominancia en afloramientos graníticos. En la unión con el macizo andino no presenta un

valle central nítido como el desarrollado al Sur de los 34° y al Norte de los 29° .

La mega forma principal es el macizo Andino, que se desarrolla como estructura alargada hacia el Sur del paralelo 26, con un ancho mas o menos constante de 100 Km. Presenta en su configuración profundos valles transversales, que en la mayoría de los casos marcan evidencias de zonas de fractura. Morfoestructuras sobresalientes de esta zona Sur son: la Precordillera y la depresión Río Blanco-Uspallata.

La dirección de fracturación característica es N-S, manifestándose por la alineación de cadenas montañosas, frentes de sobrescurrimiento y depresiones menores alargadas según el rumbo de los cordones serranos. Se han identificado grandes rasgos rectilíneos transversales a las megaformas y estructuras montañosas. Dichos rasgos aparentemente han sido elementos activos para la configuración de los distintos ambientes geológicos y tectónicos a través del tiempo. De esta forma en el Norte, con rumbo $N\ 50^\circ\ E$, se observa el sistema de deformación y fracturación Ambato (20), el cual se extiende al pie de las sierras del mismo nombre, constituye el límite Sur del bolsón de Pipanaco y cruza el sistema Copiapó-Bermejo-Desaguadero a la altura del Cerro Bola, estructura anticlinal con rumbo anómalo. En ambiente de Precordillera se manifiesta con inflexión de cordones calcáreos y corrimiento de ejes montañosos. Su expresión geomórfica se hace menos visible en Cordillera, no teniendo mayor representatividad en el sector chileno.

Con un rumbo paralelo al anterior se desarrolla hacia el sur, el sistema Ansilta-Salinas Grandes, el cual tiene expresiones notorias en ambiente de Precordillera, en las Sierras de Pie de Palo, de Valle Fértil y de Chepes, constituyendo el borde austral de las Salinas Grandes de Santiago del Estero. Dicha megaestructura ha sido estudiada por diversos autores (22), asignándosele participación como elemento paleogeográfico con dirección NO-SE. Continuando hacia el sur, a la altura del paralelo 33° , se desarrollan rasgos lineales que, coincidiendo con la finalización de la forma precordillerana, se extiende con características de valles y ríos rectilíneos a través del macizo andino, desde el Río

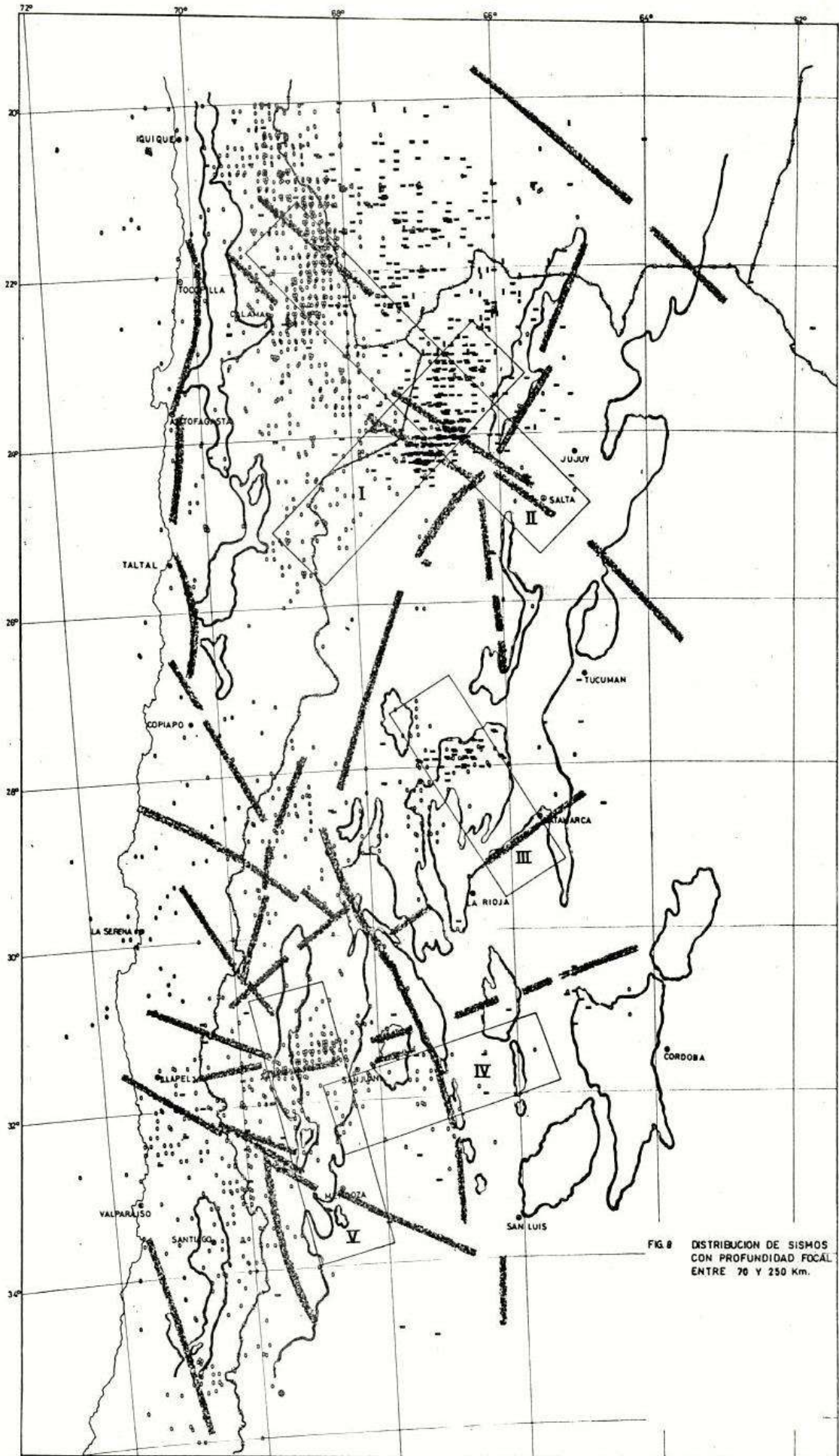


FIG. 8 DISTRIBUCION DE SISMOS CON PROFUNDIDAD FOCAL ENTRE 70 Y 250 Km.

Choapa y sus nacientes en Chile hasta las sierras de Varela, en territorio argentino. Estos rasgos lineales tienen rumbo general NO-SE, siguiendo el curso del Río Tunuyán, Provincia de Mendoza, y su prolongación coincide con un desplazamiento de la Megaestructura Copiapó-Bermejo-Desaguadero, en la zona de sierras de Varela.

La Megaestructura Copiapó-Bermejo-Desaguadero, es un sistema de fracturación muy sobresaliente, que se manifiesta principalmente por valles transversales a la zona cordillerana y sistemas orográficos alineados. Su rumbo promedio es N 35° Oeste, observándose valores angulares mayores, de unos 45° Oeste, cerca de su desembocadura en el Pacífico.

Las mejores evidencias geomórficas se observan en las nacientes del Río Pulido, en territorio chileno, mientras que, en Argentina, se manifiesta con un sistema orográfico que se extiende desde el paralelo 29° hasta el 34°, con muy buena definición geomórfica.

Hacia el Este de dicho tren estructural, correspondiendo con la región central argentina, se desarrollan, con predominancia notoria de rocas metamórficas, dos sistemas serranos de rumbos más o menos paralelos: el de las Sierras de San Luis y el de las Sierras de Córdoba. En ambos casos los frentes abruptos son los occidentales, siendo el sistema de Sierras de Córdoba el de mayor desarrollo geográfico.

4. - SISMICIDAD, TECTONICA Y VULCANISMO

4.1. - HIPOCENTROS Y ESTRUCTURAS

Si aceptamos la idea de que las grandes estructuras están directamente relacionadas con la distribución espacial de ocurrencia de sismos, o por lo menos, que separan regiones con características sísmicas diferentes, podemos esperar que ésta relación se haga más evidente por debajo de una cierta profundidad focal, ya que los epicentros de los eventos superficiales pueden estar localizados en áreas correspondientes a pequeñas fracturaciones de alivio que, si bien son una consecuencia del sistema general de tensiones, pueden no corresponderse directamente con las megaestructuras.

Por tal motivo se han considerado separadamente los eventos con profundidades comprendidas entre 0 y 70 Km de a-

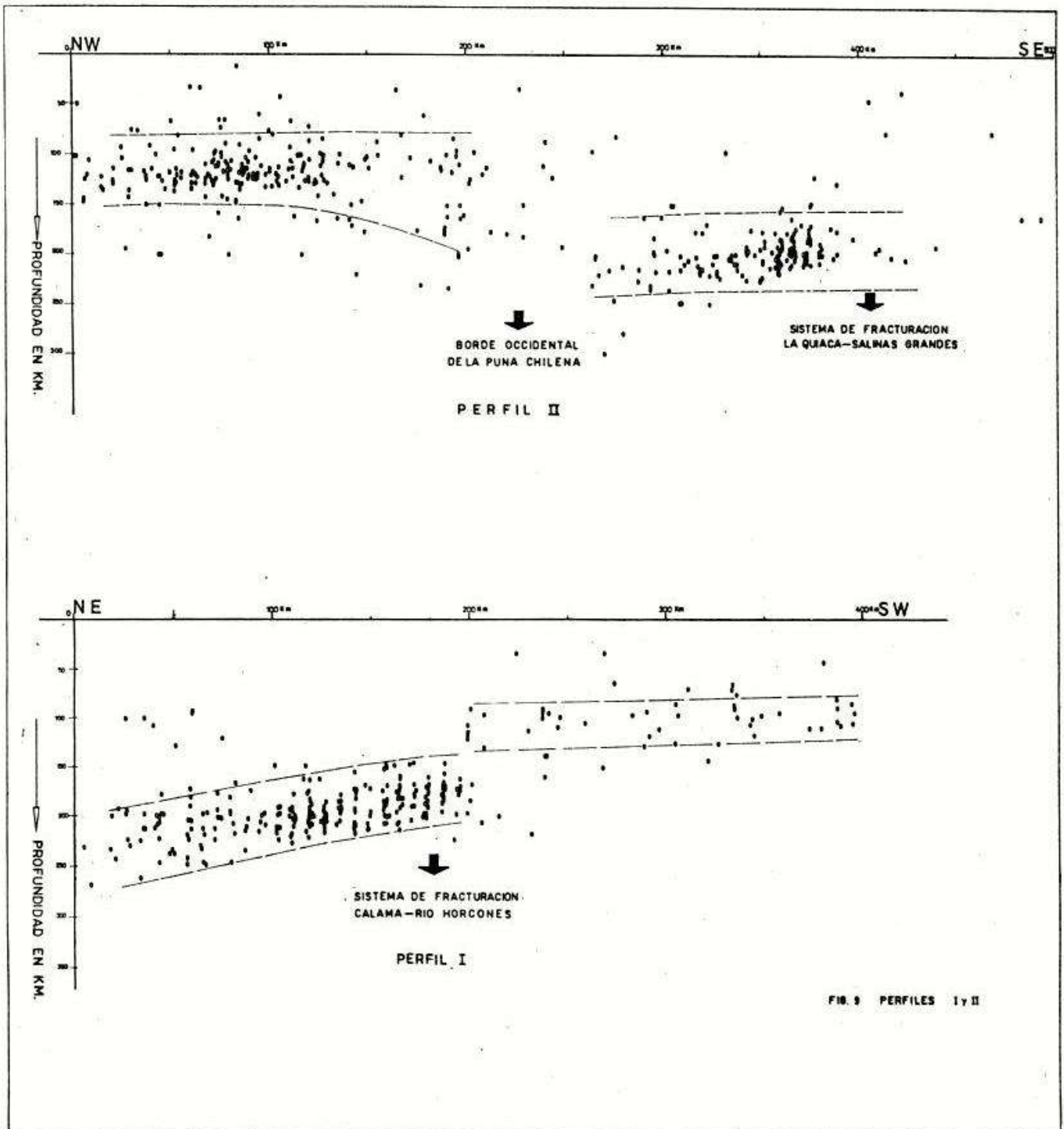


FIG. 9 PERFILES I y II

quellos con profundidades entre 70 y 250 Km, presentándose superpuestos a los grandes lineamientos en los mapas de las figuras 8 y 9. En este último caso se han expresado con simbología diferente a los eventos con profundidades comprendidas entre 70 y 150 Km, de aquellos localizados entre 150 y 250 Km, con el solo objeto de resaltar la diferencia de profundidades medias en las zonas Norte y Sur.

Para ambos intervalos de profundiad, 0-70 Km y 70-250 Km, el modelo obtenido muestra en algunos casos, una buena relación entre las grandes estructuras y la localización de eventos, quedando evidenciado, con diferentes grados de correspondneica en la zona Norte, Centro y Sur respectivamente, las que trataremos individualmente a continuación:

4.1.1. - ZONA NORTE

La figura 9 muestra una coincidencia notable entre el límite de actividad sísmica para el intervalo de profundidad 70-250 Km y las megaestructuras Calama-Río Horcones, al sur, y la Quiaca-Salinas Grandes al este.

A efectos de observar en detalle este punto se trazaron dos perfiles, individualizados como I y II, también indicados en la figura 9, en direcciones perpendiculares a las trazas de las mencionadas megaestructuras.

Dichos perfiles se presentan en la figura 10.

El perfil I corta la megaestructura Calama-Río Horcones en dirección NE-SW. Puede apreciarse claramente que dicha estructura coincide con un cambio en la profundidad y en la densidad de eventos sísmicos predominantes en ambos lados de la misma.

El perfil II, que corta la megaestructura la Quiaca-Salinas Grandes en dirección NW-SE, muestra dos aspectos importantes de destacar. El primero de ellos se refiere a la coincidencia entre la traza de dicha estructura y la finalización de los sismos localizados a profundidades entre 150 y 250 Km. El segundo aspecto visible es, al igual que en el caso anterior, un cambio en la profundidad media de ocurrencia de sismos, relacionados directamente con la presencia del borde occidental de la Puna Chilena y una disminución notable de la densidad de eventos solamente en las proximidades

de dicho borde.

4.1.2. - ZONA CENTRAL

Esta zona se caracteriza por la falta de uniformidad de la actividad sísmica, notándose una diferencia de dicha actividad en coincidencia aproximada con la división morfológica realizada en el apartado 3.1.2., donde se diferenciaron dos Areas: una Oriental y otra Occidental.

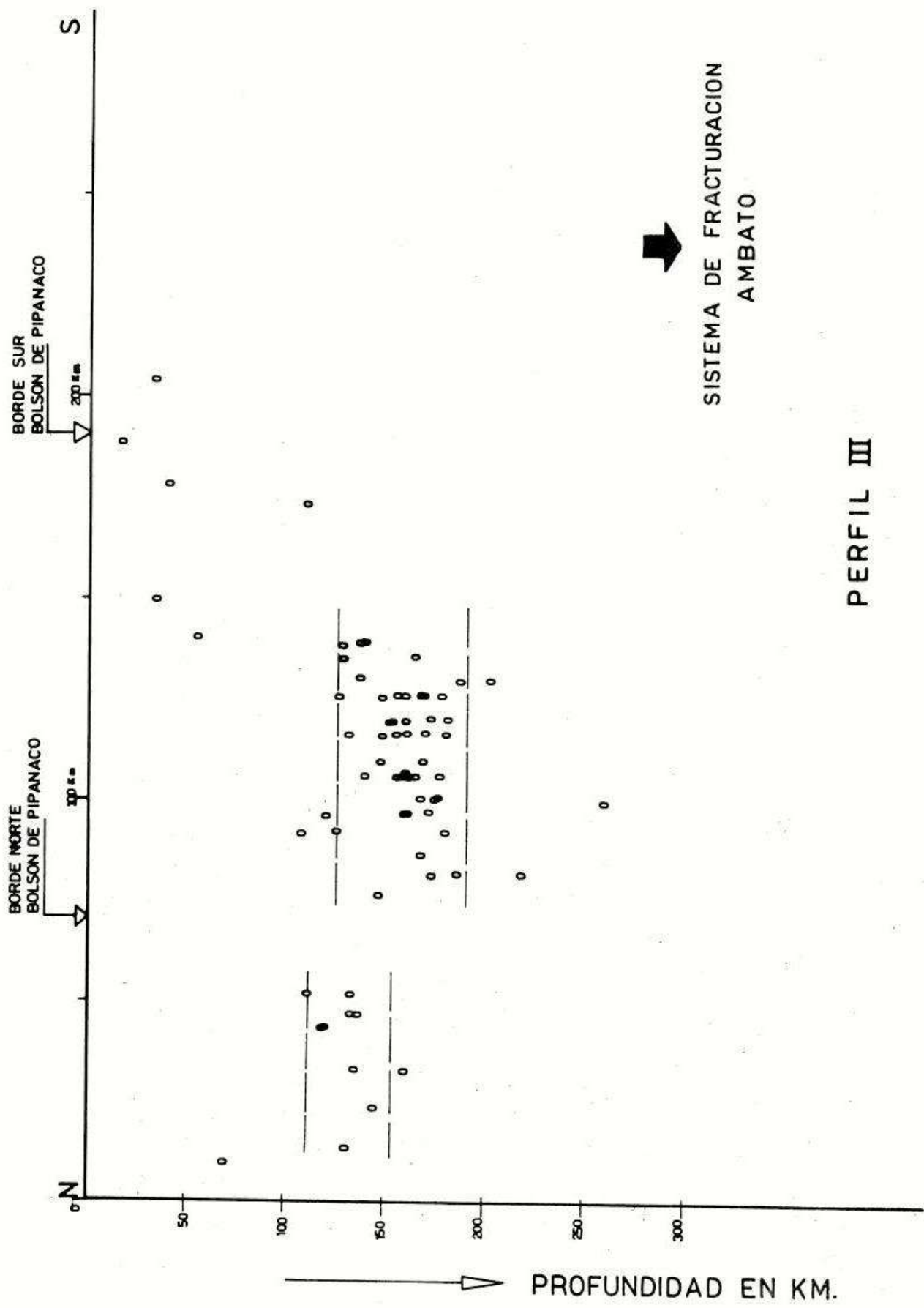
La actividad sísmica en correspondencia con el Area Occidental presenta un predominio de focos superficiales, con un aumento del número de sismos en el borde continental.

En el Area Oriental la sismicidad presenta dos aspectos importantes de destacar; el primero se refiere a una disminución notable de la actividad sísmica en un amplio sector que incluye el evento magmático explosivo, descrito anteriormente, localizado en el Cerro Galán. El segundo, está relacionado con la depresión intermontana del Bolsón de Pipanaco, donde hay una concentración de eventos sísmicos en correspondencia con la zona deprimida. Allí se confeccionó el Perfil III que se presenta en la figura 11. Este perfil muestra que dicha actividad está restringida, no sólo en sentido horizontal, sino también en sentido vertical, acumulándose los hipocentros entre los 130 y 175 Km. Además, se observa que el sistema de fracturación Ambato sirve de límite a la actividad sísmica regional.

4.1.3. - ZONA SUR

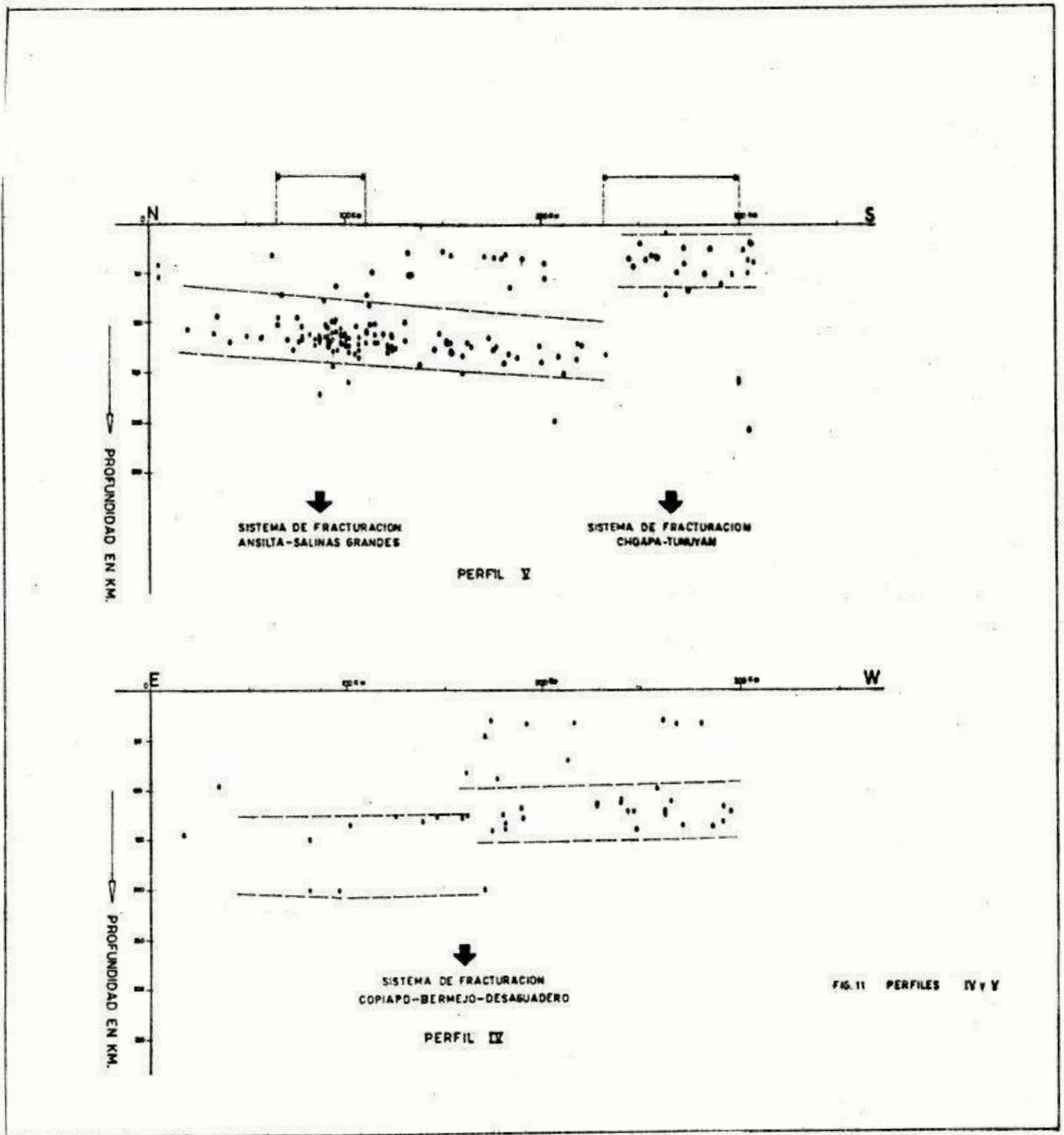
En esta zona las correlaciones entre magaestructura y epicentros no son tan nítidas. Sin embargo, el área con mayor densidad de eventos sísmicos se localiza dentro de un marco bien definido, el cual tiene como límite al norte y este, el sistema Copiapó-Bermejo-Desaguadero y al sur, el sistema Choapa-Tunuyán. A su vez, dentro de este sector, existe una mayor acumulación de epicentros en correspondencia con la traza del sistema Ansilta-Salinas Grandes.

A efectos de visualizar con mayor precisión la distribución hipocentral, se han confeccionado dos perfiles, marcados en el mapa de la figura 9, e individualizados como Perfiles IV y V, presentados en la figura 12.



PERFIL III

FIG. 10



El perfil IV muestra, a pesar de la escasa cantidad de eventos, un cambio en la distribución de hipocentros, en coincidencia con la traza del sistema Copiapó-Bermejo-Desaguadero. Se puede observar que al este de dicho sistema desaparecen los sismos superficiales y disminuye considerablemente la densidad total de eventos.

En el perfil V se observa, en primer lugar, un cambio notable en la profundidad hipocentral en coincidencia con el sistema de fracturación Choapa-Tunuyán, como así mismo una relación directa entre la actividad superficial y la proyección de la traza de dicho sistema.

La segunda anomalía visible es la acumulación de sismos en correspondencia con el sistema de fracturación Antisilta-Salinas Grandes.

4.2. - TERREMOTOS DESTRUCTIVOS

Otro aspecto importante de analizar para relacionar la sismicidad con las estructuras es el referido a la ocurrencia de terremotos destructivos, los que, por su carácter, están bien documentados desde el siglo XVI en adelante.

En la figura 13 se muestra la distribución epicentral de estos terremotos, superpuesto a las megaestructuras, dentro de la región en estudio. El listado de estos mismos eventos se presenta en la Tabla 1.

Del análisis de dicha figura se pueden sacar las siguientes conclusiones:

a) En la Zona Norte se observa que los terremotos destructivos se han agrupado preferentemente en dos áreas. La primera pertenece a la costa chilena, entre las localidades de Tocopilla y Arica y la segunda, en territorio argentino, se ubica en la parte más oriental de esta Zona, en correspondencia con la actividad sísmica superficial descrita anteriormente.

Es interesante destacar que la megaestructura la Quiaca-Salinas Grandes sirve de límite oeste en la localización de estos últimos terremotos destructivos.

b) La Zona Central se caracteriza por una ausencia casi completa de eventos sísmicos destructivos. En su Área Occidental debemos mencionar solamente el terremoto de Taltal de 1966, mientras que en su Área Oriental los sismos de 1926,

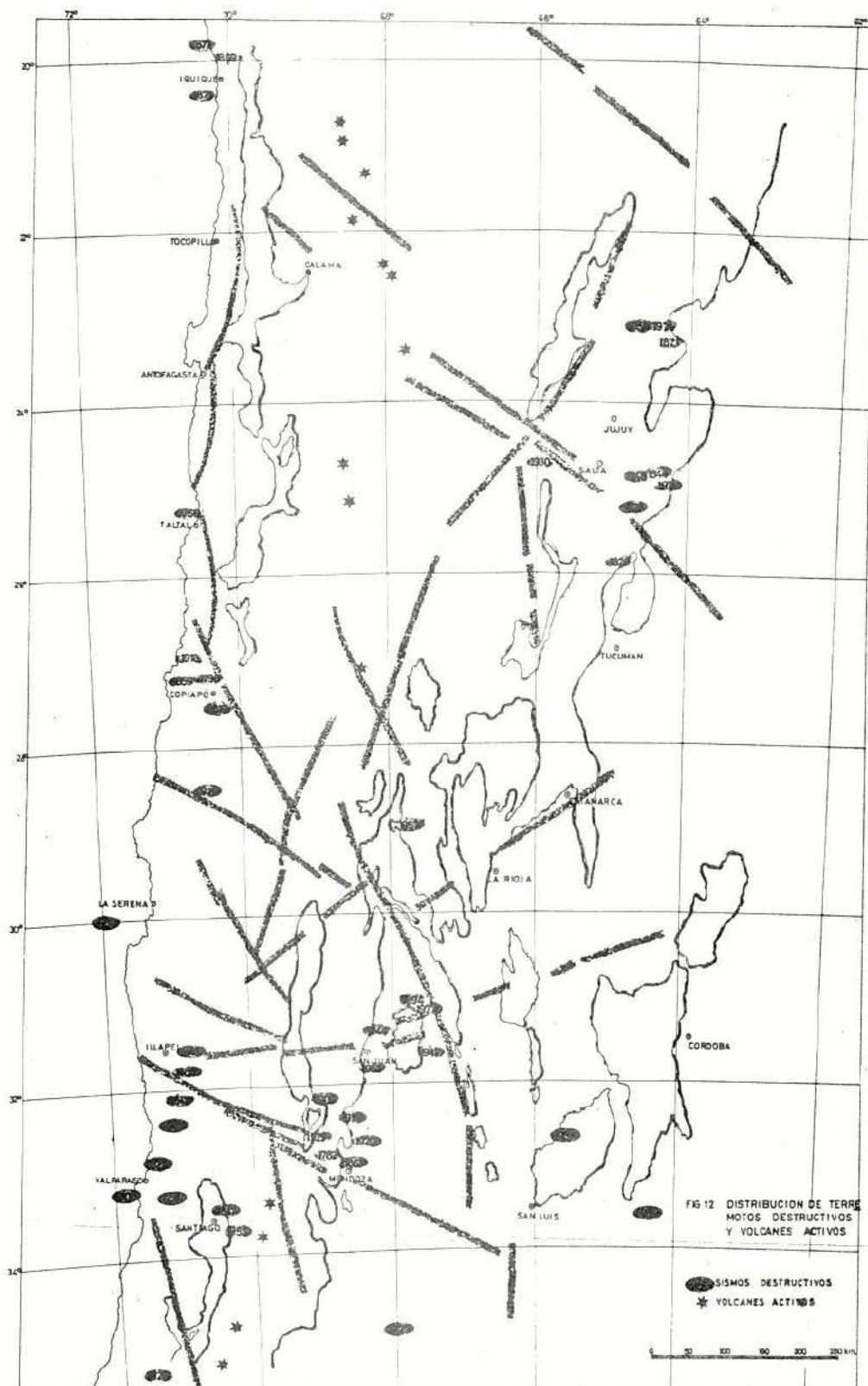


FIG 12 DISTRIBUCION DE TERREMOTOS DESTRUCTIVOS Y VOLCANES ACTIVOS

● SISMOS DESTRUCTIVOS
 ★ VOLCANES ACTIVOS



1930 y 1957, que han sido de moderada magnitud, se ubican en las proximidades de los grandes sistemas de fracturación que sirven de límite entre zonas.

c) La Zona Sur es la que presenta mayor cantidad de terremotos destructivos, muchos de ellos con magnitudes superiores a ocho.

Se observa, en primer lugar, una relación, más marcada que en los casos anteriores, entre sismos destructivos y megaestructuras.

En la parte Occidental de esta zona existe un agrupamiento de los grandes terremotos en los sectores que corresponden a la finalización de las megaestructuras en el borde continental, tales como Copiapó, Illapel y Valparaíso.

Además se observa que el sistema Ansilta-Salinas Grandes sirve de límite norte a la actividad sísmica destructiva, acumulándose los epicentros sobre dicho sistema o al sur del mismo hasta el de Choapa-Tunuyán.

Por último, en esta Zona Sur, la megaestructura Copiapó-Bermejo-Desaguadero actúa como elemento de separación entre dos ambientes sísmicos diferentes, ya que a partir de este sistema hacia el este los terremotos mayores son de moderada magnitud y muy localizados en sus efectos.

4.3. - VULCANISMO

Otra de las características importantes de considerar está referida al vulcanismo activo presente en la región. En el mapa de la figura 13 se han representado los volcanes activos durante las últimas centurias. Allí se observa una mayor densidad de actividad volcánica en correspondencia con el área limitada por los dos sistemas que definen la zona norte. En cambio en la Zona Central solamente se conocen tres volcanes activos, ubicados al Oeste del sistema Pastos Grandes-Chaschuil. Para la Zona Sur no existe actividad volcánica cuaternaria entre las megaestructuras Copiapó-Bermejo-Desaguadero y Choapa-Tunuyán, comenzando nuevamente el vulcanismo activo al sur de este último sistema.

5 - AREAS SISMOTECTONICAS

Una vez analizados en forma individual, los dife-

rentes aspectos referidos a tectónica, grandes rasgos morfológicos, actividad sísmica y vulcanismo activo, es importante considerar los mismos en forma superpuesta ya que la ocurrencia de estos fenómenos indicaría las regiones de la corteza terrestre que en la actualidad están siendo sometidas a mayores deformaciones con las consiguientes liberaciones de tensiones.

A los fines de la estimación del riesgo sísmico, es necesario delimitar las áreas pertenecientes a estas regiones, que presenten características sismotectónicas particulares, de manera tal que puedan ser individualizadas como unidades independientes. A estas unidades les llamaremos Areas Sismotectónicas.

En el mapa de la figura 14 se presenta la división en Areas Sismotectónicas de la región estudiada, de acuerdo al siguiente esquema:

5.1. - ZONA NORTE

5.1.1. - AREA DE LA PUNA

Se desarrolla al oeste de la depresión la Quiaca-Salinas Grandes, teniendo como rasgos principales la presencia de una mayor cantidad de volcanes activos, los sismos con profundidad media entre 200 y 250 Km en su parte oriental y una actividad sísmica superficial en el borde continental.

5.1.2. - AREA DE SIERRAS SUBANDINAS

Se desarrolla hacia el Este de la depresión la Quiaca-Salinas Grandes y se caracteriza por la ausencia de sismos profundos y por la presencia de sismicidad superficial y sismos destructivos, localizados ambos en las cercanías de los lineamientos transversales típicos de la zona Noreste.

5.2. - ZONA CENTRAL

5.2.1. - AREA DE ATACAMA

Se extiende entre el sistema Pastos Grandes-Chaschuil y los rasgos curvilíneos del sistema Atacama-Manto Verde. Presenta una moderada actividad sísmica y se caracteriza por el

relieve típico del ambiente volcánico de la Puna.

5.2.2. - AREA DE PIPANACO-GALÁN

Esta área presenta dos subáreas con características particulares. La Subárea del Cerro Galán, si bien es poco conocida y sólo se tienen informes preliminares de estudios en desarrollo, muestra como muy sugestivo la ausencia casi completa de actividad sísmica coincidente con un fenómeno volcano-tectónico mencionado anteriormente.

Por el contrario, la Subárea del Bolsón de Pipanaco presenta una concentración de sismos con profundidades medias de 150 Km, coincidente con esta depresión intermontana.

5.2.3. - AREA DE TOCOPILLA-COPIAPO

Esta es un área muy pequeña, limitada por el sistema curvilíneo Atacama-Manto Verde, el cual podría estar relacionado con la actividad sísmica superficial, no como estructura sino como divisoria de unidades diferentes, ya que se observa una disminución notable del número de sismos hacia el interior del continente, figura 4.

5.3. - ZONA SUR

5.3.1. - AREA DE PRECORDILLERA

Se desarrolla hacia el Oeste de la megaestructura Copiapó-Bermejo-Desaguadero. Su característica principal la constituye el sistema compresivo conocido como Provincia Geológica Precordillera.

Esta Area está limitada por megaestructuras que sirven de límite a la actividad sísmica localizada entre 70 y 150 Km de profundidad focal, siendo además notoria la ausencia de volcanes.

5.3.2. - AREA DE COPIAPO-ILLAPEL

Se extiende al oeste del Area de Precordillera, desde Copiapó hasta Illapel. Morfológicamente se caracteriza, a diferencia de sus límites norte y sur, por la ausencia de un valle central definido.

La actividad sísmica se ubica, casi totalmente, en el borde continental estando sus hipocentros localizados, en su mayoría, entre 0 y 70 Km de profundidad.

5.3.3. - AREA DE SANTIAGO-VALPARAISO

Esta Area, ubicada directamente al sur de la anterior, presenta una mayor densidad de eventos sísmicos superficiales como así también de aquellos ubicados entre 70 y 150 Km de profundidad focal.

El límite de esta área, que es la megaestructura Choapa-Tunuyán, constituye el nuevo comienzo del vulcanismo activo, que había desaparecido al sur del sistema Copiapó-Bermejo-Desaguadero.

5.3.4. - AREA DE LAS SIERRAS DE CORDOBA Y SAN LUIS

Se ubica al este del Area Precordillera. Geológicamente constituye una unidad de basamento bien definida.

Presenta un moderado nivel de actividad sísmica normal, caracterizado por eventos con profundidad focal de alrededor de 200 Km.

Sin embargo, existen antecedentes de terremotos destructivos de mediana magnitud y muy localizados en sus efectos.

5.3.5. - AREA DE LA RIOJA - CATAMARCA

Esta pequeña área, ubicada entre los sistemas Ambato y Ansilta-Salinas Grandes, se considera como una unidad individual por mostrar algunas particularidades respecto a sus vecinas.

El nivel de actividad sísmica es bastante bajo y, además, a diferencia de las áreas que le sirven de límite norte, sur y oeste, no presenta sismos con profundidades focales superiores a los 70 Km.

5.3.6. - AREA DE MENDOZA SUR

Se ubica al este del sistema Río Vacas-Tupungato, el cual muestra un notable cambio en el nivel de actividad sísmica, tanto para sismos superficiales como para aquellos de profundidad intermedia, donde el fenómeno es más marcado.

6. - AREA DE PRECORDILLERA

Esta Area Sismotectónica, identificada con el número 9 en la figura 13, localizada dentro de la Zona Sur, será analizada en detalle, en forma preliminar, con el objeto

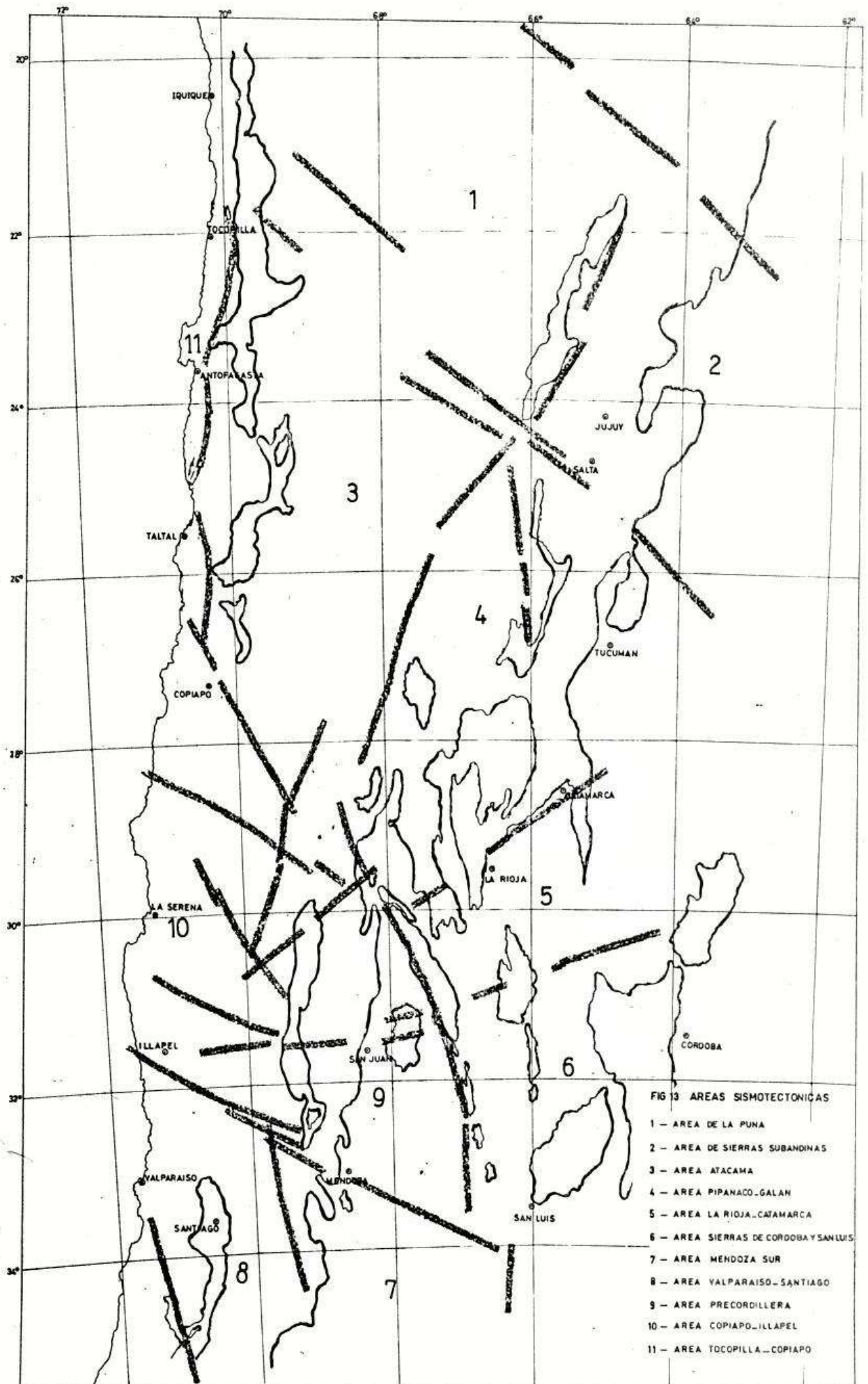


FIG 13 AREAS SISMOTECTONICAS

- 1 - AREA DE LA PUNA
- 2 - AREA DE SIERRAS SUBANDINAS
- 3 - AREA ATACAMA
- 4 - AREA PIPANACO-GALAN
- 5 - AREA LA RIOJA-CATAMARCA
- 6 - AREA SIERRAS DE CORDOBA Y SAN LUIS
- 7 - AREA MENDOZA SUR
- 8 - AREA VALPARAISO-SANTIAGO
- 9 - AREA PRECORDILLERA
- 10 - AREA COPIAPO-ILLAPEL
- 11 - AREA TOCOPILLA-COPIAPO

de mostrar la secuencia en que se desarrollarán las investigaciones futuras en cada una de las Areas descritas, teniendo como meta la ubicación de estructuras sísmicamente activas, que constituyen fuentes potenciales de actividad sísmica, determinando en cada una de ellas los parámetros de sismicidad correspondientes.

El Area de Precordillera está integrada por varias provincias geológicas, de acuerdo con el concepto que las define como regiones con características sedimentológicas y estructurales propias. De estas podemos distinguir, configurando relieves positivos aflorantes, las siguientes unidades: Sierras Pampeanas, Sistema de Famatina, Precordillera, Cordillera y Cordillera de la Costa (figura 15); mientras que los relieves deprimidos se encuentran, en su mayoría, cubiertos por sedimentos terciarios y cuaternarios de espesores considerables. Estos últimos constituyen, generalmente, formas alargadas en sentido meridiano, siendo las mas representativas las depresiones de Mascasín-Bebedero, Río Bermejo-Río Desaguadero y, configurando una gran cuenca intermontana, la depresión Río Blanco-Uspallata, que separa dos ambientes geológicos diferentes.

Con el objeto de identificar las zonas de fallamiento moderno y encuadrarlas dentro de un contexto geológico estructural de características regionales, se ubicaron las principales megaestructuras del Area, las provincias geológicas y las formas fisiográficas mayores de un paisaje de cuenca intermontana, señalándose además las zonas de cultivo y poblaciones (figura 15). En ese mapa base se volcó la información de fallamiento que, siguiendo criterios geomorfológicos y datos de desplazamiento ocurridas en sismos históricos, se clasificaron como pertenecientes al Holoceno o Pleistoceno reciente. La información se obtuvo de la revisión de fotos aéreas convencionales, reconocimientos aéreos con bajo ángulo del sol y recopilación bibliográfica.

En estos trabajos preliminares no se realizó una datación y estudio del fallamiento para establecer una clasificación temporal y estructural del mismo, limitándose esta primera fase a la simple ubicación del fenómeno. No obstante la distribución del fallamiento está bien definida areal y

estructuralmente, programándose para el futuro mediante estudios de mayor detalle, una división en sub-provincias estructurales, según los tipos de fallamiento presente y edades de los mismos.

Es importante destacar que las distribuciones de la sismicidad superficial y de los terremotos destructivos en el Area de Precordillera no están uniformemente distribuidos en superficie, sino que presentan una tendencia a localizarse en el sector sur de dicha Area, a partir del sistema de fracturación Ansilta-Salinas Grandes, como puede observarse en las figuras 7 y 13. A su vez, como se muestra en la figura 15 los fenómenos de fallamiento moderno, que afectan principalmente los piedemontes, quedan llamativamente localizados en el mismo sector sur, donde existe una densificación de la fracturación, generalmente de tipo inverso. Por otra parte, en los bordes del Valle Uspallata-Río Blanco se detectan fenómenos de fallamiento normal con componentes de rumbo, cuyas manifestaciones geomórficas son muy notorias evidenciando sucesivos movimientos en los últimos miles de años.

6 - CONCLUSIONES

Del estudio de las características sísmicas, tectónicas y morfológicas efectuado para la región de América del Sur comprendida entre los 20 y 34° de latitud, se han obtenido las siguientes conclusiones:

a) Existe una marcada falta de uniformidad en la distribución de la actividad sísmica, tanto en lo referente a la ubicación de los epicentros como así también en profundidad, habiéndose localizado las áreas anómalas, entendiéndose como tales aquellas que presentan un exceso o un defecto notable de eventos sísmicos respecto a lo que puede considerarse como un valor normal.

b) Se han encontrado patrones regionales que rigen los grandes fenómenos morfoestructurales, llegándose a determinar tres dominios tectónicos.

c) El análisis conjunto de los puntos mencionados anteriormente ha permitido encontrar con distintos grados de corres-

pondencia,, una relación entre las grandes estructuras y la localización de eventos sísmicos, especialmente en lo referente a la separación de ambientes con diferentes niveles de actividad sísmica. Esta diferenciación se acentúa cuando se analizan los terremotos destructivos históricos.

d) Se ha observado que las grandes estructuras también delimitan los ambientes volcánicos, especialmente los de edad cuartaria.

e) En base a la combinación de estos criterios generales se ha establecido una división preliminar de la región en once Areas Sismotectónicas. El número y/o los límites de tales áreas podría modificarse en el futuro, a medida que se tenga mayor información sobre la distribución de la sismicidad y del fallamiento moderno en cada una de ellas.

f) Como ejemplo de la metodología a emplear para el análisis detallado de cada Area, se ha estudiado en forma preliminar el Area de Precordillera. En ella se ha localizado algunos de los sectores que presentan fenómenos de fallamiento moderno.

Dichos sectores, en un programa actualmente en desarrollo, serán revisados en mayor detalle, con el objeto de determinar los parámetros sísmicos asociados a cada estructura y finalmente poder estimar los valores de riesgo sísmico en cualquier punto de la región estudiada.

T A B L A 1

TERREMOTOS HISTORICOS DESTRUCTIVOS

FECHA	LAT.	LONG.	MAGNITUD	T E R R E M O T O	FUENTE DE DATO
13-05-1647			8-8.5	Santiago	2.4
13-09-1692	25.3	64.8	7.3	Talavera de Esteco (Salta)	1
08-07-1730			8.5	Valparaiso	2.4
22-05-1782	32.7	69.2	6.5	Santa Rita (Mendoza)	1
30-03-1796			7.5-8.0	Copiapó	2.3.4
03-04-1819	27.4	71.2	8.0-8.5	Copiapó	2.3.4
19-11-1822	33.0	72.0	8.0-8.5	Valparaiso	2.3.4
19-01-1826	26.1	65.2	6.0	Trancas (Tucumán)	1
18-10-1844	24.8	64.7	6.5	Salta	1
08-03-1847				La ligua	2.4
05-10-1859			7.5	Copiapó	2.3.4
20-03-1861	32.9	68.9	7.0	Mendoza	1
24-08-1869			7-7.7	Pisagua	2.3
05-10-1871			7-7.5	Iquique	2.3.4
22-10-1871	23.2	64.5	6.5	Orán (Salta)	1
09-05-1877	19.5	70.7	8.0	Iquite-Pisagua	2.3.4
15-08-1880	31.5	71.5	7.5-8.0	Illapel	2.3.4
27-10-1894	30.5	68.4	8.2	Argentino	1
12-08-1903	32.1	69.1	6.3	Mendoza	1
16-08-1906	33.0	72.0	8.6	Valparaiso	2.3.4.5
26-07-1917	32.3	68.9	6.5	Mendoza	1
18-12-1918	27.4	71.0	7.5	Copiapó	3
17-12-1920	32.7	68.4	6.3	Costa de Araujo(Mendoza)	1
10-11-1922	28.5	71.0	8.4	Vallenar	5.6.7.9
14-04-1927	32.4	69.3	7.4	Mendoza	1
01-12-1928	35.0	72.0	8.4	Talca	5.6.7.9
30-05-1929	34.9	68.0	6.5	Sur Mendocino(Mendoza)	1
24-12-1930	24.7	66.3	6.0	La Poma (Salta)	1
11-06-1934	33.7	64.5	6.0	Sampacho (Córdoba)	1
22-05-1936	32.5	65.0	6.2	San Francisco (San Luis)	1
03-07-1941	31.7	67.9	6.7	Caucete (San Juan)	1
06-04-1943	30.7	72.0	8.3	Illapel	5.6.7.9

FECHA	LAT.	LONG.	MAGNITUD	T E R R E M O T O	FUENTE DE DATO
15-01-1944	31.4	68.4	7.8	San Juan	1
25-08-1948	24.9	64.8	7.0	Salta	1
11-06-1952	31.7	68.9	7.0	La Rinconada (San Juan)	1
19-04-1955	30.0	72.0	7.10	La Serena	5.6.8.9
24-10-1957	28.9	68.0	6.0	Villa Castelli(La Rioja)	1
04-09-1958	33.8	70.2	6.9		5.6.9
12-05-1959	23.2	64.7	6.8	San Andrés (Salta)	1
28-03-1964			7.5	La Ligua	
28-03-1965	32.4	71.2	7.4		5.6.8
28-12-1966	25.5	70.7	7.5	Taltal	6.8
29-11-1973	24.8	64.6	6.1	Salta	1
17-08-1974	23.3	64.4	5.0	Orán (Salta)	1
23-11-1977	31.3	67.7	7.4	Caucete (San Juan)	1

FUENTES DE DATOS

- 1 - CASTANO, J.C. - ZAMARBIDE, J.L.: "Determinación de los Coeficientes Sísmicos Zonales para la República Argentina"
Publicación Técnica N° 6 - INPRES -1978.
- 2 - MONTESSUS de BALLONE, F.: "Historia Sísmica de los Andes Meridionales" - Santiago - Chile.
- 3 - LOMNITZ, C.: "Grandes Terremotos en Chile" -
Revista Geofísica Panamericana-Vol.1-Año I
- 4 - GREVE, F.: "Historia de la Sismología en Chile - Instituto de Geofísica y Sismología - Universidad de Chile - 1954.
- 5 - LORCA, E.: 1972
- 6 - U.S.Coast and Geodetic Survey
- 7 - GUTEMBERG, B. and RICHTER, C.P. - 1954
- 8 - International Seismological Center
- 9 - MUÑOZ, M.I. Y LOMNITZ - 1968.

B I B L I O G R A F I A

- 1 - SALFITY, José A. "Consideraciones sobre la evolución geológica del Precámbrico y Paleozoico del Norte Argentino" Actas II Congreso Iberoamericano de Geología Económica - Tomo IV - págs. 341-353 - Buenos Aires 1975.
- 2 - BALDIS, Bruno, "Geotectónica de la comarca comprendida entre el cratógeno central argentino y el borde austral de la Puna" - Actas II Congreso Iberoamericano de Geología Económica - Tomo IV-págs. 25-44 - Buenos Aires 1975.
- 3 - CASTANO, Juan Carlos, "Zonificación Sísmica de la República Argentina" - Publicación Técnica N° 5 -INPRES - Noviembre 1977.
- 4 - CHINN, S. Douglas, "High - frequency seismic wave propagation in western South America along the continental margin, in the Nazca plate and across the Altiplano" - Geophys J.R. astr. Soc. (1980) 60, 209-244.
- 5 - GANSSER, Augusto, "Facts and theories on the Andes" - J1 geol. Soc. Lond. - Vol. 129 - 1973 - págs. 93-131 figs. Printed in Northern Ireland.
- 6 - LLAMBIAS, Eduardo J., "Metalogeneses asociada a los plutones graníticos de la Cordillera Frontal, entre Quebrada de Agua Negra y Río Castaño, San Juan" - Revista de la Asociación Geológica Argentina - Tomo XXI N° 4, diciembre 1966 - págs. 239-261.
- 7 - Antecedentes Históricos Sismológicos de la Provincia de Salta Archivo y Biblioteca Históricos - Salta.
- 8 - OMARINI, R.H., "Estudio Isotopico Rb - Sr de la Faja Erup-tiva de la Puna a los 22° 35' LS, Argentina".
- 9 - ORTIZ, Apolo, "Evolución Geomórfica de los Ríos Mendoza y Tunuyán" - Instituto de Investigaciones Mineras - Universidad Nacional de San Juan - San Juan 1977.
- 10 - MON, Ricardo, "La tectónica del borde oriental de los An-des en las Provincias de Salta, Tucumán y Catamarca Ar-gentina". Revista de la Asociación Geológica Argentina - Tomo XXXI (2): 65-72, 1976.
- 11 - SLEMMONS, David B., "Fault Activity and Seismicity near the Los Alamos Scientific Laboratory Geothermal Test Site, Jemez Mountains, New Mexico. Energy Research and Development Administration Informal Report.

- 12 - MENDEZ, Vicente, "Estructuras de las Provincias de Salta y Jujuy a partir del Meridiano 65° 30', hasta el límite con las Repúblicas de Bolivia y Chile" - Revista de la Asociación Geológica Argentina - Tomo XXIX N° 4, Diciembre 1974-págs. 391-424.
- 13 - OMARINI, Ricardo, "Perfil Geológico Tacuil-Cerro Blanco Salta-Argentina" - Suplemento del Acta Geológica Lilloana - Tomo 14 - Tucumán 1978.
- 14 - CUERDA, Alfredo, "Condiciones Geológicas de los Depósitos Cuaternarios al Sur de Jáchal - Provincia de San Juan".
- 15 - HEIM, Arnold, "Observaciones Tectónicas en la Rinconada Precordillera de San Juan" - Boletín N° 64 - Dirección de Minas y Geología - Secretaría de Industria y Comercio de la Nación - Buenos Aires 1948.
- 16 - PASOTTI, Pierina, "Aporte a la geología de las Sierras Pampeanas de la Provincia de Catamarca" - Publicación LIX - Instituto de Fisiografía y Geología "Dr. Alfredo Castellanos" - Universidad Nacional de Rosario - 1975.
- 17 - BARAZANGI, Muawia-ISACKS, Bryan, "Subduction of the Nazca Plate beneath Perú: evidence from spatial distribution of earthquakes" - Geophys J.R. astr.Soc.(1979) 57, 537-555.
- 18 - ISACKS, Bryan - BARAZANGI, Muawia, "Geometry of Benioff zone: Lateral Segmentation and Downwards Bending of the subducted Lithosphere" - Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back - Arc Basins - American Geophysical Union - Vol I - 1977.
- 19 - BARAZANGI, Muawia - ISACKS, Bryan, "Spatial distribution of earthquake and Subduction of the Nazca Plate beneath South America" - Department of Geological Sciences, Cornell University, Ithaca, New York - Vol 4 págs.686 - 692, 1976.
- 20 - BALDIS, Bruno A., "Geotectónica de la Cordillera Oriental, Sierras Subandinas y comarcas adyacentes". Actas VI Congreso Geológico Argentino, Tomo I - Buenos Aires 1976, págs. 3-23.
- 21 - GRANT, Terry and CLUFF, Lloyd, "Radar Imagery in Defining Regional Tectonic Structure" - Annual Review of earth

- and Planetary sciences. Vol. 4, 1976 - págs. 123-145.
- 22 - BALDIS, Bruno A., "Análisis Estructural de la comarca sísmica de San Juan" - Asociación Geológica Argentina - Revista XXXIV (4) - págs. 294-310. 1979.
- 23 - VELASCO CLAURE, Hernan, "Mineralización de los Andes Bolivianos con relación a la Placa de Nazca" - Serie Sensores Remotos 4, Memoria explicativa, Corporación Mi-
nera de Bolivia - Observatorio San Calixto - 1979.
- 24 - Karzulovic, Juan, "Caracterización Geomorfológica de Chile Central y su aplicación a la zonificación sísmica" - Segundas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica - Vol. I. Chile 1976.
- 25 - MINAYA RAMOS, Este, "Relaciones Físico-Química de la Placa de Nazca y el emplazamiento de Yacimientos Minerales" Tesis de Grado-Publicación N° 32, Observatorio San Calixto - Universidad de San Andrés - La Paz - Bolivia 1978.
- 26 - SALFITY, José Antonio, "Estratigrafía de la Formación Lecho (Cretácico) en la cuenca andina del Norte Argentino" - Tesis Doctoral - Universidad Nacional de Salta - Argentina 1980.
- 27 - CAMINOS, Roberto, "Geología de la vertiente oriental del cordón del Plata, Cordillera Frontal de Mendoza". Revista de la Asociación Geológica Argentina-Tomo XX, N° 3, 1965, págs. 351-392.
- 28 - TURNER, Juan Carlos, "Perfil Transversal de La Puna" - Acta Geológica Lilloana, Tomo VII - págs. 356-378 - Tucumán-Argentina.
- 29 - MENDEZ, Vicente, "Geología de la comarca de Mina "Aguilar" y alrededores - Departamento Humahuaca - Jujuy" - Revista de la Asociación Geológica Argentina - Tomo XXVIII, N° 4, 1973 - págs. 319-330.
- 30 - ZANETTINI, Juan Carlos, "Geología de la comarca de Abra Pampa y Tres Cruces Provincia de Jujuy" - Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo XXVIII, N° 4, 1973, págs. 331-340.
- 31 - AMENGUAL, Rodolfo, "Geología de la comarca de Cianzo y Caspala - Jujuy" - Revista de la Asociación Geológica Argentina - Tomo XXVIII, N° 4, 1973, págs. 341-352.

- 32 - AMENGUAL, Rodolfo, "Geología de la Quebrada de Humahuaca entre Uquía y Purmamarca - Jujuy" - Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo XXIX, N° 1, 1974, págs. 30-40.
- 33 - MON, Ricardo, "Geología de la comarca del Cerro Remate (Provincia de Salta, Tucumán y Santiago del Estero y nuevos datos sobre la distribución del Paleozoico Inferior en el Noroeste Argentino" - Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo XXIX, N° 1, 1974 - págs. 61-74.
- 34 - KOUKHARSKI, Magdalena, "Nuevas evidencias del vulcanismo ordovícico en La Puna" - Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo XXIV, N° 1, 1974-págs. 128-134.
- 35 - FRANCIS, P.W. - HAMMILL, M., "The Cerro Galan Caldera, North West Argentina and its tectonic setting". Earth Science Department, The Open University, Milton Keynes, Buckinghamshire.
- 36 - MON, Ricardo, "Esquema tectónico de los Andes del Norte Argentino" - Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo XXXIV, N° 1, págs. 53-60.
- 37 - VILELA, César R., "Los Períodos eruptivos en la Puna de Atacama" - Revista de la Asociación Geológica Argentina, Tomo VIII, N° 1, 1953, págs. 1-35.
- 38 - WALPET-Jack, L., "Plate Tectonics and Earthquake Assessment" - Report N° 5, 1976, State of the Art for Assessing earthquake hazards in the United States.
- 39 - "Rasgos Tectónicos del Embalse del Río Tercero" - Boletín N° 5 Instituto de Investigaciones Geológicas, Universidad Nacional de San Juan - 1979 - Argentina.
- 40 - ROCA, Juan Angel, "Geología de los Valles de Tulum y Ullum-Zonda - Provincia de San Juan" - Consejo Federal de Inversiones - Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo - Diciembre 1969 - Argentina.
- 41 - CASTANO, Juan Carlos y Otros, "Superficies de focos de sismos, su distribución, su liberación de energía y un análisis estadístico del proceso al Sur de los 12° de latitud Sur" - Simposio sobre los resultados de investigaciones del manto superior con énfasis en América Latina, Tomo II, 1970, págs. 131-143.

- 42 - DEZA, M.E., "Zonas de transición sismotectónica en Sudamérica, Estudio Preliminar de la zona de transición en el Perú" - Simposio sobre los resultados de investigaciones del manto superior con énfasis en América Latina, Tomo II, 1970-págs. 143-157.
- 43 - PICHLER, H., "Chilean Andesites, Crustal or Mantle derivation" - Simposio sobre los resultados de investigaciones del Manto Superior con énfasis en América Latina, Tomo II, 1970, págs. 361-373.
- 44 - SAAVEDRA, M.A., "Resúmen de la actividad ígnea en Bolivia" - Simposio sobre los resultados de Investigaciones del Manto Superior con énfasis en América Latina, Tomo II, 1970, págs. 375-381.
- 45 - ARABASZ, W.J., "Tectonics of Northern Chile as reflected by the Atacama Fault System" - Simposio sobre los resultados de Investigaciones del Manto Superior con énfasis en América Latina, Tomo II, 1970-págs. 443-445.
- 46 - FRUTOS, J., "Ciclos Tectónicos sucesivos y direcciones estructurales sobreimpuestas en los Andes del Norte Grande de Chile" - Simposio sobre los resultados de investigaciones del Manto Superior con énfasis en América Latina, Tomo II, 1970-págs. 473-485.
- 47 - GLASS, C.E., and SLEMMONS, D.B., "Imagery in Earthquake Analysis" . State of the Art for Assessing earthquake Hazards in the United States, Report II, 1978.
- 48 - PETERSON, Frederick, "Landforms of the Basin and Range Province" - Technical Bulletin 28, Nevada Agricultural Experiment Station - College of agriculture - University of Nevada, Reno, 1981.
- 49 - PERUCCA, Juan Carlos, "Carta Geotectónica de Cuyo" - Boletín N° 4 - Instituto de Investigaciones Geológicas - Universidad Nacional de San Juan, 1979.
- 50 - SLEMMONS, David B., "Faults and Earthquakes Magnitude" Report N° 6. State of the art. for assessing earthquakes Hazards in the United States, 1977.
- 51 - WOODWARD - CLYDE CONSULTANTS, "Earthquake Evaluation Studies of the Auburn Dam Area", 1977.

- 52 - TRIEP, Enrique G., "Source Mechanism of San Juan Province Earthquake, 1977" - Vol. 15, 1979, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, Ministry of Construction-Japón.
- 53 - ARABASZ, Walter, "Geologic Structure of the Taltal Area, Northern Chile, in Relation to the Earthquake of December 28, 1966" - Bulletin of the Seismological Society of America - June 1968 - N° 3 págs. 835-843.
- 54 - LEMKE, Richard W., "Geologic and Related Effects of the Taltal Earthquake, Chile of december 28-1966" - Bulletin of the Seismological Society of America - June 1968, N° 3 págs. 843-851.
- 55 - CASERTANO, Lorenzo, "General Characteristics of active Andean volcanoes and a summary of their activities during Recent Centuries" - Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 53, N°6-págs.1415-1433 - december 1963.
- 56 - KRINITZSKY, E.L., "Fault Assessment in Earthquake Engineering" - Repor 2. State of the art for assessing Earthquake Hazards in the United States, may. 1974.
- 57 - "Geomorphic Applications in Engineering Geology" a State of the art short course - California State University - November 1979.
- 58 - INPRES - "Informe de validación: Estudio desde el punto de vista sísmico de la zona de ubicación de la Central Nuclear Embalse - Córdoba - San Juan, Marzo 1980.
- 59 - VOLPONI, F., "Riesgo Sísmico en el territorio argentino" Anales de la Sociedad Científica Argentina - Serie II, N° 42, 1976.
- 60 - BARRIENTOS, S.E., "Regionalización Sísmica de Chile" - Tesis de grado - Universidad de Chile-Santiago, 1980.
- 61 - CARMONA, J. y CASTANO, J.C., "Análisis de la intensidad y Riesgo Sísmico en el Hemisferio Austral de América del Sur, en el intervalo 1961-1968" - I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica-1969-Lima, Perú.
- 62 - EYALL, Alan, "Seismicity, Tectonism, and Surface Faulting in the Western United States during historic time". Bulletin of the Seismological Society of America,

- Vol. 56-N° 5- págs. 1105-1135-1966.
- 63 - HARRINGTON, Horacio, "Deep focus earthquake in South America and their possible relation to continental Drift" - Tennessee Overseas Company, Houston, Texas.
- 64 - WALLACE, Robert, "Patterns of faulting and seismic gaps in the great basin Province" - Proceedings of Conference VI Methodology for Identifying seismic gaps and soon to - Break Gaps - 1978.
- 65 - WALLACE, Robert, "Profiles and ages of young fault scarps, north central Nevada" - Geological Society of America Bulletin, Vol. 88, págs. 1267-1281, 1977.
- 66 - WALLACE, Robert, "Geometry and Rates of change of fault-generated range fronts, North Central Nevada" - Jour Research U.S.Geol.Survey-Vol. 6, N° 5-1978, págs. 637-650.
- 67 - BUCKNAM, R.C., "Estimation of fault-scarp ages from a scarp-height angle relationship" - Geology-Vol.7 - págs. 11-14 - 1979.
- 68 - SLEMMONS, D.B., "Pliocene and Quaternary Crustal Movements of the basin and range province, U.S.A." - Journal of Geoscience, Osaka, City University, Vol. 10- Art. 1-11-1967.
- 69 - CASTANO, J.C. y BASTIAS, H., "Estudio de la Sismicidad y Evaluación del Riesgo Sísmico en el sitio de Emplazamiento de la Presa El Tunal" - XI Reunión Científica de la AAGG - Tucumán 1980.

PODER EJECUTIVO NACIONAL
MINISTERIO DE OBRAS Y SERVICIOS PUBLICOS
SUBSECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS

INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCION SISMICA
INPRES

EL SISMO DE TUCUMAN DEL
9 DE MAYO DE 1981

Trabajo realizado por: Ing. Juan C. CASTANO, Ing. Alejandro GIULIANO,
Lic. Mario ARAUJO, Ing. Mario A. BUFALIZA,
Lic. Hugo BASTIAS, pertenecientes al INPRES.

SAN JUAN, OCTUBRE DE 1981.

I N D I C E

- I - INTRODUCCION.
- II - CONSIDERACIONES GEOLOGICO-ESTRUCTURALES.
- III - ANTECEDENTES SISMICOS DE LA ZONA.
- IV - SISMO PRINCIPAL Y REPLICAS.
- IV.1 - SISMO PRINCIPAL.
- IV.2 - REPLICAS.
- IV.3 - MAGNITUD.
- V - DISTRIBUCION DE INTENSIDADES.
- VI - ESPECTRO DE RESPUESTA.
- VII - CONCLUSIONES.

L I S T A D E F I G U R A S

- 1 - MAPA GENERAL DE UBICACION E INTERPRETACION SATELITARIA DE LA REGION EPICENTRAL.
- 2 - DISTRIBUCION DE LA ACTIVIDAD SISMICA EN LA ZONA ESTUDIADA.
- 3 - DISTRIBUCION DE INTENSIDADES. SISMO DE TUCUMAN DEL 9 DE MAYO DE 1981.
- 4 - ACELEROGRAMAS OBTENIDOS EN LA CIUDAD DE TUCUMAN.
- 5 - ESPECTROS DE ACELERACIONES. COMPONENTE TRANSVERSAL.
- 6 - ESPECTROS DE ACELERACIONES. COMPONENTE LONGITUDINAL.
- 7 - ESPECTROS DE ACELERACIONES. COMPONENTE VERTICAL.
- 8 - ESPECTROS DE VELOCIDADES. COMPONENTE TRANSVERSAL.
- 9 - ESPECTROS DE VELOCIDADES. COMPONENTE LONGITUDINAL.
- 10 - ESPECTROS DE VELOCIDADES. COMPONENTE VERTICAL.
- 11 - ESPECTRO NORMALIZADO DE DISEÑO.

EL SISMO DE TUCUMAN DEL 9 DE MAYO DE 1981

I - INTRODUCCION

El mapa de zonificación sísmica de la República Argentina, actualmente vigente en las Normas Sismorresistentes NAA-80, ubica a la provincia de Tucumán dentro de la zona 2, asignándole un coeficiente sísmico zonal, $C_0 = 0,050$.

Históricamente esta área no ha sufrido las consecuencias de un terremoto de gran destructividad, destacándose solamente dos sismos de mediana intensidad, en uno de los cuales el máximo valor en la zona epicentral podría haber alcanzado los VIII grados de la escala Mercalli Modificada.

El sismo del 9 de mayo ocurrió en el extremo noreste de esta provincia, zona que se ha caracterizado por una actividad moderada y predominantemente superficial, lo que estaría relacionado posiblemente con fallamientos modernos.

En el presente trabajo se describen las principales características de este evento, determinadas a partir de los registros de las estaciones sismológicas y de los acelerógrafos que el INPRES tiene instalados en distintos puntos del territorio nacional.

II - CONSIDERACIONES GEOLOGICO-ESTRUCTURALES

El área epicentral del sismo del 9 de mayo se encuentra ubicada en el extremo austral de la unidad geomorfológica Sierras Subandinas. Dicha unidad constituye una zona de plegamiento complejo en forma alargada, que se extiende desde los 14° de Latitud Sur hasta las proximidades de la ciudad de Tucumán. El estilo estructural y la estratigrafía no se mantienen uniformes a lo largo del conjunto, observándose una omisión de secuencias sedimentarias más antiguas de Sur a Norte.

En la literatura geológica existe una tendencia a dividir dicha unidad en tres sectores, a saber: Comarca Boreal, ubicada al norte del Río Bermejo; Comarca Central, la cual se inicia en las Sierras de Santa Bárbara y llega hasta el Río Juramento y Comarca Austral que comprende las Sierras Colorada y el Grupo Candelaria-Medina, conocidas en conjunto con el nombre de Sierras Subandinas Tucumanas. Es-

te último sector es el que se analiza en el presente informe. Morfológicamente las podemos separar en dos grupos; uno al norte del Río Horcones que corresponde a las Sierras Coloradas, de relieve suavizado y de relativamente poca extensión y el otro, hacia el Sur, que comprende a un grupo de mayor desarrollo tanto en altitud como en extensión, que incluye a las sierras de La Candelaria, Cumbres del Yaramí, sierras de Medina, sierra del Nogalito, sierras de La Ramada y de Las Botijas; estas dos últimas separadas de las anteriores por la depresión del Arroyo Sucio y Río Chorillos.

Geológicamente, siguiendo el patrón primario para el sistema subandino, el primer grupo se caracteriza por afloramientos del Triásico y, en menor proporción, por la presencia de sedimentitas Cámbricas del Grupo Mesón. El otro sistema serrano, a diferencia del anterior, presente extensos afloramientos de metamorfitas precámbricas y de la sucesión stratigráfica superior, en especial de la Era Mesozoica.

Por otra parte, el mencionado Río Horcones corresponde a una manifestación superficial de un sistema estructural de características continentales, que coincide, además, con una variación en el nivel de actividad sísmica, el cual puede apreciarse con mayor nitidez en la zona de la Puna y que podría corresponder a la separación de dos regiones sísmicas diferentes en el ambiente subandino.

A efectos de localizar las posibles fuentes de actividad sísmica, relacionadas con fenómenos de fracturación superficial, se analizaron imágenes Landsat en falso color y en bandas 5 y 7. En dicho análisis, se localizaron en la zona pedemontana occidental de las Sierras de Candelaria, cumbres de Yaramí y Sierras de Medina, lineamientos que afectan a los conos de deyección cuaternarios y que posiblemente se correspondan con fenómenos de fracturación ocurridos en los últimos dos millones de años (figura 1).

Asimismo se observaron rasgos lineales en el piedemonte desarrollados en el faldeo oriental de las sierras de Castillejas, cerca de las localidades de Lagunilla y Tacurus.

La relación entre la sismicidad superficial y los

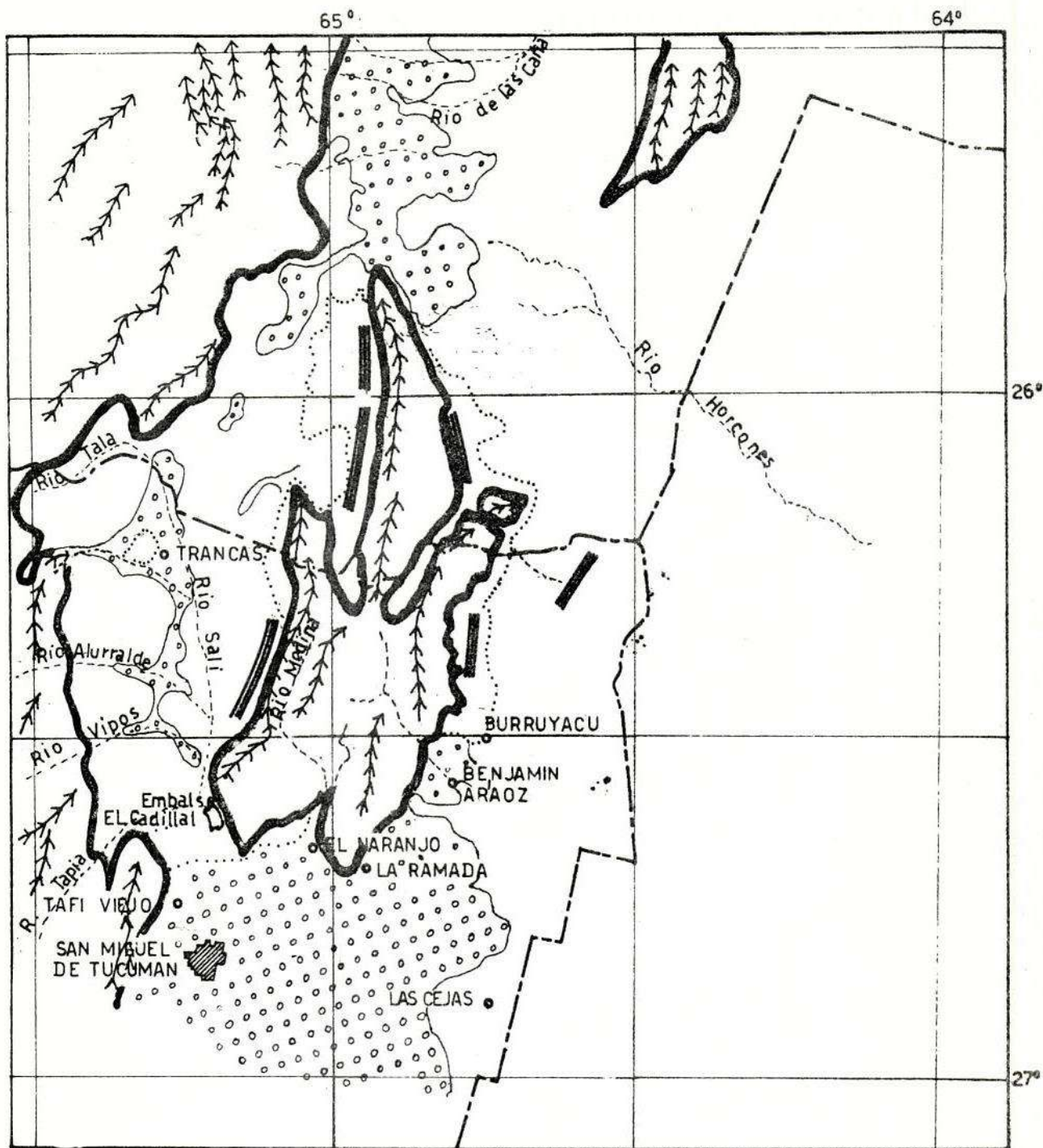


Fig. 1 MAPA GENERAL DE UBICACION E INTERPRETACION SATELITARIA DE LA REGION EPICENTRAL

- | | | | |
|---|------------------------|---|--------------------|
|  | Eje de sierras |  | Cultivos |
|  | Area positiva-negativa |  | Fracturas - fallas |
|  | Contacto roca-aluvión | | |

rasgos lineales será motivo de un futuro estudio detallado, para localizar posibles fuentes potenciales de actividad que ocasionen movimientos de tierra con características destructivas.

III - ANTECEDENTES SISMICOS DE LA ZONA

En lo referente específicamente al área donde se produjo el sismo del 9 de mayo de 1981, existen antecedentes de por lo menos dos eventos que produjeron daños materiales, cuyos epicentros estimados se muestran en la figura 2. El primero de ellos ocurrió el 19 de enero de 1826 produciendo los mayores daños en Candelaria, Trancas, Zárate y El Tala, donde resultaron muertas dos criaturas. En esta área la intensidad debe haber alcanzado el grado VIII de la escala Mercalli Modificada. Este sismo, según los relatos de la época, fue sentido bastante fuerte en Santiago del Estero y algo más intenso en la ciudad de Tucumán. La reducida zona de daños y la elevada intensidad en el área epicentral podrían corresponder a un terremoto de mediana magnitud pero muy superficial.

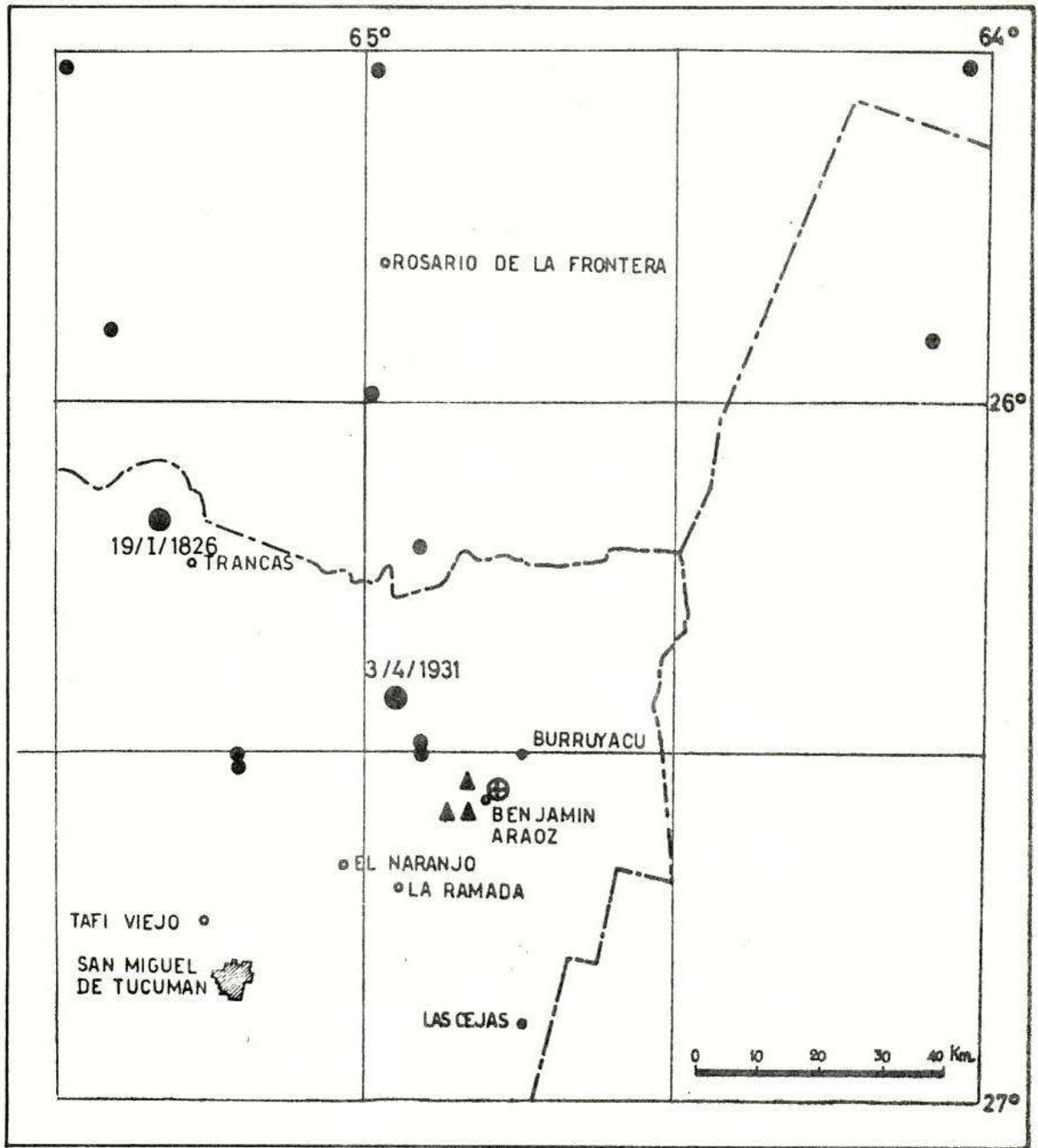
El otro evento sísmico de importancia, con epicentro en esta zona, ocurrió el 3 de abril de 1931, afectando principalmente a las poblaciones de El Naranjo, el Sunchal y Burruyacú, donde los daños consistieron en la caída de algunos techos y en el agrietamiento de paredes, lo que correspondería a una intensidad máxima de VII grados en la escala Mercalli Modificada.

En lo referente a sismos cuya ubicación ha sido determinada a partir de los registros de las estaciones sismológicas, (Boletines sismológicos del USGS, ISS, BCIS, INPRES, CERESIS), la actividad en esta área ha sido bastante moderada como puede observarse en el mapa de la figura 2, correspondiente al intervalo 1920-1980.

IV - SISMO PRINCIPAL Y REPLICAS

4.1 - Sismo Principal

Para la determinación del Tiempo Origen, de las coordenadas epicentrales, de la profundidad del foco y de la magnitud, se utilizaron los datos obtenidos de los registros de las estaciones sismológicas que se detallan en la Tabla 1.



REFERENCIAS

- ⊕ Sismo principal del 9 de mayo de 1981
- ▲ Réplicas mas importantes
- Sismos destructivos en la zona.
- Sismos registrados entre 1920 y 1980

Fig 2 DISTRIBUCION DE LA ACTIVIDAD SISMICA EN LA ZONA ESTUDIADA

T A B L A 1

ESTACIONES UTILIZADAS EN DETERMINACIONES DE HIPOCENTROS

SISMO	ESTACION	UBICACION	TIEMPO DE ARRIBO	
			ONDA P	ONDA S
P R I N C I P A L	SLA	SAN LORENZO (SALTA)	09 ^h 51' 12".0	
	CYA	CHOYA (CATAMARCA)	09 ^h 51' 13".0	09 ^h 51' 38".4
	VCA	VINCHINA (LA RIOJA)	09 ^h 51' 36".8	09 ^h 52' 19".3
	TCA	TANTI (CORDOBA)	09 ^h 51' 49".8	
	EAS	PARANA MEDIO(STA.FE)	09 ^h 52' 01".3	09 ^h 53' 01".3
	CFA	C°PIE DE PALO(SAN JUAN)	09 ^h 52' 04".0	09 ^h 53' 06".7
	RTL	C°VILLICUM (SAN JUAN)	09 ^h 52' 03".2	
	RTC	C°VALDIVIA (SAN JUAN)	09 ^h 52' 08".8	
REPLICA N°1	SLA	SAN LORENZO (SALTA)	10 ^h 05' 46".0	
	CYA	CHOYA (CATAMARCA)	10 ^h 05' 47".0	
	VCA	VINCHINA (LA RIOJA)	10 ^h 06' 07".6	
	TCA	TANTI (CORDOBA)	10 ^h 06' 21".2	
	CFA	C°PIE DE PALO(SAN JUAN)	10 ^h 06' 36".0	
REPLICA N°2	SLA	SAN LORENZO (SALTA)	10 ^h 34' 50".0	
	CYA	CHOYA (CATAMARCA)	10 ^h 34' 50".0	
	VCA	VINCHINA (LA RIOJA)	10 ^h 35' 12".4	
REPLICA N°3	SLA	SAN LORENZO (SALTA)	11 ^h 10' 10".1	
	CYA	CHOYA (CATAMARCA)	11 ^h 10' 11".8	
	VCA	VINCHINA (LA RIOJA)	11 ^h 10' 35".2	
	TCA	TANTI (CORDOBA)	11 ^h 10' 48".8	
	EAS	PARANA MEDIO(STA.FE)	11 ^h 11' 00".2	
	CFA	C°PIE DE PALO(SAN JUAN)	11 ^h 11' 02".8	

También se introdujo como dato la diferencia de tiempo entre las llamadas de las ondas S y P a un acelerógrafo ishimoto de la Red Nacional de Acelerógrafos del INPRES, ubicado en la ciudad de San Miguel de Tucumán, la que resultó ser: $T(S-P) = 6,5$ segundos.

Asumiendo un modelo de corteza de dos capas horizontales de 20 kilómetros de espesor, cada una, y un semiespacio, con velocidades de 5.0; 6.3 y 7.8 Km/seg se obtuvieron los siguientes resultados:

Tiempo origen: 09^h 50^{min} 38,3^{seg}
Latitud epicentral: 26° 33' Sur
Longitud epicentral: 64° 48' Oeste
Profundidad: 40 Km

4.2 - Réplicas

Las características que presentan las réplicas son las típicas en sismos de mediana intensidad y relativamente superficiales. Se registraron 6 réplicas en las primeras dos horas posteriores al sismo principal, de las cuales sólo tres fueron detectadas en por lo menos, tres estaciones simológicas. En la Tabla 1 se presentan los datos de las lecturas efectuadas. La réplica de mayor intensidad fue la que se identifica como N° 3 en dicha Tabla.

Las coordenadas epicentrales de las tres réplicas más importantes se muestran en la Tabla 2.

T A B L A 2

COORDENADAS EPICENTRALES DE LAS PRINCIPALES REPLICAS

REPLICA	TIEMPO ORIGEN	COORDENADAS EPICENTRALES	
		LATITUD SUR	LONGITUD OESTE
N° 1	10 ^{hs} 05 ^{min} 12.3 ^{seg}	26° 35'	64° 50'
N° 2	10 ^{hs} 34 ^{min} 15.7 ^{seg}	26° 35'	64° 52'
	11 ^{hs} 9 ^{min} 36.7 ^{seg}	26° 33'	64° 50'

En la figura 2 se muestran los epicentros de estas réplicas. Del análisis de la ubicación de las tres réplicas se observa una tendencia, de los epicentros, a alinearse en dirección oeste-sur-oeste con respecto al sismo principal, lo cual podría estar asociado a fracturaciones modernas en la zona.

4.3 - Magnitud

La magnitud determinada por el NEIS (National Earthquake Information Center) con 59 estaciones fue:

$$M_b = 5.5.$$

La magnitud determinada por el INPRES en función de la duración total del sismo, se efectuó utilizando la relación:

$$M_L = C_0 + C_1 (\log D)^2 + C_2 \Delta$$

donde:

M_L = magnitud local

D = duración total del sismo, en segundos

Δ = distancia epicentral en Km

C_0 = 1,09

C_1 = 0,41

C_2 = 0,0013

Los resultados obtenidos para cada estación se resumen en la Tabla 3, donde se incluye la réplica más importante.

T A B L A 3

MAGNITUDES CALCULADAS

ESTACION	SISMO PRINCIPAL			REPLICA MAS IMPORTANTE		
	DURACION(SEG)	M_L	M_b	DURACION(SEG)	M_L	M_b
CFA	900	5,4	5,7	510	4,9	5,4
EAS	744	5,3	5,6	360	4,6	5,2
TCA	876	5,3	5,6	592	4,6	5,2
VCA	850	5,1	5,5	505	4,6	5,2
CYA	960	5,0	5,5	738	4,8	5,3
SLA	980	5,0	5,5	829	4,9	5,4
PROMEDIO ADOPTADO		$M_L=5,2$	$M_b=5,6$		$M_L=4,7$	$M_b=5,3$

V - DISTRIBUCION DE INTENSIDADES

El sismo de Tucumán fue sentido en un área de alrededor de 110.000 Km². La zona más afectada fue la correspondiente a la población de Benjamín Araoz y sus alrededores. Allí se produjo la caída del techo de dos casas de débil construcción y se apreciaron grietas en muros, separación entre techo y paredes en una casa, se percibieron nítidamente seis movimientos sísmicos, cortándose la energía eléctrica, como consecuencia del primero.

En la localidad de Piedras Blancas, al este de Benjamín Araoz, hubo caída de una tapia y fisura en algunas casas. Esta área queda comprendida dentro de la isosista VI de la escala Mercalli Modificada. En la localidad de Burruyacú no hubo daños, pero se sintió muy fuerte, provocando pánico en la población. Se percibieron también entre 5 y 6 movimientos. Esta localidad está en el límite de la isosista V y VI. En la ciudad de San Miguel de Tucumán hubo alarma en la población; no hubo daños materiales ni víctimas; se produjeron cortes de energía eléctrica en varios sectores de la capital. En las localidades de Trancas, Benjamín Paz, Choromoro, Banda del Río Salí y Pozo Hondo (Santiago del Estero) se sintió bastante fuerte con crujido de puertas y ventanas. Esto nos

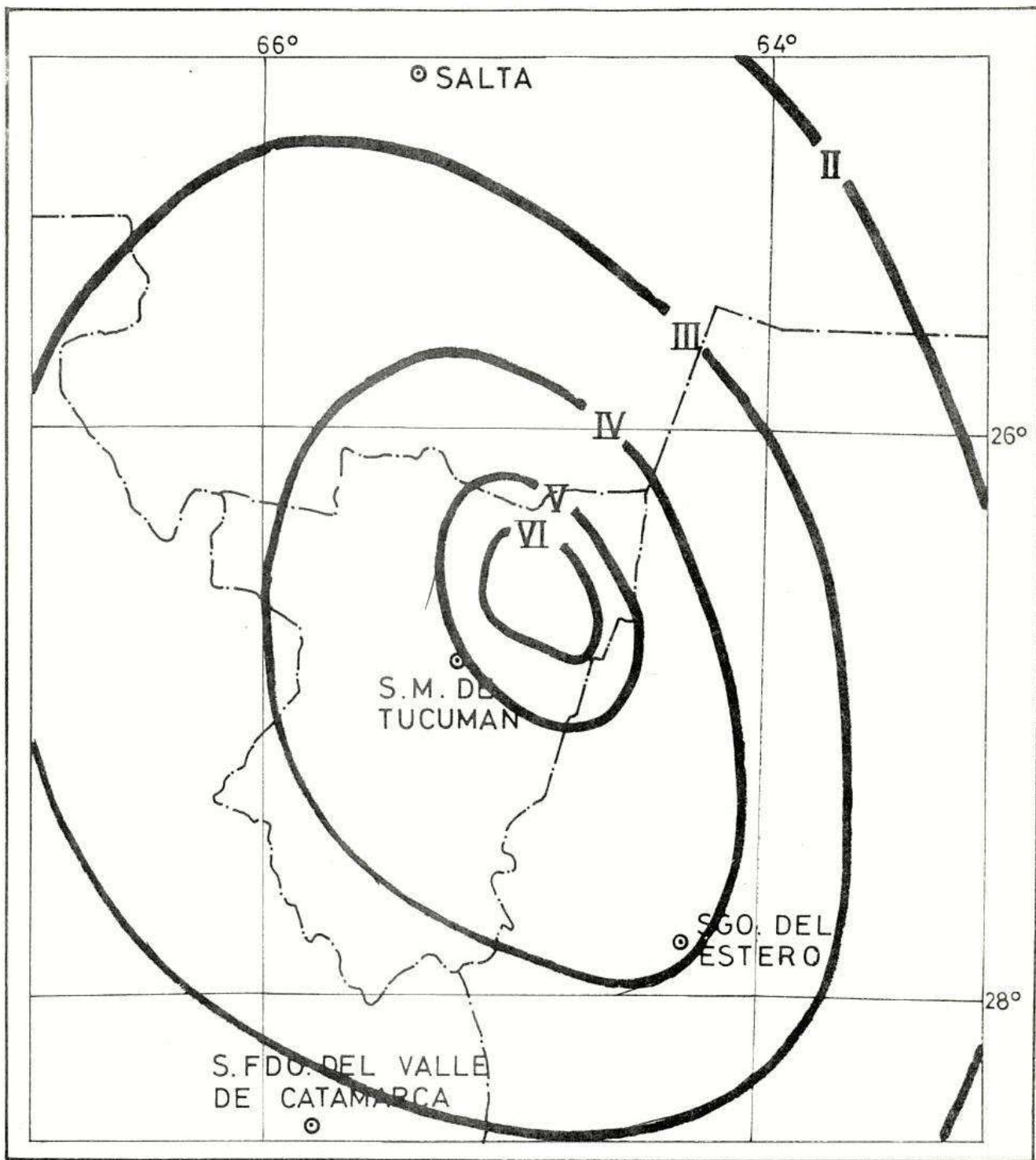


Fig. 3 DISTRIBUCION DE INTENSIDADES
SISMO DE TUCUMAN DEL 9 DE MAYO DE 1981

indicaría que en dichas poblaciones la intensidad del sismo fue de V en la escala Mercalli Modificada o IV en su parte superior.

En las localidades de Amaicha del Valle, Tafí del Valle, Las Termas (Santiago del Estero), Santiago del Estero y Clodomira (Santiago del Estero), el sismo causó cierta alarma provocando algunos efectos que corresponden a una in intensidad igual a IV en la escala Mercalli Modificada.

En las ciudades de Salta y Catamarca fue percibido, pero con poca intensidad, estando comprendidas dichas ciudades entre las isosistas II y III de la escala de inten sidades Mercalli Modificada. En la figura 3 se presentan las curvas de distribución de intensidades.

VI - ESPECTRO DE RESPUESTA

El concepto de espectro de respuesta ha sido y es ampliamente usado para el diseño de estructuras sismorresisten tentes. Básicamente puede definirse como la curva que repre senta la variación de la respuesta máxima de un oscilador de un grado de libertad como función del período del mismo. La respuesta puede darse en términos de aceleración absoluta, velocidad y desplazamiento relativos. Para fines de diseño, el más usado es el espectro de respuesta de aceleraciones ab solutas.

La utilidad del mismo es clara. El proyectista se encuentra interesado en conocer cuáles son las fuerzas que deberá considerar como cargas exteriores en su proyecto. Si la estructura es asimilable a un oscilador de un grado de libertad, no tiene más que leer la correspondiente ordenada espectral y multiplicarla por la masa de la estructura calculando previamente el período y el amortiguamiento de la misma. Si la estructura es asimilable a un oscilador con va rios grados de libertad el espectro proporciona la respues ta de cada modo natural de vibración que habrá de superponer adecuadamente para obtener las fuerzas de diseño. Para estructuras en la que los modos superiores de vibración no sean demasiado influyentes, en relación con el modo fundamental, puede considerarse la influencia de este último solamente. Es éste el fundamento del llamado método estático

de cálculo ampliamente usado en todo el mundo para el diseño de edificios de pequeña y mediana altura. En él se supone una forma modal para el primer modo, usualmente una línea recta, y las fuerzas de diseño se determinan previo cálculo del período fundamental utilizando un espectro de respuesta. De una u otra forma en las normas sismorresistentes se maneja explícita o implícitamente un espectro de respuesta.

En la figura 4 se muestran los acelerogramas registrados en la ciudad de Tucumán con el acelerógrafo SMA-1 que el INPRES tiene instalado en el edificio de Obras Sanitarias de esa ciudad, mientras que en las figuras 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se presentan los espectros de respuesta de aceleraciones absolutas y velocidades relativas para las componentes transversal, longitudinal y vertical. Cada gráfico muestra cuatro curvas correspondientes respectivamente a amortiguadores de 0, 2, 5 y 20 por ciento con respecto a la crítica.

Estos espectros se determinaron procesando los registros de aceleraciones del terreno en función del tiempo.

Los valores máximos de aceleración del terreno registrados resultaron ser $21,4 \text{ cm/seg}^2$ para la componente longitudinal, $27,2 \text{ cm/seg}^2$ para la componente transversal y $18,5 \text{ cm/seg}^2$ para la componente vertical. Observando el espectro de aceleraciones, si se considera la componente transversal (fig. 5) y un porcentaje de amortiguación del 5% (segunda curva de abajo hacia arriba), valor que frecuentemente se adopta en el diseño de estructuras de hormigón armado, se obtiene un valor máximo de respuesta de $65 \text{ cm/seg}^2 = 0.065 \text{ g}$ ($\text{g} = \text{aceleración de la gravedad}$) para un período de 0.3 segundos.

Resulta interesante comparar este valor con el valor de diseño que se obtendría aplicando las prescripciones de las NORMAS ANTISISMICAS CONCAR 70, vigentes en el momento en que ocurrió el sismo.

La figura 11 muestra los espectros de diseño normalizados que aparecen en las Normas anteriormente citadas.

Los valores de las aceleraciones espectrales, se obtienen multiplicando las ordenadas del gráfico anterior por 3 coeficientes: C_0 , γ_d y γ_e . El primero, denominado coefi-

ciente sísmico zonal, que tiene en cuenta la actividad sísmica del lugar de emplazamiento de la estructura, el segundo, γ_d , denominado coeficiente de destino, que tiene en cuenta la importancia de la construcción y el tercero, γ_e , que tiene en cuenta la capacidad de absorción de energía mediante deformaciones anelásticas o ductilidad. Este último factor pone de manifiesto la filosofía de la Norma que admite la incursión de la estructura en el campo no lineal para sismos de tipo destructivo con baja probabilidad de ocurrencia.

La aceleración espectral de diseño resulta, para un terreno medio y para períodos comprendidos entre 0 y 0.4 segundos, igual a 0.07 g. Al ser este valor un poco mayor que el obtenido del espectro de respuesta elástico de la fig. 5 es posible admitir que las estructuras comprendidas en la gama de períodos anteriormente citadas no han incursionado en el campo anelástico y por lo tanto cualquiera de ellas que haya sido diseñada de acuerdo con las Normas no debería haber sido dañada por el sismo. Para estructuras cuyos períodos propios sean iguales o mayores de 16 segundos, las conclusiones anteriores también son válidas, ya que el valor de diseño resulta igual a 0,028 y la respuesta elástica obtenida a partir de la fig. 5 es 0.02 g.

Es interesante recalcar que no se han observado daños en las construcciones sismorresistentes emplazadas en la ciudad de Tucumán.

Las Normas Antisísmicas CONCAR 70 han sido reemplazadas por las Normas Antisísmicas Argentinas NAA-80 en vigencia desde el 1 de julio de 1981.

En ellas aparece una nueva zonificación sísmica del territorio nacional obtenida en base a una evaluación más ajustada de la historia sísmica del país. El valor del coeficiente sísmico básico C_0 , resulta para la zona 2, que cubre casi totalmente la provincia de Tucumán, de 0.05, es decir aproximadamente un treinta por ciento más bajo que el que figuraba en la anterior zonificación.

Es necesario considerar que el terremoto es una acción que soportan las construcciones rara vez, sino ninguna, durante su vida útil y por un lapso que cubre apenas unos segundos.

Sería antieconómico diseñar una estructura para que se comporte dentro del campo lineal ante eventos de tan baja frecuencia. Por lo tanto la disminución del coeficiente sísmico zonal, no debe interpretarse como detrimento de la seguridad estructural sino como una aproximación más cercana a la filosofía básica de diseño que orienta todo código sísmo-resistente, es decir admitir el desarrollo de la ductilidad en las estructuras como única forma de compatibilizar los criterios de seguridad y economía.

VII - CONCLUSIONES

El sismo de Tucumán del 9 de mayo de 1981 tuvo su epicentro en un área caracterizada por un moderado nivel de actividad sísmica, pero con antecedentes de eventos destructivos de mediana intensidad.

El estado actual en la implementación, por parte del INPRES, de la Red Sismológica Nacional y la Red Nacional de Acelerógrafos y Sismoscopios, permitió estudiar detalladamente este sismo, obteniéndose los principales parámetros del mismo.

Esto constituye un avance en el enfoque del problema sísmico nacional, ya que el estudio de la actividad sísmica local mediante registros instrumentales adecuados, permite mejorar el conocimiento de las características sísmicas del país, superándose así la etapa en que, por falta de dicho instrumental, debía recurrirse fundamentalmente a datos históricos evaluados subjetivamente y a resultados obtenidos en otras partes del mundo, muchas veces no concordantes con las particulares características sísmicas de cada zona.

El registro del acelerógrafo ubicado en la ciudad de Tucumán es de mucho valor, ya que a partir de él se obtuvieron los primeros espectros de respuesta en dicha ciudad.

RESPUESTA DE ACELERACION 103 / 0000 / 0000

FIG. 5

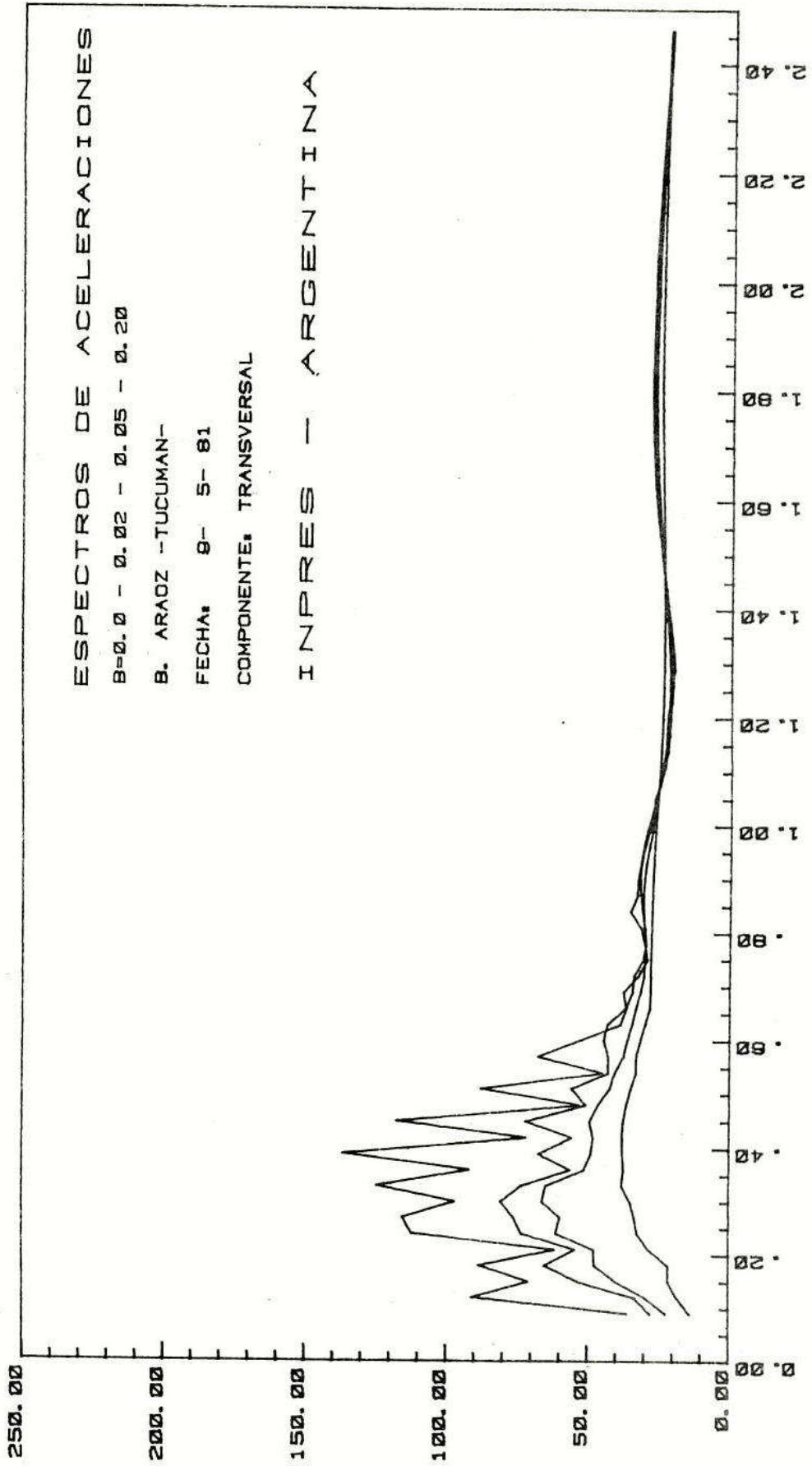
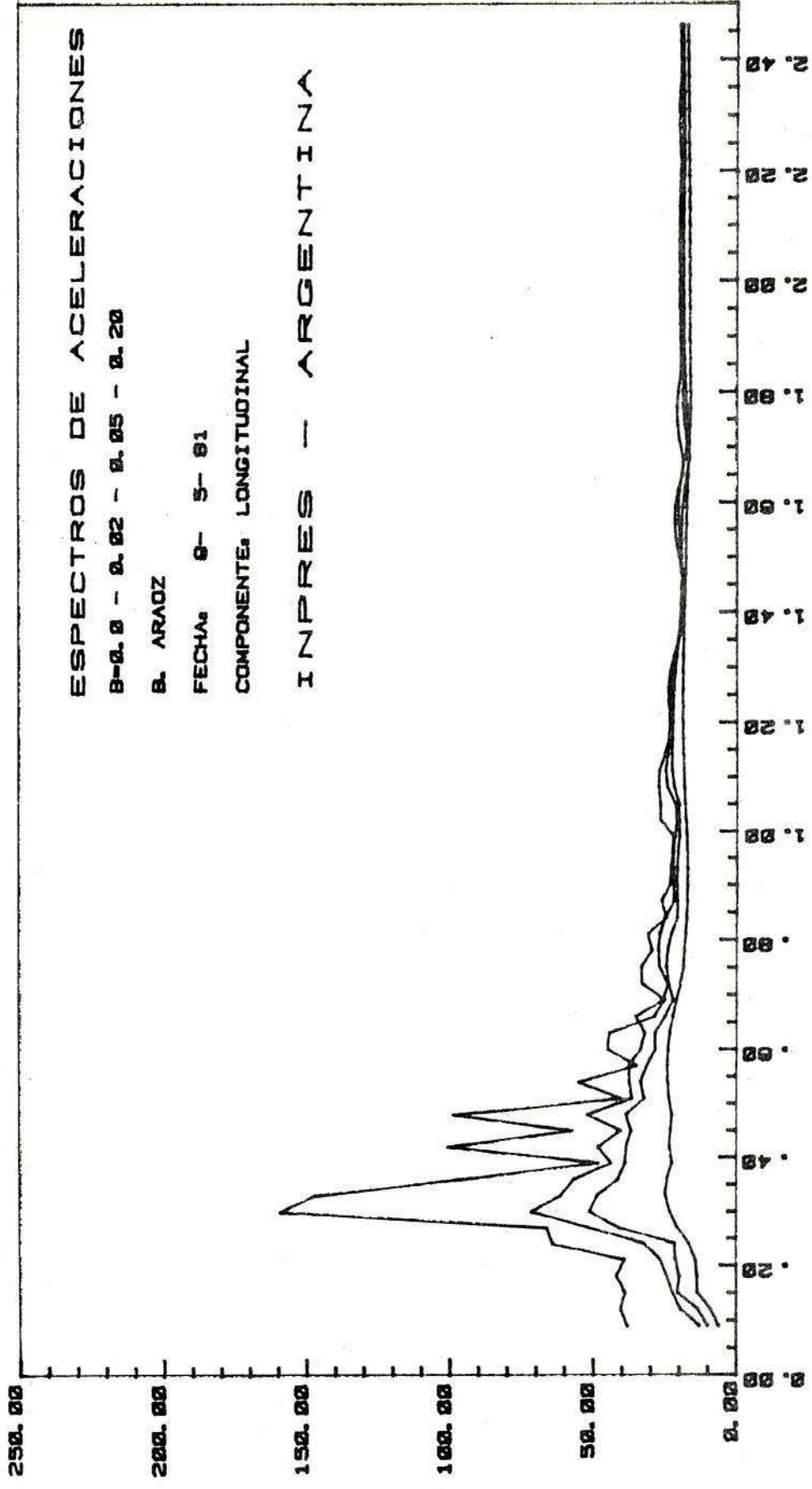
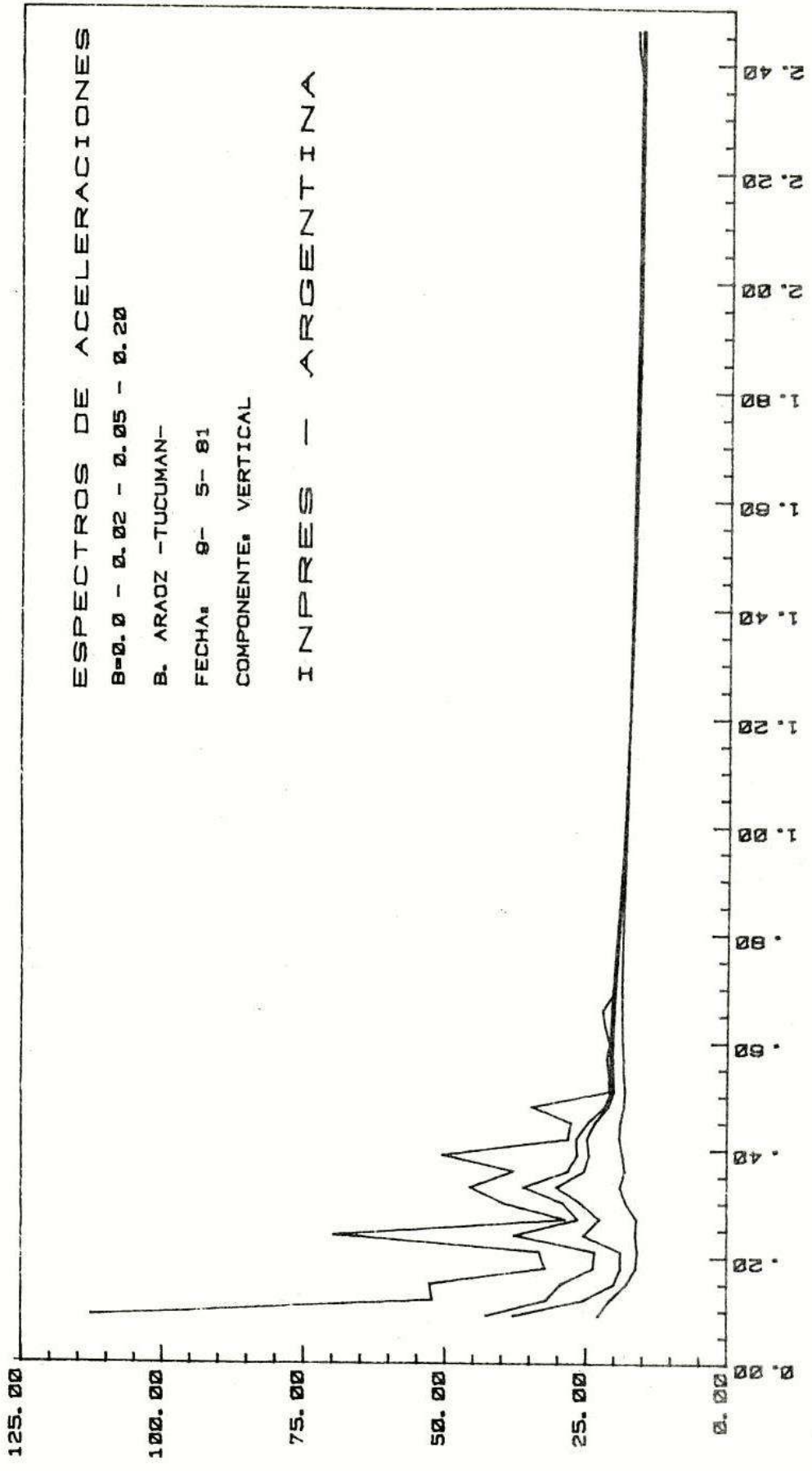


FIG. 6



PERIODO NATURAL NO AMORTIGUADO - Segundos

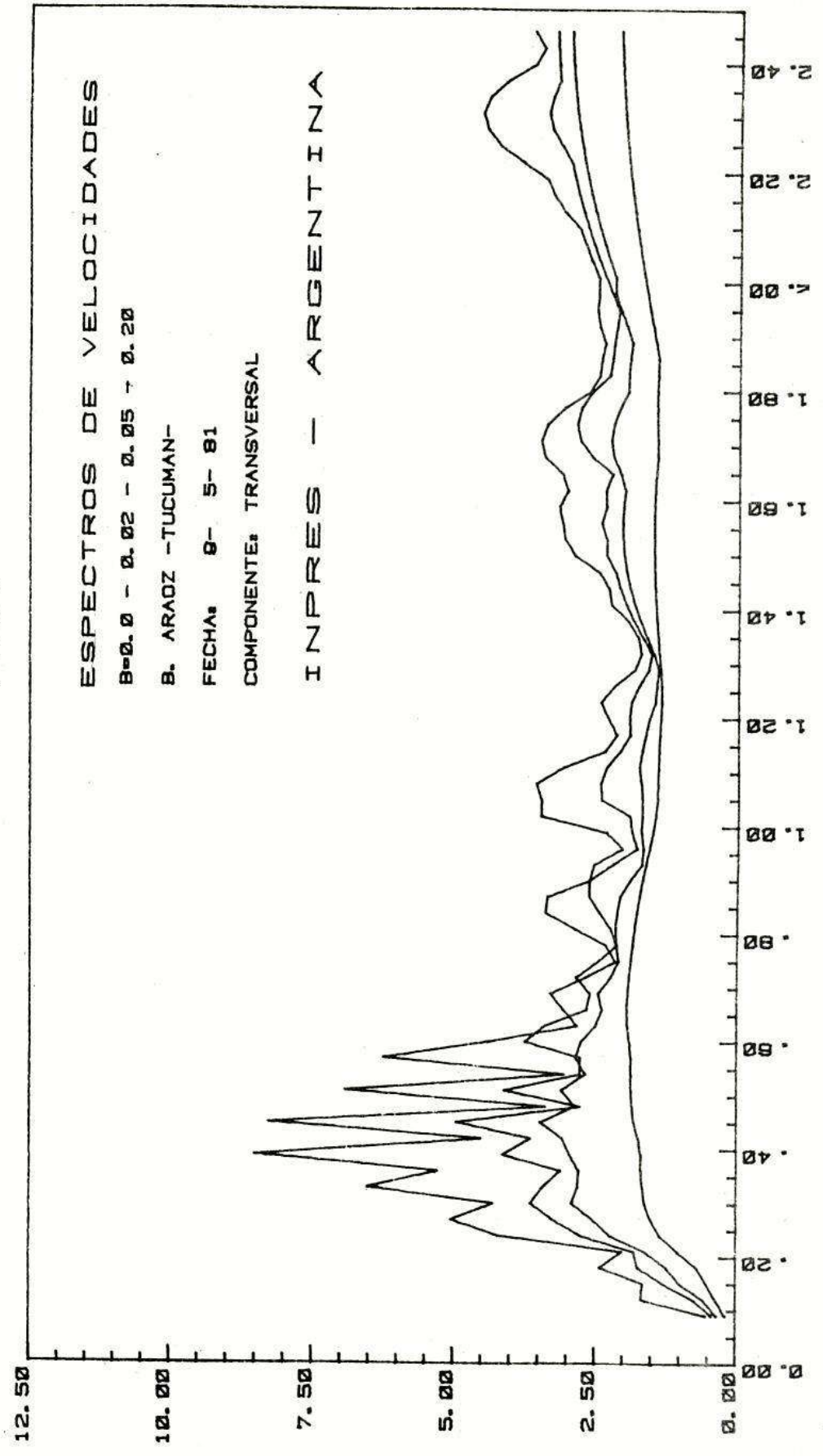
FIG. 7



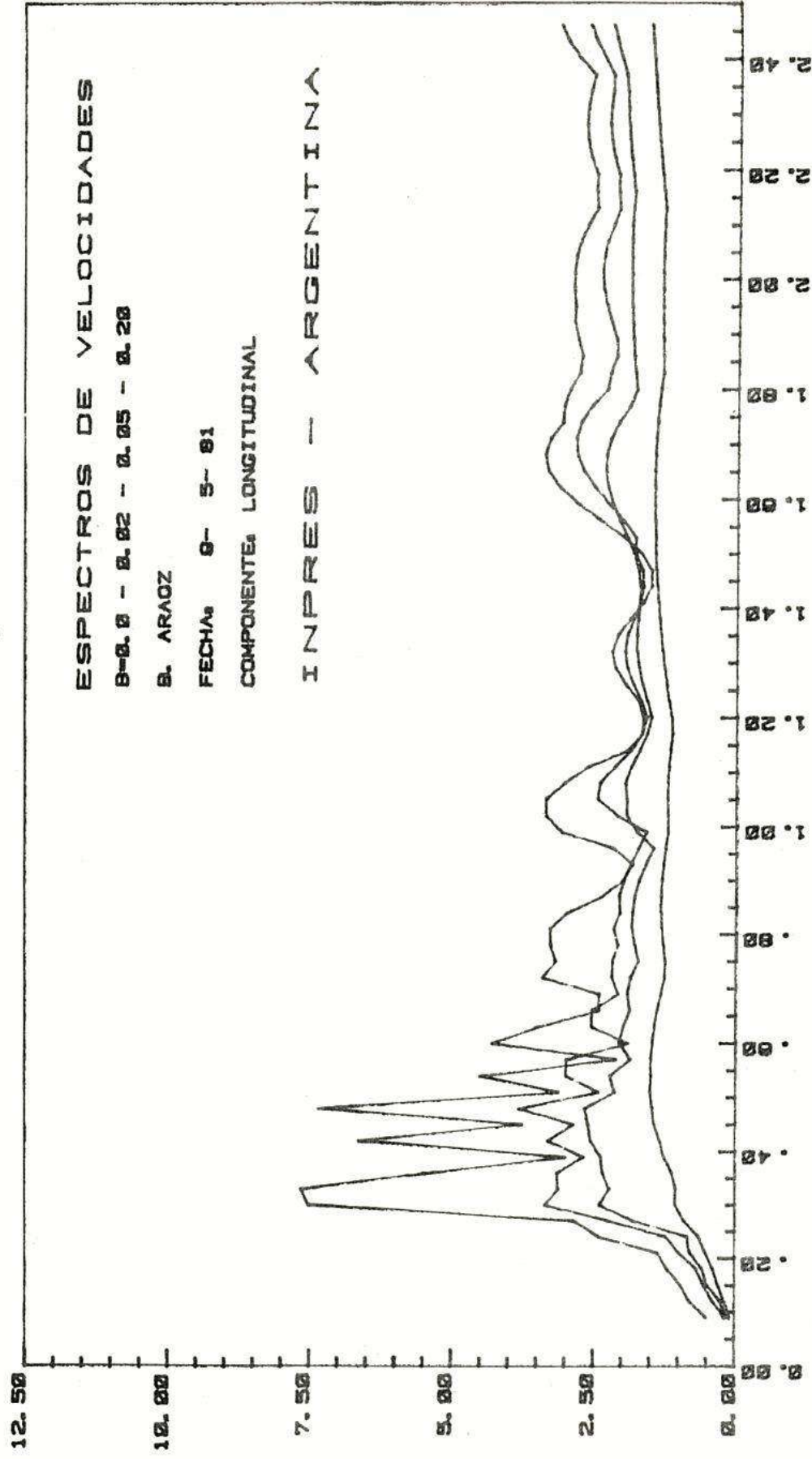
PERIODO NATURAL NO AMORTIGUADO - Segundos

RESPUESTA DE VELOCIDAD - C.M./SEG. - 1

FIG. 8



FIG, 9



AMPLITUD DE VELOCIDAD - CM / SEG

FIG. 10

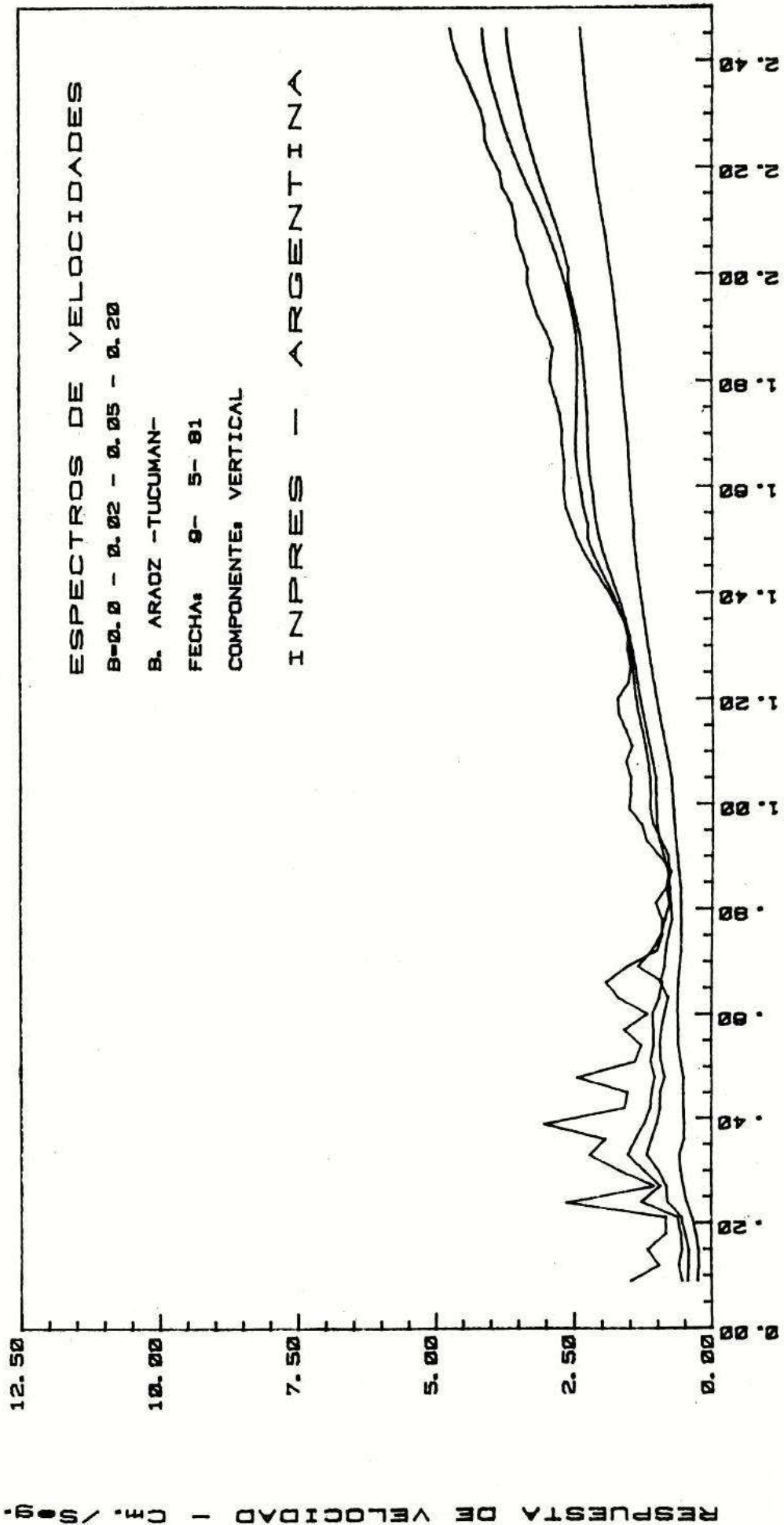
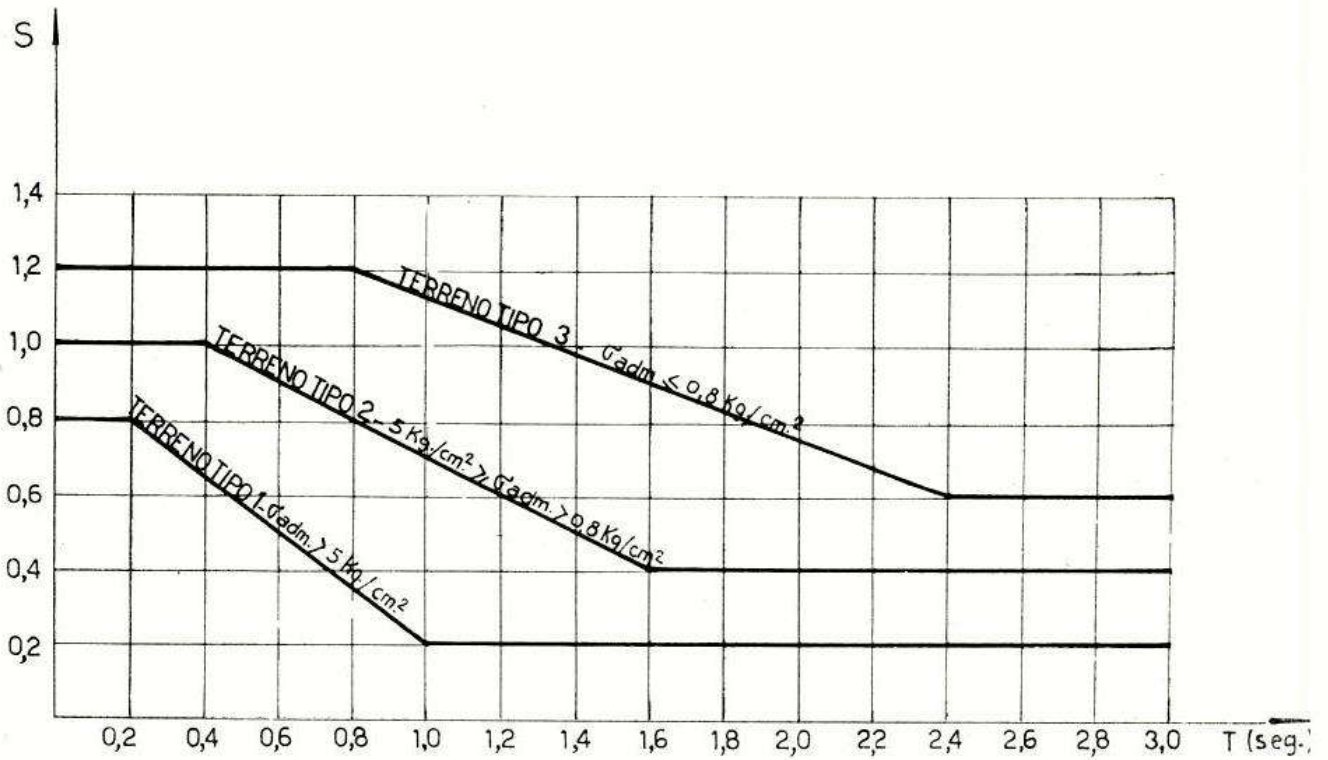


Fig. 11 - ESPECTRO NORMALIZADO DE DISEÑO



B I B L I O G R A F I A

- 1 - ZOSSI, M.M., Estudio de la Actividad Sísmica de la Provincia de Tucumán - Instituto de Física - Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología - Universidad Nacional de Tucumán.
- 2 - CASTANO, J.C. Zonificación Sísmica de la República Argentina - Publicación Técnica N° 5 - INPRES 1977.
- 3 - MON, R. y DINKEL, J.C., Geología de la Comarca del Cerro Remate (Provincias de Salta, Tucumán y Santiago del Estero) y Nuevos Datos sobre la Distribución del Paleozoico Inferior en el Noroeste Argentino - Revista de la Asociación Geológica Argentina - Tomo XXIX N° 1, págs. 61-71- 1974.
- 4 - CASTANO, J.C. y BASTIAS, H., Estudio de la Sismicidad y Evaluación del Riesgo Sísmico en el Sitio de Emplazamiento de la Presa El Tunal XI Reunión Científica de la A.A.G.G. - Tucumán 1980.
- 5 - REAL, C.R. y TENG, T.L., Local Richter Magnitude and Total Signal Duration in Southern California - Bulletin of the Seismological Society of American - Vol. 63 1973.
- 6 - RICHTER, C.F., Elementary Seismology - Freeman and Company -1958.
- 7 - CLOUGH, R.W. y PENZIEN, J., Dynamics of Structures Mc Graw Hill Kogahusha, Ltd. 1975.
- 8 - NORMAS ANTISISMICAS CONCAR 70 - INPRES 1972.
- 9 - NORMAS ANTISISMICAS ARGENTINAS - NAA 80 - INPRES 1980.