

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Programa Académico de Ingeniería Civil



EL RIESGO SISMICO EN PROYECTOS DE  
INGENIERIA CIVIL

TESIS

Para optar el título profesional de

INGENIERO CIVIL

VLADIMIRO GUZMAN LEON

Lima, Perú

1983

A MIS PADRES

César Augusto e Ignacia  
eternos guías de mis pasos.

A MIS HERMANOS

Wilbert, Wilfredo y Vilma  
por su permanente aliento.

## AGRADECIMIENTO

A los Doctores Jorge Alva Hurtado y Rafael Torres Cabrejos, profesores de la Universidad Nacional de Ingeniería, por sus valiosas enseñanzas, constante asesoramiento e invaluable apoyo brindado, durante el desarrollo del presente estudio.

Al Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) y a su Director Ing. Alberto Giesecke por el auspicio y apoyo económico que se me otorgara dentro del Proyecto SISRA, (Sismicidad de la Región Andina). De igual manera al Dr. Enrique Silgado del INGEMMET y al Ing. Arturo Albarracín de ELECTROPERU, así como al Centro de Cómputo de la Universidad Nacional de Ingeniería por todas las facilidades recibidas.

A todos mis profesores por sus conocimientos transmitidos, a mis compañeros de estudio y amigos por su aliento y colaboración.

## I N D I C E

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	4
1. PRINCIPIOS BASICOS	4
1.1 Aspectos Generales	4
1.2 Objetivos	7
1.3 Alcances del Estudio	8
CAPITULO II	12
2. REVISION DE ESTUDIOS ANTERIORES	12
2.1 Introducción	12
2.2 Estudios de Riesgo Sísmico con procedimientos probabilísticos	14
2.3 Estudios de Sismicidad y Riesgo Sísmico por otros procedimientos	21
CAPITULO III	45
DISTRIBUCION DE INTENSIDADES MAXIMAS	45
3.1 Introducción	45
3.2 Información básica	46
3.3 Metodología utilizada	47
3.4 Discusión del Mapa de distribución de intensidades máximas	50
CAPITULO IV	52
4. ACTIVIDAD SISMICA DEL PERU	52
4.1 Tectónica de Placas	52
4.2 Rasgos tectónicos y morfológicos de la región	56
4.2.1 Tectónica superficial	59
4.3 Sismicidad de la región	60
4.4 Parámetros que intervienen en el análisis de la sismicidad	62

	Pág.	
4.4.1	Parámetros de localización	
4.4.2	Parámetros de movimiento	63
4.4.3	Parámetros de dimensión	64
	Sismicidad histórica	64
4.5.1	Análisis de los sismos históricos	65
4.6	Sismicidad Instrumental	66
4.6.1	Análisis de datos de la sismicidad instrumental	67
CAPITULO V		72
5.	ESTUDIO DEL PELIGRO SISMICO	72
5.1	Consideraciones	72
5.2	Fundamentos del análisis del peligro sísmico	73
5.2.1	Probabilidad condicional y valor medio de la intensidad	75
5.2.2	Valores picos de movimientos sísmicos y medidas espectrales de la intensidad	76
5.3	Evaluación de las zonas sismogénicas	80
5.4	Análisis estadístico de recurrencia	83
	Leyes de Atenuación	86
	Evaluación del peligro sísmico	88
CAPITULO VI		114
6.	ESTUDIO DE SITIO Y DE MICROZONIFICACION SISMICA	114
6.1	Consideraciones generales	114
6.2	Base teórica	117

	Pág.	
6.2.1	La propagación de las ondas de corte armónicas - en un sistema unidimensional	117
6.2.2	Relación entre los movimientos en roca superficial y roca base	122
6.2.3	Movimientos transitorios	124
6.3	Licuación de suelos	127
6.3.1	Método simplificado basado en el comportamiento del suelo en terremotos pasados	128
6.3.2	Método simplificado basado en procedimientos de estimación de ciclos uniformes equivalentes	129
6.3.3	Método analítico utilizando esfuerzos de corte por medio de análisis de respuesta del terreno	131
6.4	Amplificación sísmica	131
6.5	Evaluación de información geotécnica existente	133
6.5.1	Estudio del peligro sísmico	135
6.6	Estudio de sitio	135
6.6.1	Parámetros del terreno	135
6.6.2	Sismo de diseño	136
6.6.3	Resultados del análisis	137
6.6.4	Licuación de arenas	138
6.6.5	Amplificación sísmica	139
6.7	Espectros de respuesta	141
6.8	Discusión de los resultados	144

	Pág.
CAPITULO VII	185
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	185
REFERENCIAS	191
ANEXOS	

## INTRODUCCION

El presente estudio consiste en la evaluación del Riesgo Sísmico y Estudio de Sitio en una zona donde se proyecta una obra de Ingeniería Civil.

El trabajo en su primera parte comprende una descripción introductoria de sismicidad de la región en estudio, indicando objetivos y alcances. Para la evaluación del Riesgo Sísmico se ha realizado una revisión previa de diversos estudios, así como de la actividad sísmica ocurrida en el pasado, presentando la información de datos históricos de los sismos más severos que afectaron la región, las intensidades se expresan por medio de curvas isosistas, incluyendo eventos históricos de importancia. La evaluación macro sísmica de los sismos hasta diciembre de 1981 de bidamente documentada permitió la presentación del mapa de distribución de máximas intensidades sísmicas en el Perú a escala 1: 2'000,000, que fué el compromiso mínimo del grupo de peligro sísmico de la Universidad Nacional de Ingeniería en el proyecto SISRA, patrocinado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS). La revisión de la información macrotectónica y geológica también es resumida.

Para el análisis del peligro sísmico se ha seleccionado dos lugares en la Zona Centro (Lima) y en la Zona Norte (Piura) localizadas por sus respectivas coordenadas geográficas. El análisis se realizó siguiendo la metodología desarrollada por A. Cornell y modificada por Mc Guire y los cálculos efectuados usando el Programa de Cómputo RISK. El estudio requiere la evaluación de fuentes sismogénicas a considerar te

niendo en cuenta la actividad sísmica y características tectónicas en base a análisis estadísticos y se plantea una ecuación que gobierna la recurrencia de terremotos.

Comparando resultados de otros autores sobre leyes de atenuación se han determinado expresiones para las ecuaciones de atenuación de aceleraciones, velocidades y desplazamientos en función de la magnitud y la distancia hipocentral, los que fueron utilizados en el presente trabajo.

El estudio de sitio comprende un análisis de licuación de suelos y amplificación sísmica comparando métodos simplificados existentes y el analítico utilizando la solución continua con parámetros no lineales del suelo. Los cálculos fueron realizados utilizando el Programa de Cómputo SHAKE.

Las máximas aceleraciones del sismo de diseño para el análisis se determinaron por métodos probabilísticos. Se utilizaron registros digitizados de los sismos del 17 de octubre de 1966, del 31 de mayo de 1970 y del 03 de octubre de 1974 en Lima, escalados a valores de aceleración máxima representando diferentes tiempos de exposición de la ocurrencia de un sismo.

Se presenta los resultados de un Estudio de Sitio en la zona en estudio. Se ha utilizado la información del terreno disponible en estudios previos realizados por ELECTROPERU, aplicándose métodos simplificados y analíticos, para determinar el potencial de licuación y amplificación sísmica con un terreno esperado.

Finalmente se presentan Espectros de Diseños, los mismos que son expresados en términos del período funda -

mental de las estructuras y del período predominante del suelo Ts.

El trabajo fué posible gracias al apoyo constante de mis asesores los Doctores Jorge Alva Hurtado y Rafael Torres Cabrejos y el auspicio del Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS).

## C A P I T U L O     I

### 1.    PRINCIPIOS BASICOS.

#### 1.1   Aspectos Generales.

Históricamente el Perú ha sido afectado en múltiples ocasiones por terremotos destructivos - de diferente intensidad. La mayor sismicidad se origina en la interacción de las placas América y Nazca, ubicadas en la Costa Occidental de América del Sur. (Silgado, 1978).

El área de mayor actividad sísmica abarca toda la Costa Peruana y la Región Sub-andina, mientras que el resto del territorio se encuentra afectado en menor grado por terremotos asociados a fenómenos de sismicidad local.

Existe disponible información macrosísmica de terremotos históricos e información relativamente reciente de datos instrumentales, producto de la red de sismógrafos locales y mundiales. También existe limitada información sobre neotectónica (fallas activas o potencialmente) en el estudio de la tectónica local y regional.

Es importante el estudio de la actividad sísmica, ya que tiene un impacto significativo sobre la economía de nuestro país, puesto que además de ocasionar pérdidas económicas significativas es necesario considerar que en los países en vías de desarrollo como el nuestro, un solo terremoto podría dislocar por completo su economía. Es preciso indicar que este efecto puede mitigarse grandemente si existe una adecuada política con respecto al riesgo sísmico y a la protección contra los efectos que puedan producirse con los terremotos.

Los estudios de riesgo sísmico están orientados hacia la estimación probable de que suceda un evento sísmico futuro en un lapso determinado con cierta intensidad; las obras de Ingeniería Civil requieren de un estudio detallado de la sismicidad y riesgo sísmico en el área de localización. Estos estudios deben encaminarse hacia la obtención de datos utilizables por los diseñadores del proyecto y cálculo de dichas obras civiles y/o industriales de cierta envergadura. Los coeficientes sísmicos de diseño se ajustan en función de la inversión económica y la duración estimada de la obra a construirse.

Actualmente en diversas partes del mundo se están dedicando esfuerzos al estudio sobre la posibilidad de predecir terremotos. Sin embargo, a pesar que el éxito en este campo sería considerado como uno de los principales logros científicos que se haya podido alcanzar ya que traería como consecuencia la protección de vidas humanas, no se podrían evitar los daños materiales, pero sí en cambio disminuir los daños notablemente.

El único modo de proteger las obras de Ingeniería Civil es diseñarlas y construirlas, lo mismo que reforzar las obras existentes con normas adecuadas, de tal manera que las estructuras puedan resistir las más altas intensidades sísmicas a esperarse en determinado lugar.

La estimación de la intensidad máxima probable es de gran importancia económico-social. Esto por cierto requiere de una adecuada interpretación de la actividad sísmica de la región, incluyendo las observaciones instrumentales sismológicas y complementada con los datos macrosísmicos históricos, de modo que la elaboración del Catálogo de Epicentros es un elemento fundamental en todo este proceso de protección contra los terremotos.

Todas éstas razones justifican la creación y aplicación de códigos especiales de construcción y diseño sismo-resistente, a fin de reducir estos costos adicionales al mínimo compatible con la seguridad pública, por lo que es costumbre dividir al país en tres o más zonas sísmicas, de acuerdo a la máxima intensidad sísmica esperable en cada zona.

El entendimiento de la actividad en toda la región sur occidental de América sólo puede lograrse sobre una base científica, y considerando la región como una unidad. Es por ésta razón que los países ubicados en ésta región están concretando sus esfuerzos en el estudio intensivo de los factores naturales que determinan la sismicidad. Es de esperar que estos estudios constituirán una valiosa experiencia para posteriores estudios en todo el continente. Dentro de este marco, el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), está auspiciando la confección de mapas de riesgo sísmico, además de otros estudios, los mismos que serán de gran utilidad para todos los países que la integran. Este trabajo ha contado con el auspicio del CERESIS dentro del Proyecto de Mitigación de Daños de la Región Andina, (SISRA).

## 1.2 Objetivos

Los objetivos generales de este trabajo, pueden resumirse como sigue:

- a) Analizar y sintetizar toda la información y datos existentes con relación a estudios sobre sismicidad y riesgo sísmico de la región.
- b) Recolectar y resumir la información geológica y tectónica de la región en estudio, para una mejor evaluación del peligro sísmico.
- c) Producir mapas de las intensidades sísmicas - máximas observadas, basado en datos macrosísmicos históricos.

- d) Evaluación estadística de toda la información disponible tanto histórica como instrumental, de diversos parámetros para la evaluación del peligro sísmico como: la recurrencia, profundidad focal, distribución de hipocentros, magnitudes, intensidades, etc.
  
- e) Desarrollar un procedimiento para producir mapas de Microzonificación Sísmica, los mismos que deben estar basados en los Mapas de Zonificación Nacional y contendrán datos adicionales sobre las variaciones locales de intensidad que se puedan esperar dentro de un área limitada, debido a las condiciones del suelo y sub-suelo.
  
- f) Proponer una alternativa de estudios de riesgo sísmico en proyectos de Ingeniería Civil, en la cual se determina las características de la respuesta dinámica del suelo ante las sollicitaciones sísmicas; la misma que podrá servir para el diseño sismo-resistente, la que será expresada en forma de espectros de respuesta.

### 1.3 Alcances del Estudio

Uno de los alcances del estudio consiste en promover la aplicación amplia e integral de las nuevas técnicas desarrolladas para un mejor diseño sísmico en los proyectos de Ingeniería y la protección de la vida y la propiedad en las zonas de alta sismicidad y riesgo sísmico. Se realizó previamente una revisión integral de todos los estudios de riesgo sísmico ejecutados en el país, cuya

información está disponible, la misma que ha sido resumida y será descrita en el siguiente capítulo.

Para efectos de comparación se ha escogido evaluar el riesgo sísmico de la zona de Lima y la zona norte (Piura) del Perú. La revisión de estos estudios hizo posible una recopilación de la información macrosísmica, información geológica y tectónica de las regiones en estudio. Todo esto condujo a la preparación de un mapa de intensidades máximas observadas.

Se evaluarán las diferentes zonas sismogénicas - planteadas por diversos autores con sus respectivas recurrencias, y las ecuaciones de atenuación que plantean en sus estudios.

El análisis probabilístico se ha verificado aplicando la metodología desarrollada por Cornell (1968), Merz y Cornell (1973) y modificada por Mc Guire (1976). Todos los cálculos fueron efectuados usando el programa de cómputo RISK que ha sido implementado en el Centro de Cómputo de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNICC) durante este trabajo.

Para realizar el estudio de sitio, tuvo que implementarse en el UNICC, el programa de cómputo SHAKE, desarrollado por Schnabel, Lysmer y Seed (1972) en la Universidad de California, Berkeley, que utiliza la solución continua de la propagación vertical de ondas de corte con parámetros - no lineales del suelo.

Este programa posibilitó la evaluación de factores de amplificación debido a las diferentes características locales como son: los tipos de suelos, topografía, nivel de la capa rocosa ( basamento), nivel de la napa freática, etc.

Todos estos pasos a seguir son fundamentales para una mejor evaluación del Riesgo Sísmico en las regiones en estudio, los cuales conducen a desarrollar: mapas de Riesgo Sísmico, registros artificiales más probables y construir espectros de respuesta para los máximos valores de aceleración del suelo, así como otros fenómenos tectónicos a un nivel regional y local ligados a la actividad sísmica.

La aplicación sistemática de estos métodos, permitirá estimar los parámetros probables de los terrenos más intensos a ocurrir en una zona determinada. Estos parámetros así obtenidos serán reducidos a una información de cargas sísmicas, de tal manera que las estructuras así diseñadas para estos niveles de cargas sean confiables.

Es evidente que los resultados obtenidos serán más útiles, si la exactitud de los parámetros determinados y el número de eventos sísmicos localizados son satisfactorios y, permitirá la preparación de mapas de zonificación sísmica, los cuales estarán basadas en los mapas regionales de máxima intensidad espectable de terremotos.

Los mapas de Microzonificación Sísmica estarán basados en los mapas de Zonificación Nacional y contendrán datos adicionales sobre las variacio

nes locales de intensidad que se puedan esperar dentro de un área limitada, por las condiciones locales del suelo.

Estos mapas de Microzonificación serán de vital importancia para una mejor planificación de ciudades, zonas sísmicas, para lo cual se requiere de un amplio estudio interdisciplinario como: geología, mecánica de suelos, sismología, etc., con el objeto de intercambiar ideas e información que haya sido derivada de experiencias pasadas y presentes y nos permita homogenizar criterios y metodologías para un mejor estudio del riesgo sísmico.

## C A P I T U L O    I I

### 2.    REVISION DE ESTUDIOS ANTERIORES

#### 2.1    Introducción

En el Perú diversos investigadores se han dedicado a realizar estudios de Sismicidad y Riesgo Sísmico; sin embargo, pocos son los autores que utilizan métodos probabilísticos para obtener - los valores probables de la intensidad máxima - esperada en un período de tiempo dado.

En este Capítulo, se presentan resúmenes de los trabajos que utilizan estos métodos probabilísticos, para luego compararlos con los resultados que se obtienen en el presente trabajo empleando la metodología de Cornell (1969), Merz y Cornell

(1973) y utilizando el programa de cómputo RISK de Mc Guire (1976).

Estos trabajos presentan una exposición breve - sobre algunos aspectos tectónicos y en gran parte, una descripción histórica de sismos ocurridos en las zonas de estudio referidos a los trabajos realizados por E. Silgado (1969, 1973, 1975 y 1978). Incluyen algunos datos estadísticos de la información instrumental, referidos a los catálogos del USGS (United States Geological Survey) y del IGP (Instituto Geofísico del Perú).

En general, todos los autores plantean ecuaciones de recurrencia, como la propuesta por Gutenberg y Richter (1954), cuya forma es:

$$\log N = a + bM$$

donde se define a N, como el número de terremotos de una magnitud M ó mayor por unidad de tiempo; "a" y "b" como las constantes que definen la sismicidad de la región; determinando los períodos de retorno de las magnitudes Ms ó mb alternativamente.

De la revisión efectuada de los estudios cuya información está disponible, los estudios realizados por Casaverde y Vargas (1980) y Huaco (1981, 1982), que utilizan la misma metodología, resultan ser los trabajos más recientes. Estos autores, presentan mapas de riesgo sísmico, planteando diferentes ecuaciones de atenuación de aceleraciones. Utilizando la distribución de intensidades de la escala de Mercalli modificada, Casaverde y Vargas (1982) presentan una expresión para la atenuación de la intensidad y evalúan el

riesgo sísmico en términos de intensidades.

Los resultados que estos autores obtienen difieren en algunos casos debido a la diversidad de fuentes de información, diferentes datos instrumentales, catálogos y los procedimientos utilizados para evaluar los parámetros que el programa de cómputo RISK requiere.

## 2.2 Estudio de Riesgo Sísmico realizados con procedimientos probabilísticos.

Ocola y Colaboradores (1977) en un estudio para el área de Bayóvar presentan en primer término, una descripción de catálogos de hipocentros, intensidades y aceleraciones. Con referencia a la sismicidad histórica, presentan dichos autores una descripción de los sismos más importantes ocurridos en la zona Norte Oeste del Perú. Esta descripción ha sido confeccionada en base a los trabajos de E. Silgado (1973, 1974, 1976), y trabajos propios de los autores. (Ocola et al, 1977). La figura 2-1 muestra los sismos más destructores de la zona en estudio.

En el estudio en mención, la sismicidad instrumental obtuvo entre las latitudes  $2^{\circ}$  y  $8^{\circ}$  S, donde se observa una mayor concentración de sismos dentro de los 300 Kms. de distancia desde el eje de la fosa marina, frente a la localidad Canoas en Tumbes, donde ocurrió un sismo de magnitud 6.3 mb. en 1970. La falla regional Illescas-Paita, parece estar asociada a la actividad sísmica superficial y considera una ecuación de conversión de la magnitud Ms (derivada en base a la energía, considerando las ondas de superficie) y la magnitud mb representando las ondas de cuerpo como la propuesta por Richter (1954).

$$mb = 2.5 + 0.63 Ms$$

En el estudio de sismología, se plantean funciones para las aceleraciones de los hemisferios - Norte y Sur considerando efectos de los mecanismos focales y la posición de la estación con respecto a la fuente.

Estas funciones son:

$$a = 11.12 \times 10^{-0.404 Ms} (R^2 + h^2) \text{ Hemisferio - Norte}$$

$$s = 0.536 \times 10^{-0.5 Ms} (R^2 + h^2) \text{ Hemisferio - Sur}$$

Complementando con los datos de la U S G S en - sus reportes hasta 1970, los autores efectúan - un análisis de los parámetros de recurrencia y plantean una ecuación como la desarrollada por Gutenberg y Richter, (1954), siendo los paráme - tros "a" y "b" calculados como sigue:

$$\log N = 4.84 - 0.7 M$$

Luego considerando los datos sísmicos para un área de un radio aproximado de 125 Km. alrede - dor de Poechos, obtuvieron la ecuación:

$$\log N = 3.03 - 0.612 M.$$

la cual indica que se espera:

Un sismo de  $M = 7$  cada 18 años.

Un sismo de  $M = 8$  cada 75 años.

El riesgo sísmico en dicho estudio es determina

do siguiendo la metodología desarrollada por Cornell (1968) y presenta información de los promedios de recurrencia de eventos sísmicos de magnitudes mayores o iguales a 4.5 mb para un período de 74 años. Para la evaluación del peligro sísmico, los autores han considerado cuatro zonas sismogénicas, Figura 2-2, Ica-Paita, Esmeralda-Buenaventura, Paita-Bucaramanga, abarcando hasta Colombia y zona Sub-Andina. En la tabla 2-1 y Figura 2-3 se presenta la recurrencia de los eventos por zona sismogénica y por año, pero los autores no presentan en dicho estudio las ecuaciones de recurrencia.

Finalmente los autores establecen curvas de probabilidades de ocurrencia de sismos de una intensidad máxima Mercalli Modificada para tres lugares seleccionados (Sechura, Parachique y Bayóvar). Estas curvas se muestran en las Figuras 2-4, 2-5 y 2-6.

Existen varios estudios de Riesgo Sísmico para la zona de Piura, uno de estos estudios fué realizado por el Dr. Huaco (1979) donde presenta la determinación probabilística del Peligro Sísmico del Departamento de Piura en función de la distribución de aceleraciones para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, utilizando el método de Cornell (1968).

El estudio presenta una expresión de conversión de valores Ms a mb para utilizar los sismos anteriores a 1960. Esta conversión es realizada mediante la ecuación:

$$mb = 3.05 + 0.43 Ms$$

Para la aplicación del programa RISK se utilizan cuatro zonas sismogénicas, que se presentan en la Figura 2-7 cuyas recurrencias sísmicas se indican en la Tabla 2-2

donde:  $\beta = b \ln 10$   
 $\nu =$  razón de recurrencia /año

En dicho informe se presenta una ley de atenuación de aceleración en función de la magnitud y la distancia, con datos obtenidos en el Perú utilizando las aceleraciones de 23 registros como sigue:

$$a = 49021 e^{0.18 mb} (R + 60)^{-1.5}$$

donde:

a = aceleración en cm/seg<sup>2</sup>  
R = Distancia en Km.  
mb = Magnitud basada en ondas de cuerpo

Fundamentalmente el estudio presenta aceleraciones probables para el departamento de Piura para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. (Fig. 2-8, 2-9, 2-10 y 2-11).

Otros investigadores como Casaverde y Vargas - (1980) presentan la Zonificación Sísmica del Perú, basado en métodos probabilísticos en mapas de distribución de aceleraciones máximas de todo el Perú para períodos de retorno de 30, 50 y 100 años. Para dicho estudio también utilizaron el método de Cornell(1968). Para la aplicación del programa de cómputo RISK en el Perú, se describen zonas sismogénicas indicadas en la Fig.2-12.

El estudio presenta las siguientes ecuaciones de atenuación para las aceleraciones, velocidades y desplazamientos:

$$a = 68.7e^{0.8M} (R + 25)^{-1.0}$$

$$v = 13 e^{1.0M} (R + 25)^{-1.5}$$

$$d = 0.41e^{1.2M} (R + 25)^{-1.3}$$

donde:

a = aceleración en cm/seg<sup>2</sup>

v = velocidad en cm/seg

d = desplazamiento en cm

M = magnitud de ondas superficiales

R = distancia hipocentral en Km.

Finalmente los autores presentan los mapas de aceleraciones máximas para períodos de retorno de 30, 50 y 100 años.

Posteriormente, el Dr. Huaco (1981-1982) realiza estudios para la determinación probabilística del "Peligro Sísmico" para diversas zonas del Proyecto Olmos, y del Transvase Mantaro, donde muestra curvas de riesgo anual versus aceleración sísmica, utilizando el método de Cornell (1968), modificada por Mc Guire (1976).

Para la zona Norte muestra un resumen de los trabajos de Tectónica Regional (Palacios, 1979) y Neo Tectónica, (Sebrier, 1978) del Nor Oeste del Perú y la zona de Bayóvar. Para la zona centro del Transvase Mantaro presenta un resumen sobre los trabajos de tectónica regional, Isacks et al (1968) y Stauder (1975).

El autor presenta un estudio de la Sismicidad Histórica en función de los datos de isosistas (Silgado, 1979), estableciendo una ley anisotrópica de atenuación de las intensidades tal como:

$$I = I_0 R^{-0.066} e^{0.16 (\cos \phi)} - 0.001R$$

donde:

R = distancia epicentral en Km. para un eje que coincide con la mayor elongación de la Elipse de intensidad, en general paralela a la Costa.

$\phi$  = Angulo que hace el eje mayor de la elipse y el lugar de interés.

$I_0$  = Intensidad epicentral (MM)

I = Intensidad en el lugar de interés (MM)

En lo referente al estudio de sismicidad plantea una ecuación que relaciona la magnitud  $m_b$  y las intensidades  $M_s$  para sismos ocurridos entre 1962-1980 como sigue :

$$m_b = 3.3 + 0.42 M_s$$

El estudio presenta también características de los mecanismos focales de algunos de los sismos ocurridos en las áreas en estudio. Para el cálculo del Riesgo Sísmico utilizó el programa RISK identificando seis zonas Simogénicas para la zona de Olmos (Figura 5-3), y seis fuentes sísmicas para la zona del Transvase Mantaro (Figura 5-7), obteniendo sus respectivas ecuaciones de recurrencia y propone una ley de atenuación tal como:

$$a = 4359 e^{0.41 M_s} (R + 50)^{-1.2}$$

donde:

a = aceleración en cm/seg<sup>2</sup>

R = distancia epicentral en Km.

M<sub>s</sub> = magnitudes basada en ondas superficiales

El estudio en mención presenta resultados para diversos puntos del proyecto Olmos y del Proyecto Transvase Mantaro donde se han calculado diferentes valores de aceleraciones, los que se indican en las tablas 2-3 y 2-4 respectivamente.

Un mapa probabilístico de distribución de Intensidades para diferentes períodos de retorno, utilizando la Metodología de Cornell (1968) y modificada por Mc Guire (1976) es presentado por Casaverde y Vargas (1982).

La información macrosísmica que indican está relacionada al trabajo realizado por Silgado (1968) y plantean un mapa de zonificación sísmica en bases a intensidades calculadas mediante ecuaciones empíricas, estableciendo una correlación de la destructividad de los terremotos con un factor proveniente de registros sísmicos.

El estudio en referencia presenta una expresión que relaciona los parámetros de intensidad sísmica, magnitud y distancia hipocentral dado por:

$$I - 5.972 = 1.00756 M - 1.26 \ln ( R + 25 )$$

donde:

I = intensidad

M = magnitud

R = distancia hipocentral

Se considera la distancia hipocentral porque la gran mayoría de los datos instrumentales proviene de sismos cuyos focos están bajo el mar.

Los autores reconocen la incertidumbre e inconsistencia existentes debido a la limitada información y los inconvenientes que presenta la escala de intensidad de Mercalli Modificada. Las fuentes simogénicas son las presentadas en Casa verde y Vargas (1980) con datos instrumentales hasta 1980, presentando valores de recurrencias y tasa de actividad sísmica para el período anterior y otro posterior a 1963, las Figuras 2-13, 2-14 y 2-15 presentan mapas de distribución de intensidades para períodos de retorno de 30, 50 y 100 años.

### 2.3 Estudios de Sismicidad y Riesgo Sísmico por otros procedimientos.

Existen muchos estudios de sismicidad efectuados por varios autores utilizando diferentes métodos. Por ejemplo la Teoría de Valores Extremos de Gumbel (1960) u otros procedimientos. Estos estudios presentan ecuaciones de recurrencia como los planteados por Gutenberg y Richter (1954), incluyen catálogos sísmicos proporcionados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), United States Geological Survey (USGS), National Earthquake Information Service (NEIS) o del International Seismological Center (ISC); y presentan descripción histórica de los sismos destructores en su mayoría relacionados a los trabajos de Silgado (1973, 1974, 1976). A continuación se presenta algunos de estos estudios cuya información está disponible.

(Lazo y Fuse, 1970) realizaron un estudio estadístico de la ocurrencia de sismos en la zona afectada por el terremoto del 31 de mayo de 1970. El estudio fué realizado entre los paralelos 8°S 11°S y entre los meridianos 76° y 79° Oeste. Para el efecto se hizo uso de los parámetros de índice de sismicidad, sismicidad específica, riesgo sísmico y período medio de retorno, desarrollando una ecuación similar a la planteada por Gutenberg y Richter (1954). La misma que ha sido calculada para el período comprendido entre 1963 y 1969 usando sismos  $mb > 4.2$ , dando los siguientes resultados:

$$\text{Log } N = 1.97806 - (0.03397 + 0.6775) mb$$

Los parámetros obtenidos para la región considerada han sido comparadas con los correspondientes a la región del Sur del país y con algunas regiones sismo-tectónicas del Japón.

En la zona de Piura, Huaco, Espejo, Flores (1972) realizaron un estudio para el Embalse Chira - Piura. En este estudio los autores indican que la actividad sísmica en el área del embalse del reservorio Chira-Piura está localizada entre 25 y 70 Km. de profundidad. Indican que la interacción entre las placas oceánica y continental bajo un ángulo de empuje 21°, sin embargo, según los autores el último sismo es asociado con una falla deslizante de 73°. Las relaciones entre la intensidad y distancia epicentral indican que 150 km. es la distancia crítica para que un sismo de magnitud  $mb = 7.75$  puede producir fuertes daños en la estructura de la presa.

Otros estudios, como la sismicidad en la zona - del embalse Zaña-Jequetepeque fueron estudiados por Huaco, Caldas y Huaco (1972) que estudiaron un área comprendida dentro de las coordenadas -  $5^{\circ}$  y  $10^{\circ}$  de latitud Sur y  $76^{\circ}$  y  $82^{\circ}$  de longitud Oeste. Según la sismicidad histórica y la reconstrucción de isosistas se deduce que la zona ha sido sacudida por varios sismos destructores. La zona cercana al lugar del embalse de la represa de Gallito Ciego, en el período de observación de 50 años muestra una sismicidad - relativamente baja, los puntos activos se encuentran a distancias entre 50 y 100 km; los sismos destructores que han ocurrido en el área estudiada están asociados a la interacción de las placas Oceánica y Continental y podría tener implicancia en el fallamiento secundario en área vecina al dique. Determinaron como distancia crítica para los sismos que podrían producir daños en las estructuras los 150 Km. y la relación con sismos de magnitud 7.0 mb. Los autores emplearon la teoría de valores extremos, de tal forma que sismos del orden de 7.0 podrían - ocurrir cada 7 años.

Son importantes también los estudios realizados en la zona Centro del Perú como: Berrocal, Deza y Shikiya (1975) quienes realizaron un estudio de riesgo sísmico para la derivación del Río Mantaro hacia Lima; el estudio cubre un área total comprendida entre las coordenadas  $9^{\circ}$  y  $16^{\circ}$  de latitud Sur y los lugares donde ELECTROPERU proyectó sus obras para el citado proyecto.

Los autores identificaron cinco zonas que aparentan tener características sismotectónicas par

ticulares, y cuyas respectivas actividades sísmicas podrían influir en forma diferente al riesgo sísmico existente en la zona de interés.

La presencia de una zona de transición situada entre los paralelos  $13.5^{\circ}$  y  $14^{\circ}$  de latitud sur, así como la presencia de la Dorsal de Nazca, dividen el área total de estudio en dos zonas, al sur y al norte de la zona de transición con características simostectónicas diferentes entre sí. La "Zona de Interés" se halla situada en la región norte, por tal razón las zonas de mayor influencia en la zona en estudio son en orden de importancia, la zona 4, la zona 2 y la zona 1.

Las zonas de mayor probabilidad de alto índice de sismicidad en los próximos 30 ó 40 años, son la zona 3 y la zona 4, así como la zona sísmica situada en el norte del departamento de Lima.

Las intensidades máximas observadas de la zona en estudio han ocurrido en su región norte, alcanzando posiblemente valores IX MM. Las aceleraciones máximas correspondientes pueden haber sido del orden de  $400 \text{ cm/seg}^2$  ó un tanto mayores. En la región Sur de la "Zona en estudio" (excepto en el foco sísmico situado a 50 Km. al noreste de Huancayo), las intensidades máximas observadas han sido menores (VI ó VII) MM y las aceleraciones máximas pueden haber alcanzado valores hasta de  $100 \text{ cm/seg}^2$  ó un tanto mayores.

La zona estudiada presenta mayormente actividad sísmica con profundidad 10 Km. siendo notable el bajo índice de sismicidad superficial y normal. La región norte de la zona de interés presenta

mayor deformación elástica que la región sur.

Los valores obtenidos de período de recurrencia con valores hasta  $m_b = 6.6$ . Para sismos  $m_b > 6.6$  indican que es necesario considerar que los períodos medios de recurrencia obtenidos en el estudio son menores que los valores reales. Considerando los sismos históricos pronostican que en el área de estudio puede ocurrir un sismo catastrófico ( $m_b 6.7$ ) aproximadamente cada 100 años.

Existen disponibles además otros estudios referidos a la actividad sísmica del Perú, muchos de los cuales se indican en la Bibliografía de los terremotos Peruanos; Aspectos Ingenieriles, presentados por Alva (1982) los cuales han sido consultados en el presente Estudio.

TABLA - 2-1

RECURRENCIA DE EVENTOS POR ZONA SISMOGENICA Y POR AÑO  
(Ocola et al, 1977)

Zona Esmeraldas - Buenaventura

$m_b$	$n$ sismo/año	$N_c$ sismo/año	T años incomp.
< 4.0			
4.0 <sup>+</sup> - 4.5	4.36	8.22	8
4.5 <sup>+</sup> - 5.0	2.63	3.86	8
5.0 <sup>+</sup> - 5.5	0.64	1.23	11
5.5 <sup>+</sup> - 6.0	0.56	0.59	18
6.0 <sup>+</sup> - 6.5	0.02	0.03	74
6.5 <sup>+</sup> - 7.0	0.01	0.01	74

Zona Paita-Bucaramanga

$m_b$	$n$ sismo/año	$N_c$ sismo/año	T años incomp.
< 4.0			
4.0 <sup>+</sup> - 4.5	10.55	27.41	11
4.5 <sup>+</sup> - 5.0	11.91	16.86	11
5.0 <sup>+</sup> - 5.5	3.27	4.95	11
5.5 <sup>+</sup> - 6.0	1.45	1.68	13
6.0 <sup>+</sup> - 6.5	0.22	0.22	23

Zona Ica - Paita

$m_b$	$n$ sismo/año	$N_c$ sismo/año	T años incomp.
< 4.0			
4.0 <sup>+</sup> - 4.5	7.45	27.11	11
4.5 <sup>+</sup> - 5.0	11.82	19.66	11
5.0 <sup>+</sup> - 5.5	6.4	7.84	10
5.5 <sup>+</sup> - 6.0	1.1	1.44	20
6.0 <sup>+</sup> - 6.5	0.33	0.34	30
6.5 <sup>+</sup> - 7.0	0.01	0.01	388*

Zona Sub - Andina

$m_b$	$n$ sismo/año	$N_c$ sismo/año	T años incomp.
> 3.75			
3.75 <sup>+</sup> - 4.25	6.7	33.02	9
4.25 <sup>+</sup> - 4.75	15.78	26.32	9
4.75 <sup>+</sup> - 5.25	8.0	10.54	10
5.25 <sup>+</sup> - 5.75	1.93	2.54	15
5.75 <sup>+</sup> - 6.25	0.56	0.61	50
> 6.25	0.05	0.05	74

- $m_b$  magnitud
- $n$  número de sismos dentro del rango de magnitud por año
- $N_c$  número de sismos con magnitud igual o mayor que - el límite inferior de la clase por año.
- \* datos catálogo instrumental complementado con datos históricos.
- incomp.: incompleto.

TABLA - 2 -2

PARAMETROS DE RECURRENCIA  
( Huaco, 1979)

Zona	Mag. Inf. de Richter	Mag. Sup. de Richter	$\beta$	Tasa	Profundidad Km.
F1	4.5	6.75	2.648	5.600	-
F2	4.5	6.75	2.487	4.010	-
F3	4.5	6.75	2.464	2.030	-
F4	4.5	6.75	2.659	5.110	-

TABLA - 2 - 3

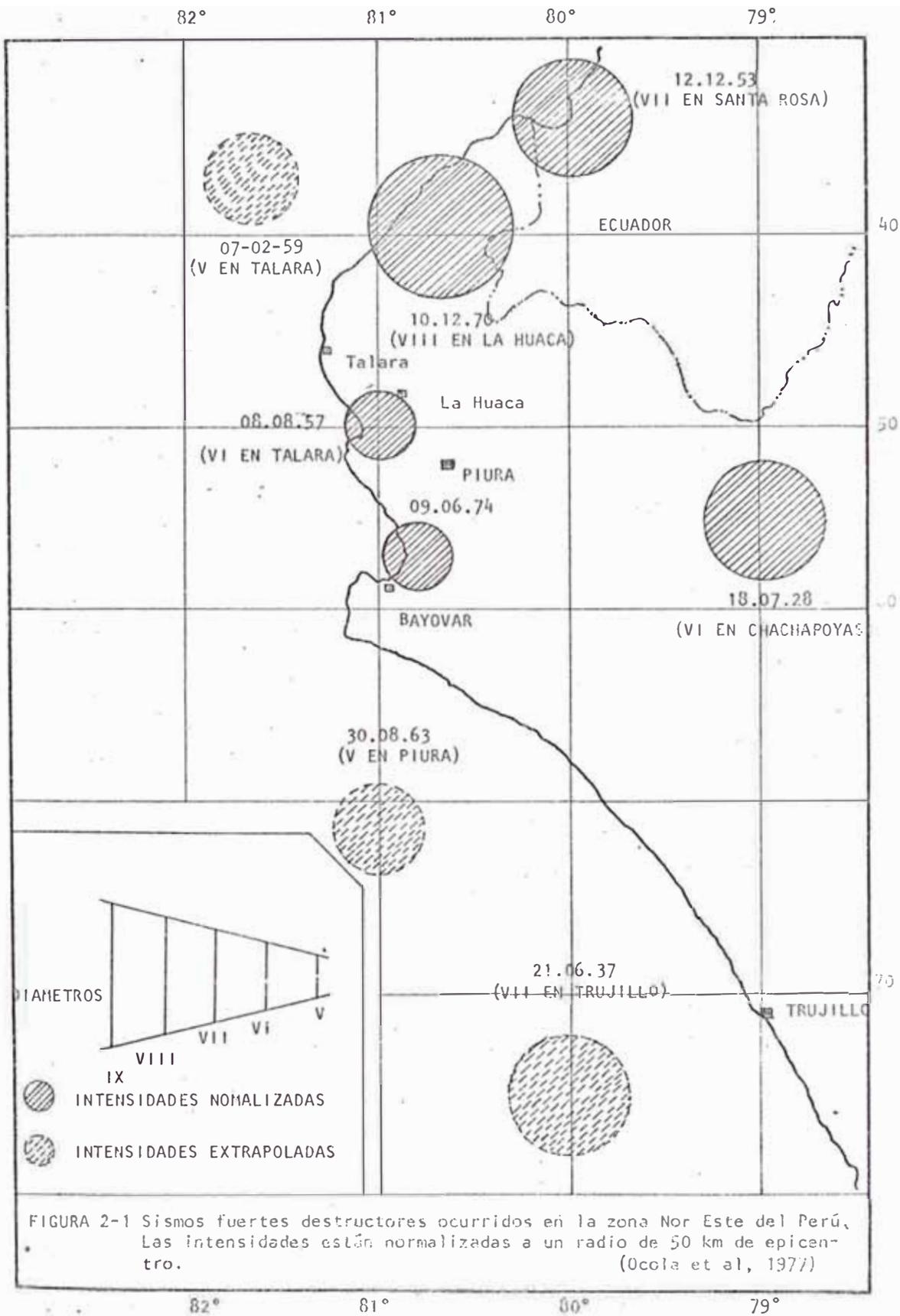
PELIGRO SISMICO ANUAL EN BASE A LA MAXIMA ACELERACION  
(Huaco, 1981 )

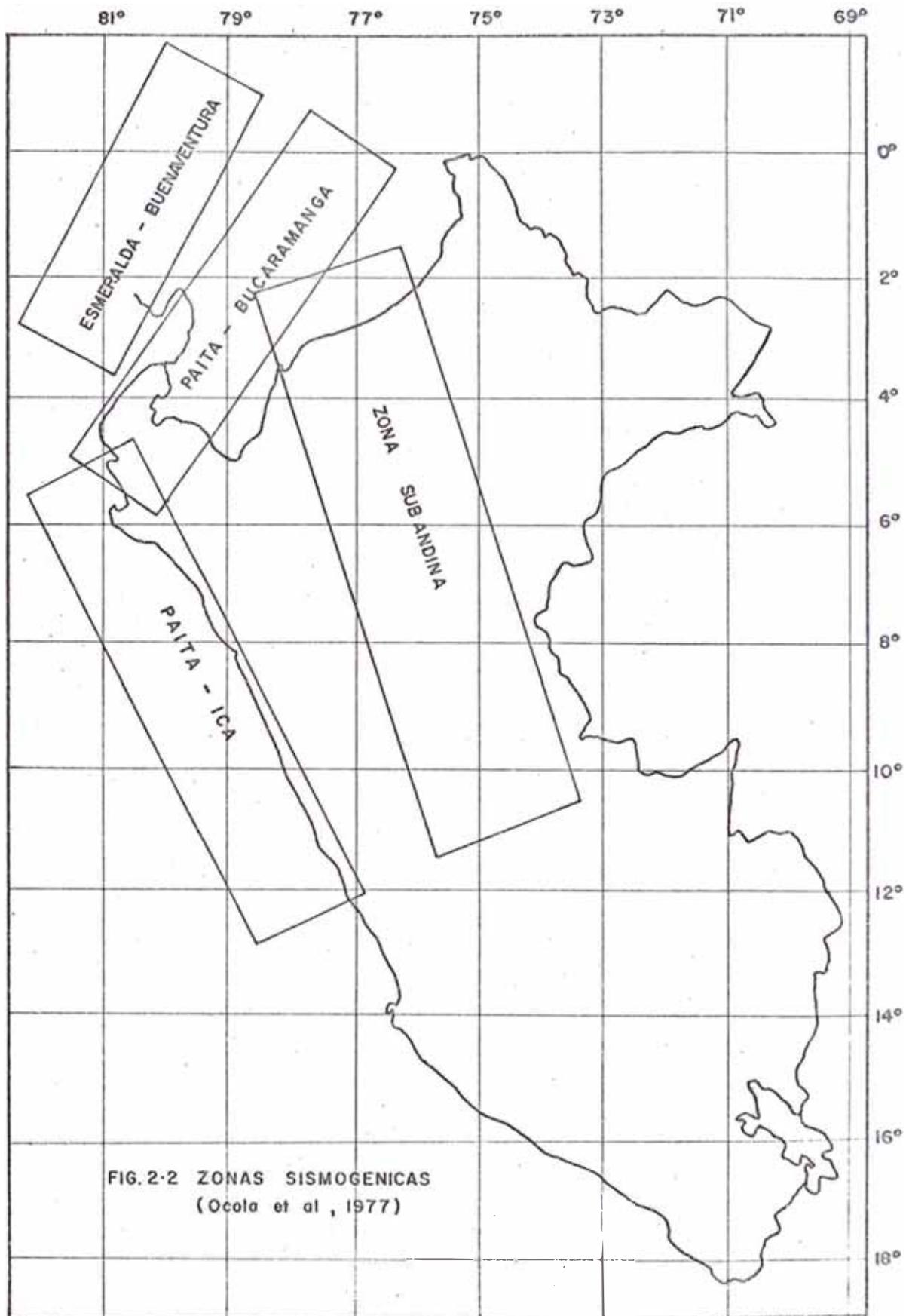
s	)	Período de Retornos ( años)			
		10	50	100	500
Presa Olmos		150	250	300	450
Central Hidroeléctrica I		145	240	290	420
Central Hidroeléctrica II		145	240	290	430
Salida Túnel Trsandino		145	235	285	420
Entrada Túnel Trasandino		145	235	385	415
Túnel Río Huancabamba		155	260	315	460
Río Manchava		160	270	320	465
Río Tabaconas		165	275	320	480

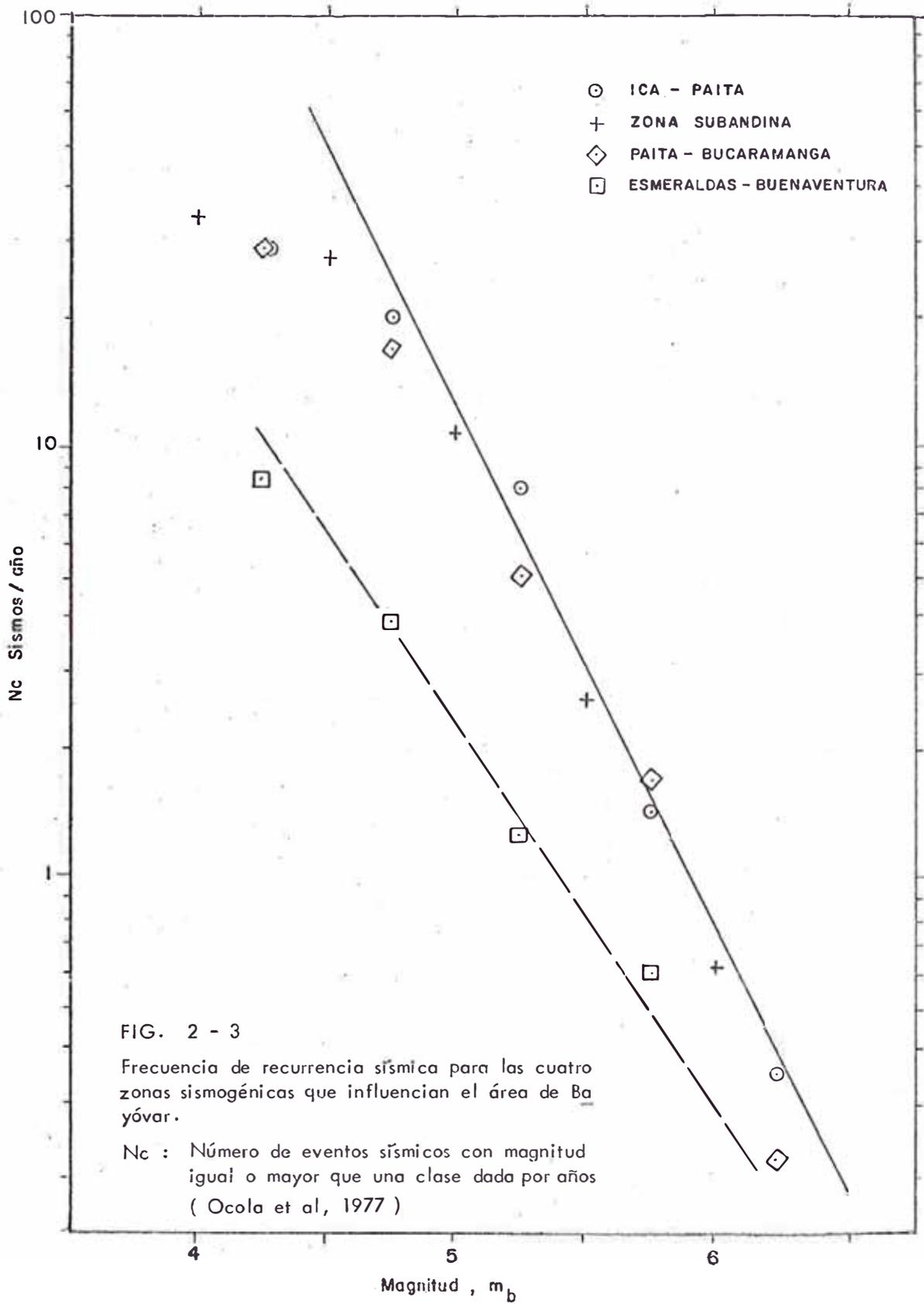
TABLA - 2 - 4

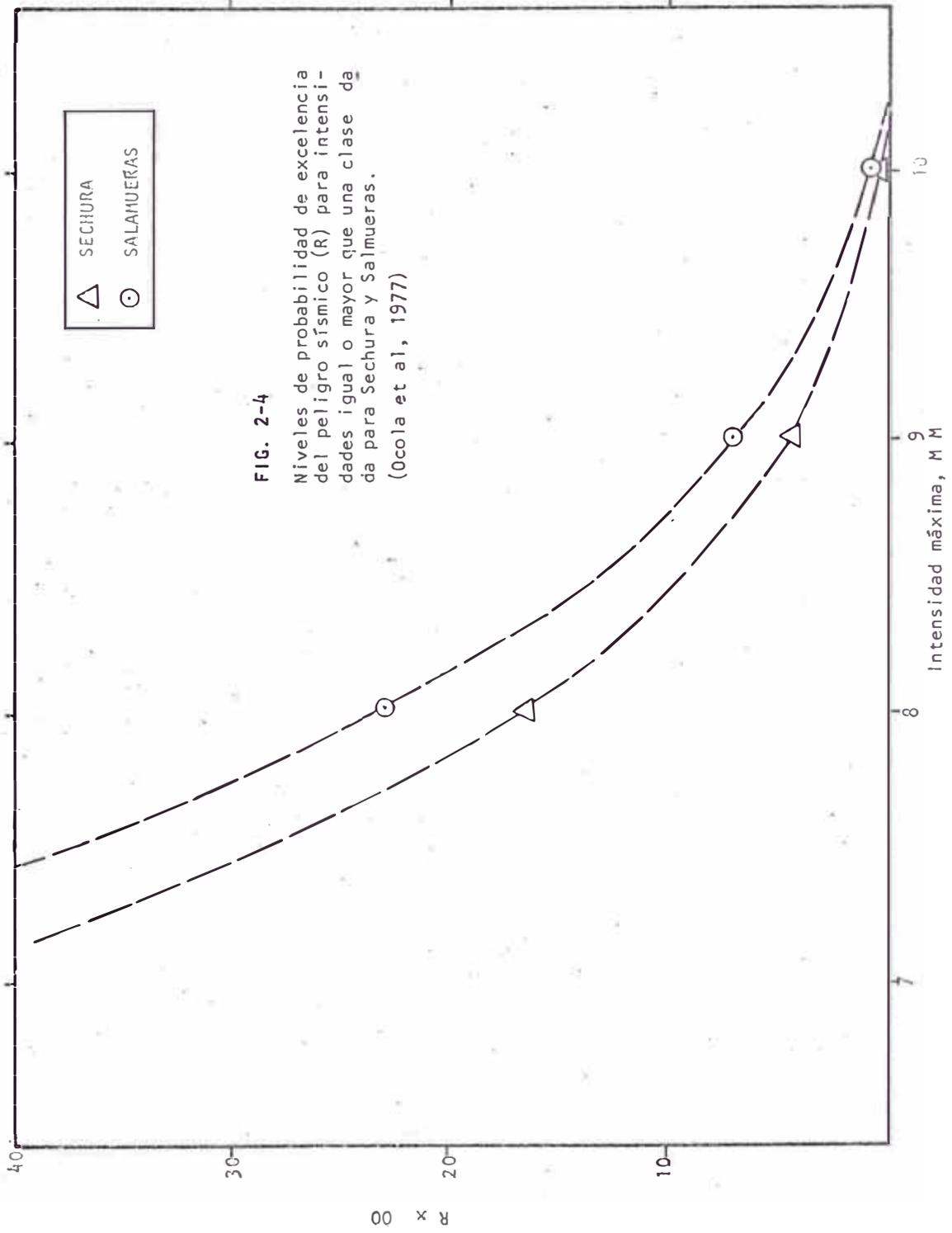
PELIGRO SISMICO EN BASE A LA MAXIMA ACELERACION  
(Huaco, 1982)

Puntos Analizados	Aceleración (cm/seg <sup>2</sup> )	Periodo de Retorno (años)					
		10	20	50	100	200	500
1	76.33°W 11.40°S	176	211	283	306	356	430
2	76.29°W 11.41°S	177	212	264	309	358	431
3	76.28°W 11.36°S	177	212	265	309	358	432
4	76.16°W 11.29°S	182	218	172	319	371	449
5	76.27°W 10.92°S	178	211	262	307	356	432









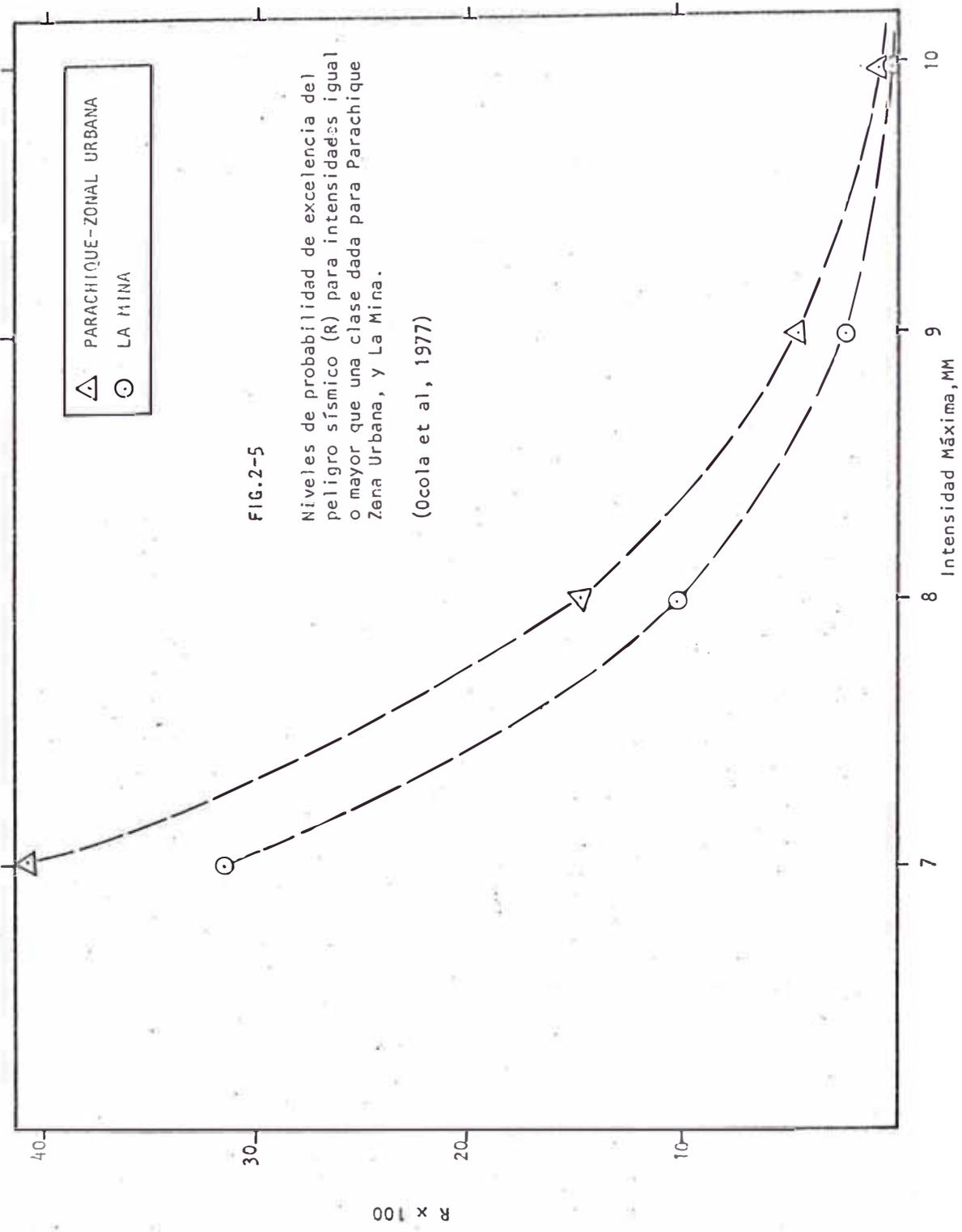
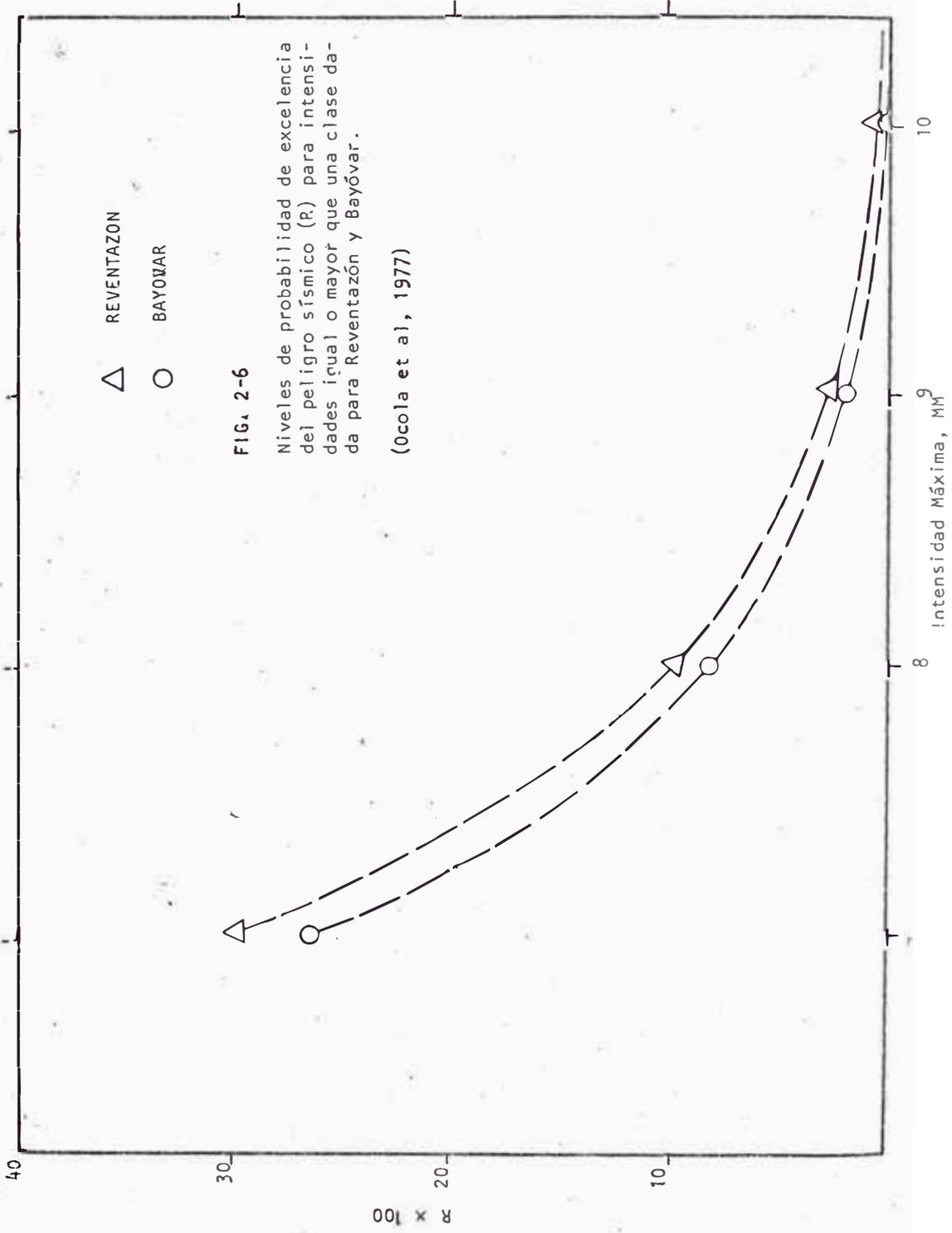


FIG.2-5

Niveles de probabilidad de excelencia del peligro sísmico (R) para intensidades igual o mayor que una clase dada para Parachique Zona Urbana, y La Mina.

(Ocola et al, 1977)

△ PARACHIQUE-ZONAL URBANA  
○ LA MINA

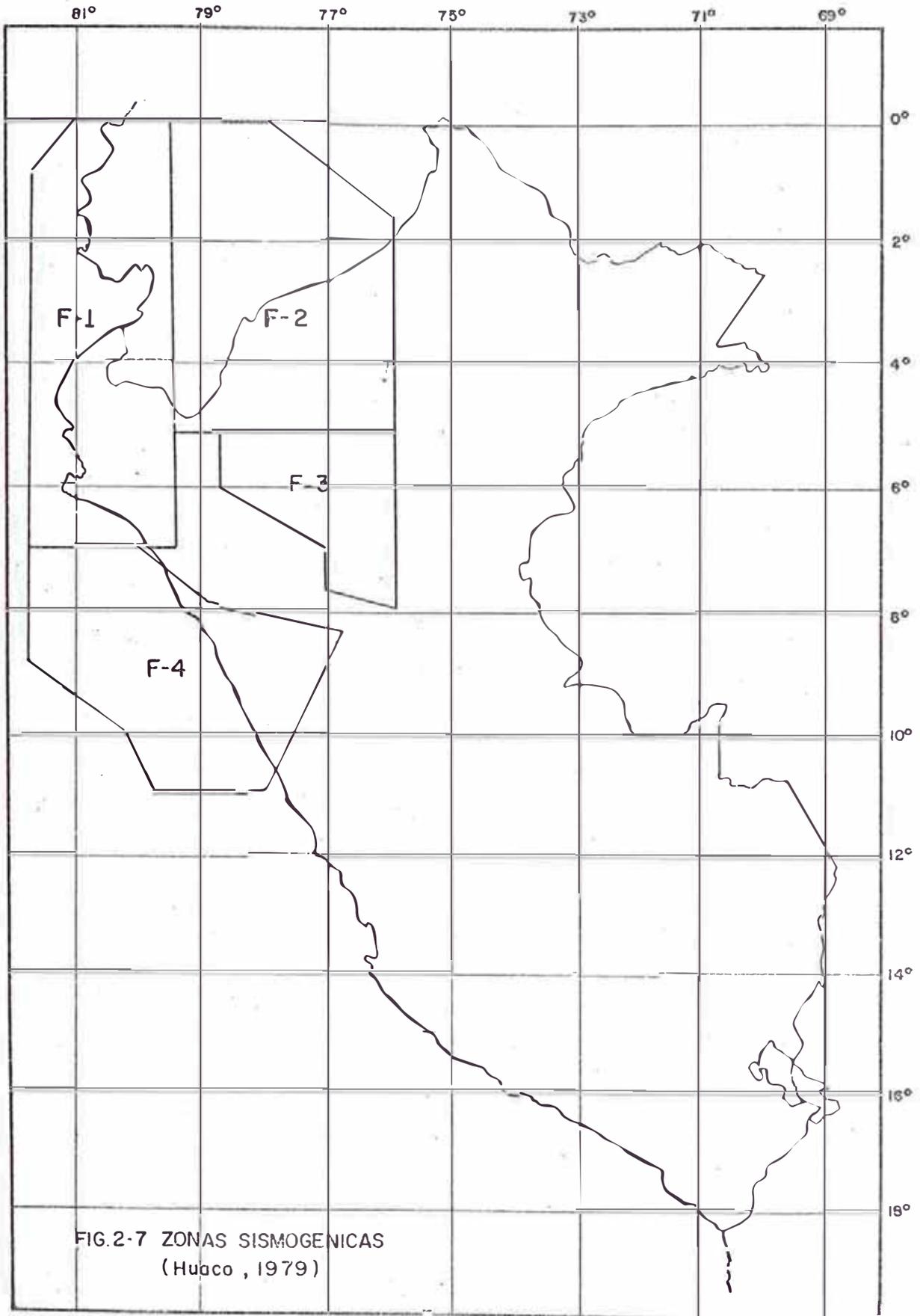


△ REVENTAZON  
○ BAYOVAR

FIG. 2-6

Niveles de probabilidad de excelencia del peligro sísmico (R) para intensidades igual o mayor que una clase dada para Reventazón y Bayóvar.

(Ocola et al, 1977)



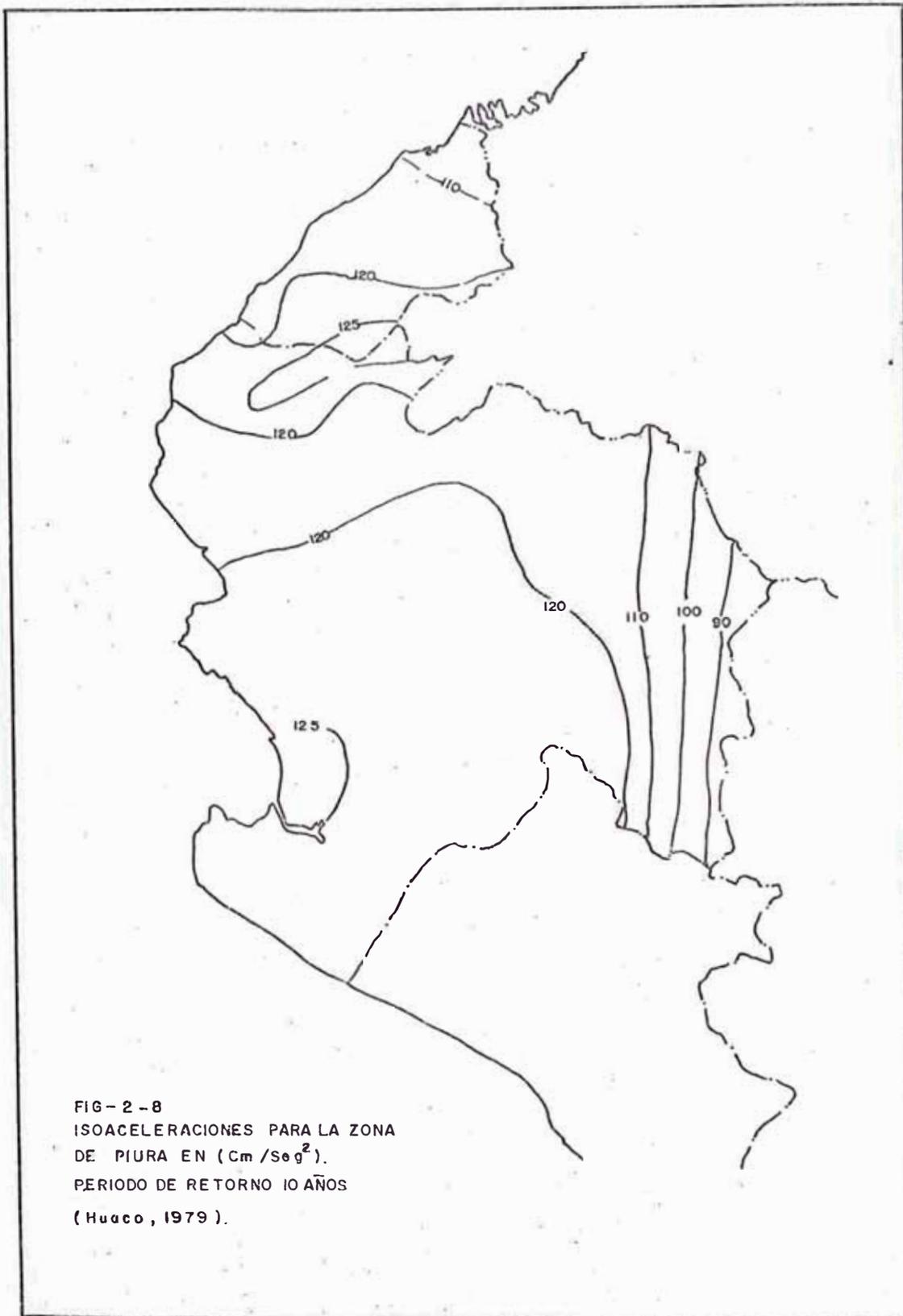


FIG-2-8  
ISOACELERACIONES PARA LA ZONA  
DE PIURA EN ( $\text{Cm/Seg}^2$ ).  
PERIODO DE RETORNO 10 AÑOS  
(Huaco, 1979).

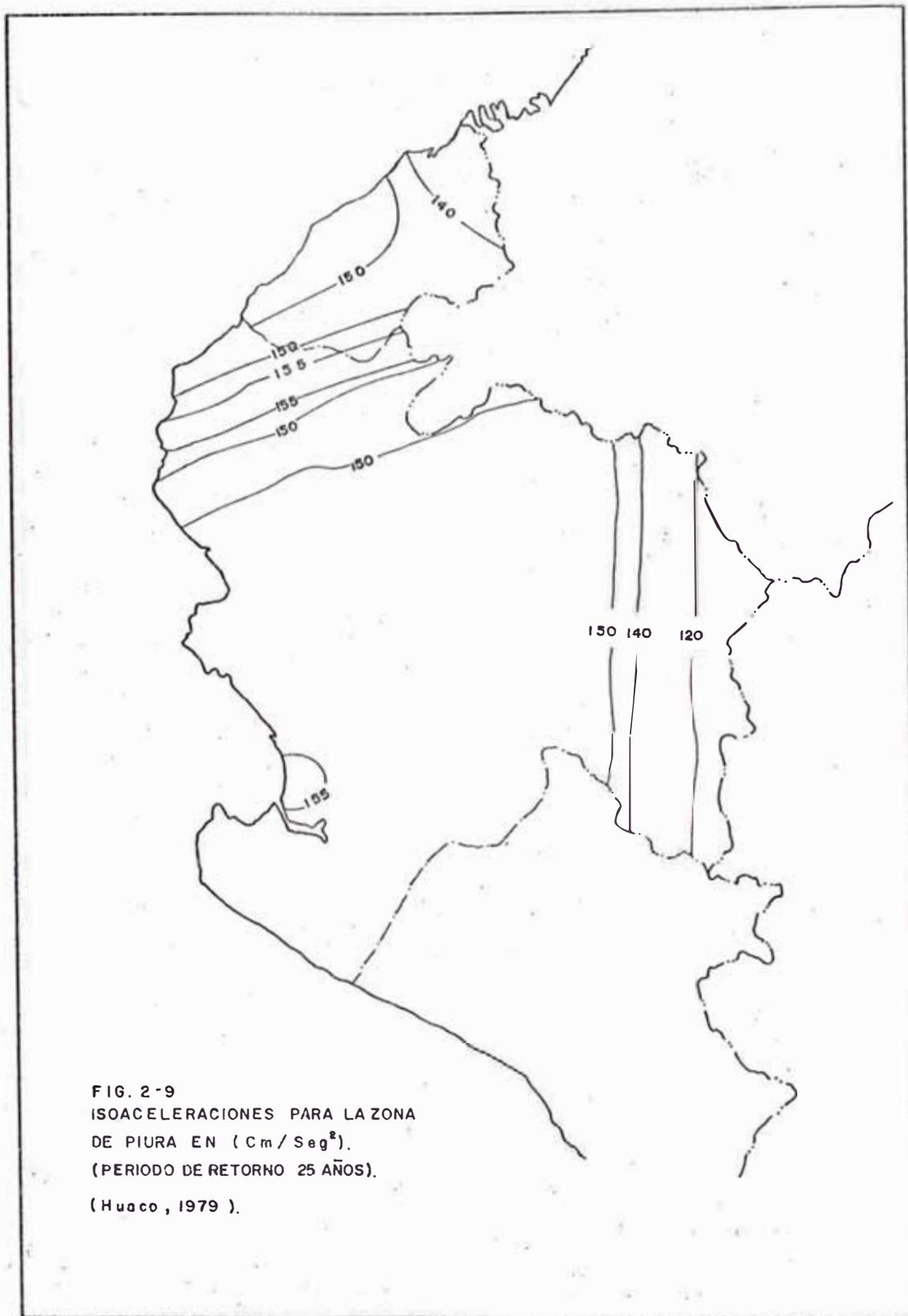
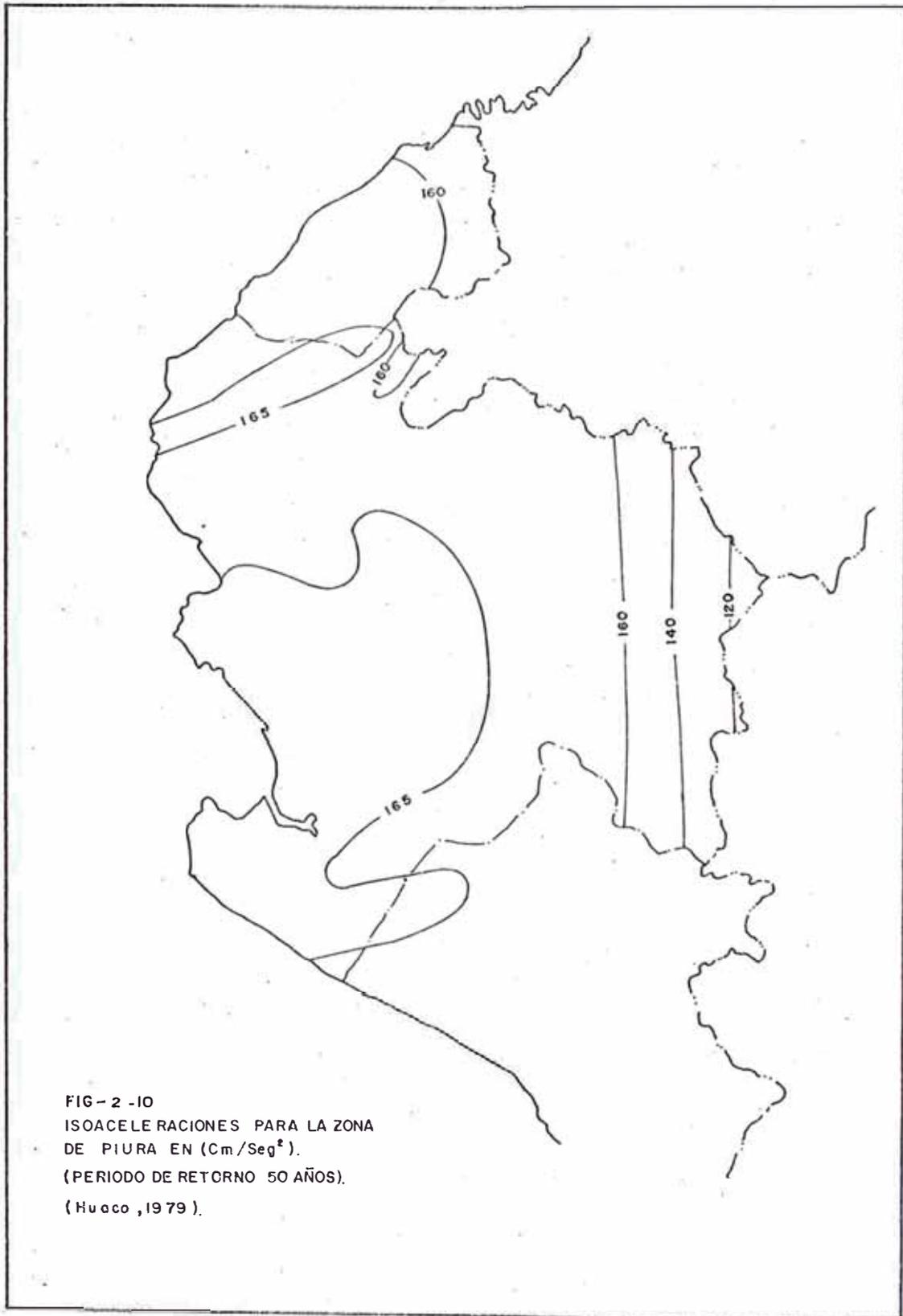
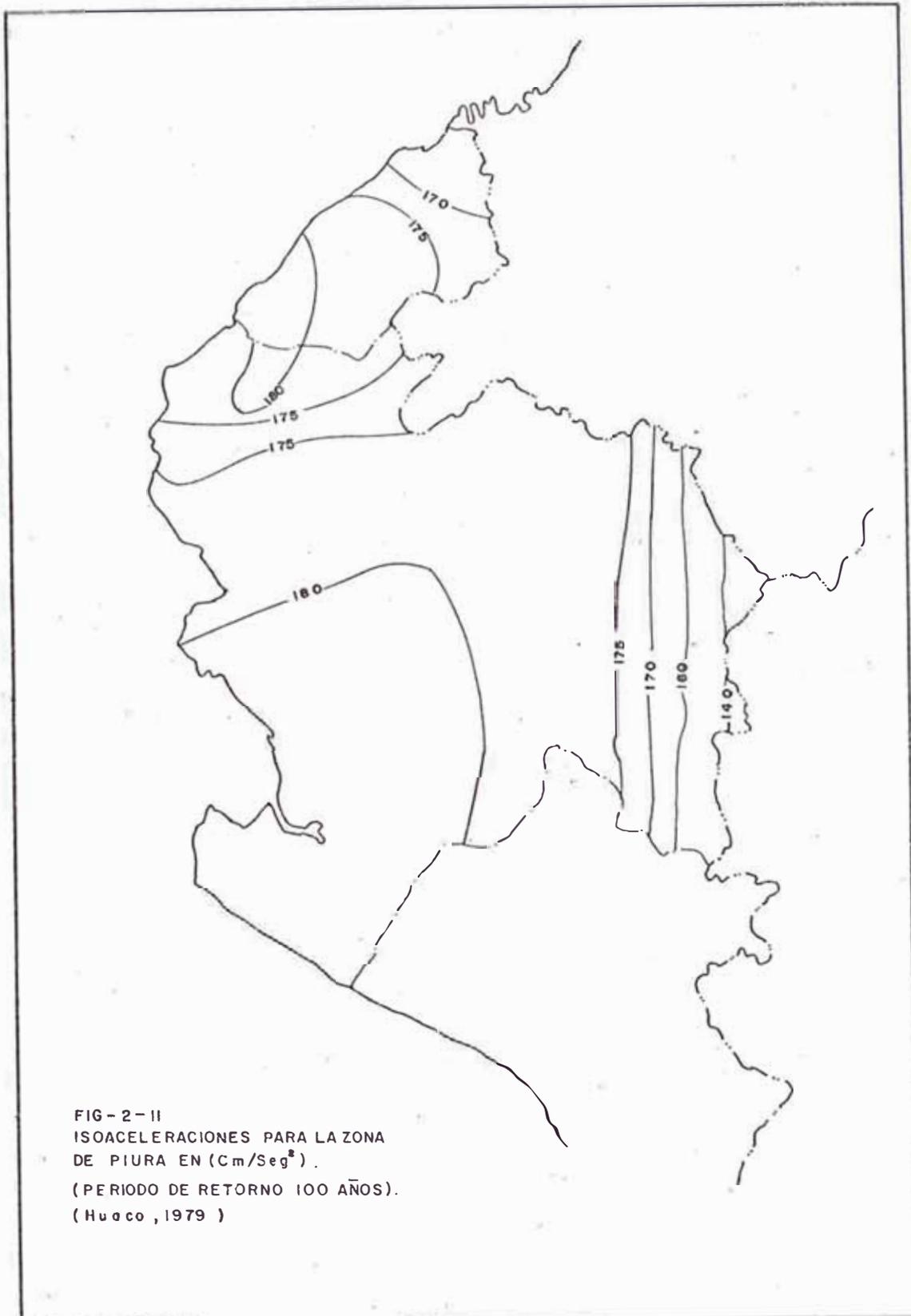
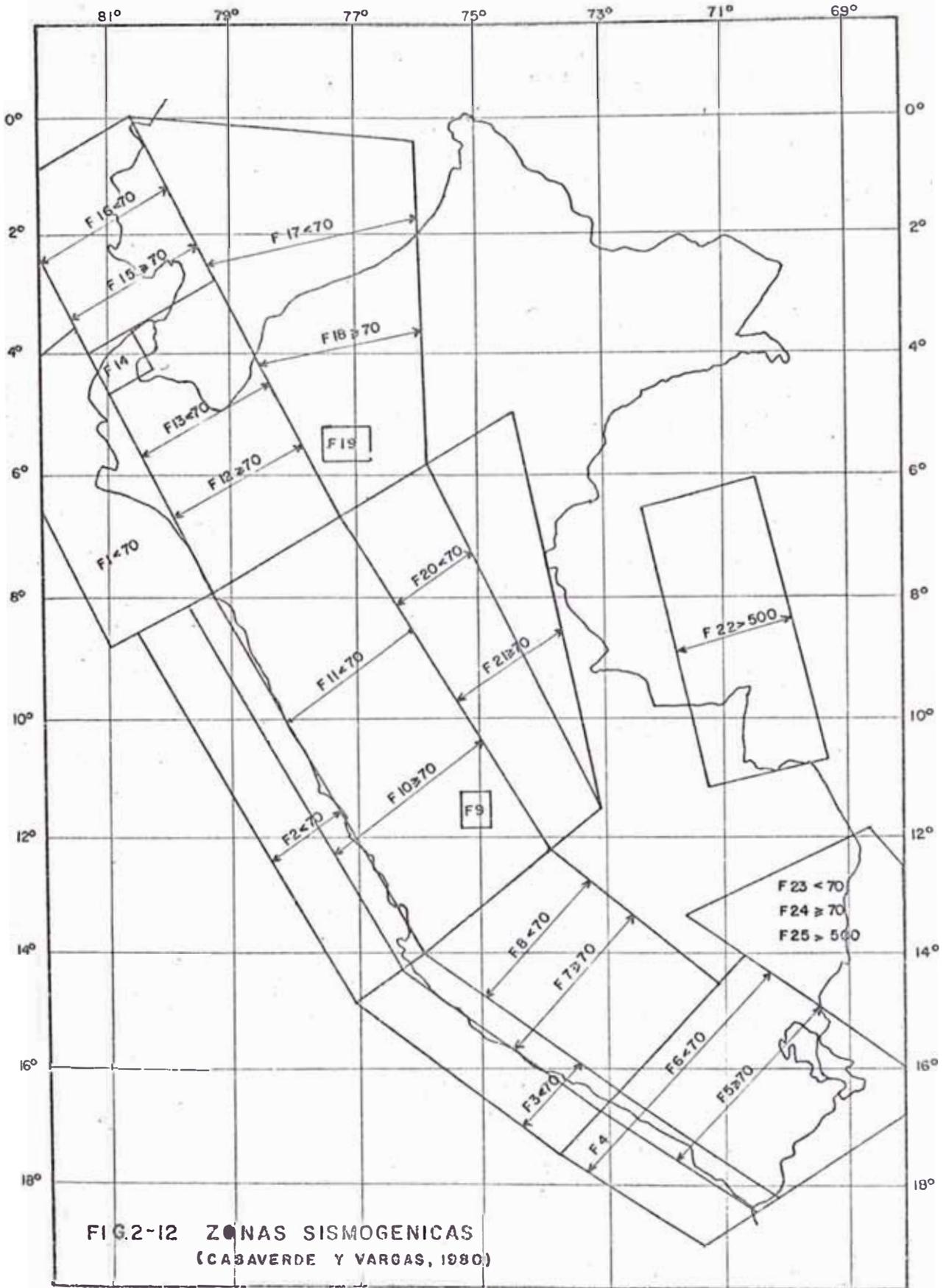
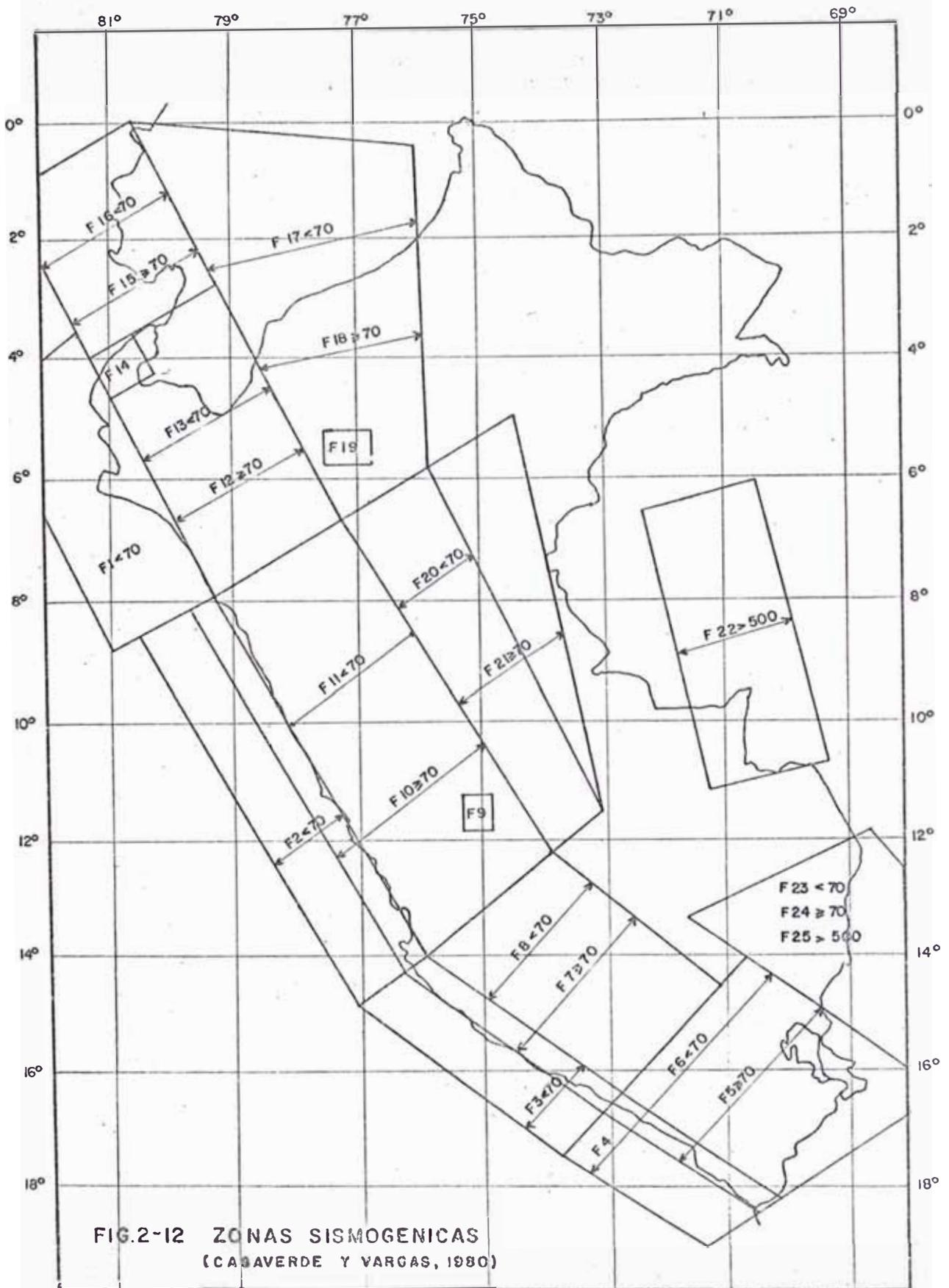


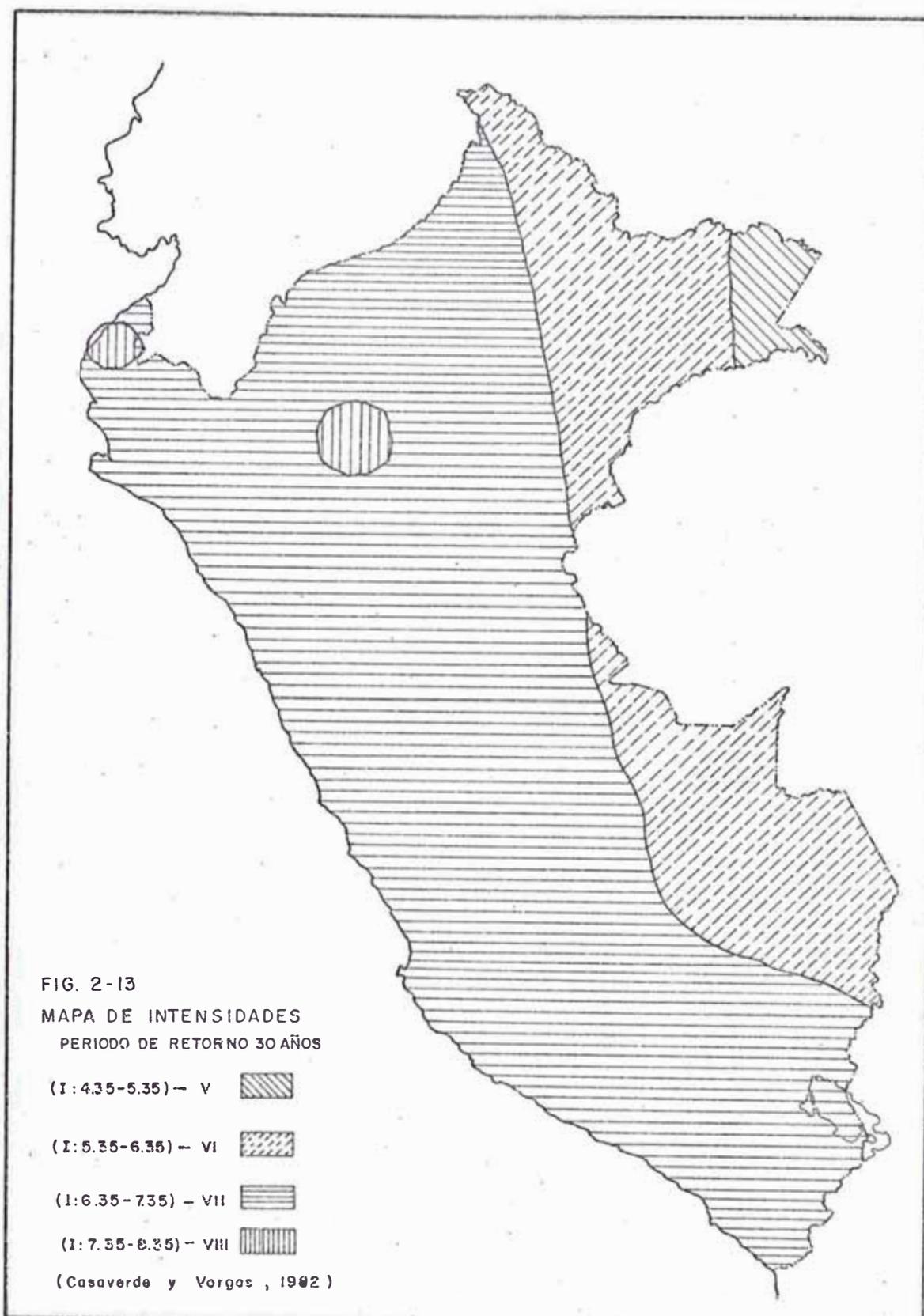
FIG. 2-9  
ISOACELERACIONES PARA LA ZONA  
DE PIURA EN (Cm/Seg<sup>2</sup>).  
(PERIODO DE RETORNO 25 AÑOS).  
(Huaco, 1979).



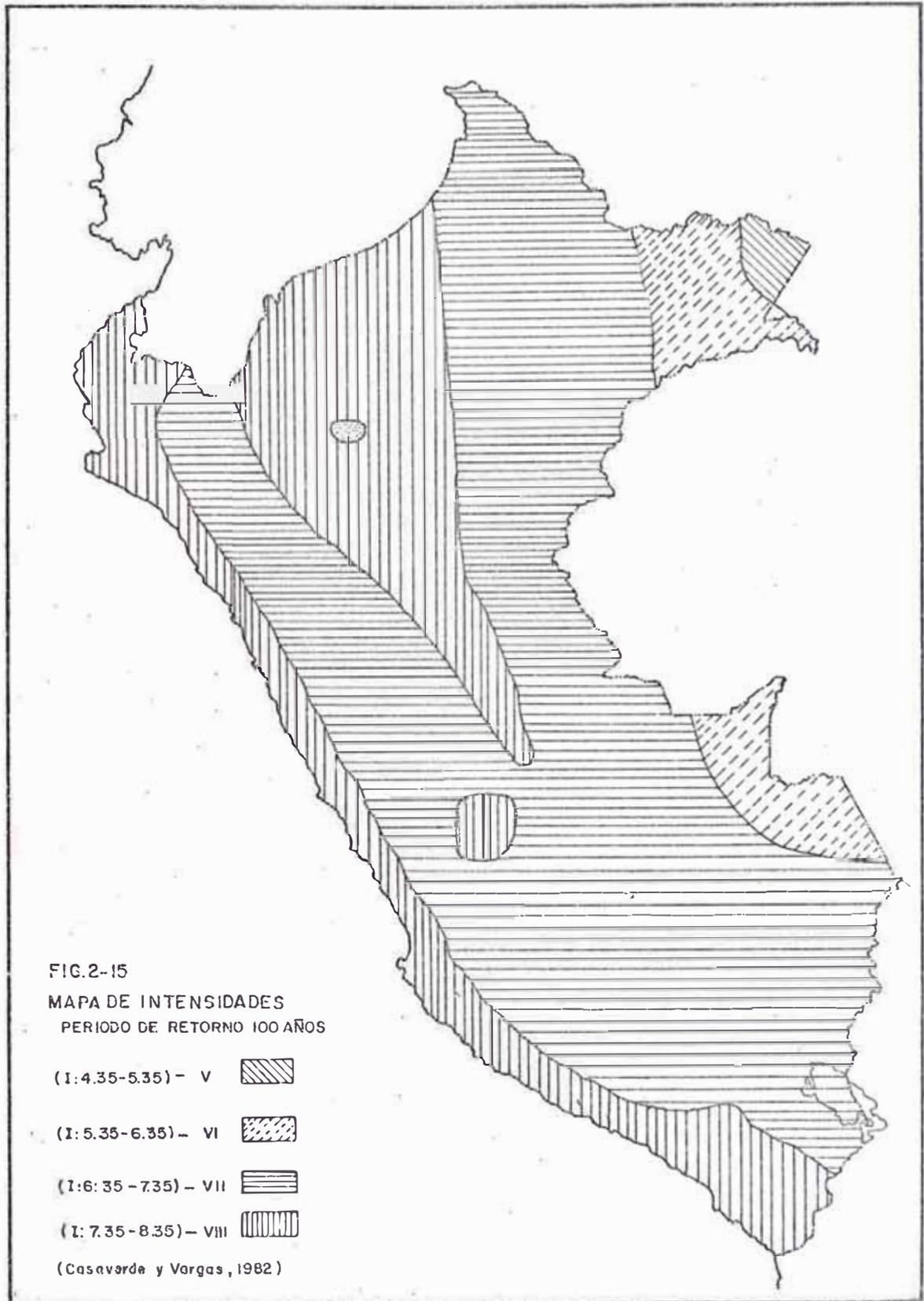












## C A P I T U L O    I I I

### 3.    DISTRIBUCION DE INTENSIDADES MAXIMAS EN EL PERU.

#### 3.1    Introducción

Uno de los objetivos del Grupo de Peligro Sísmico dentro del Proyecto SISRA (Mitigación de Daños Causados por un Terremoto en la Región Andina), patrocinado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur, fué confeccionar un Mapa de Distribución de Máximas Intensidades en la Escala Mercalli Modificada a nivel regional. Este mapa debería representar los niveles de años producidos por los terremotos ocurridos, sin distinguir si tales daños se debieron a la vibración localizada del suelo, licuación de suelos, deslizamientos u otros fenómenos locales.

Las intensidades máximas deberían expresarse por medio de curvas isosistas, incluyendo eventos históricos de importancia hasta el 31 de diciembre de 1981. El Mapa de cada país estaría dibujado a la escala de 1: 2'000,000, mientras que el mapa regional estaría a la escala de 1:5'000,000. Dichos mapas deberían tener una simbología uniforme.

En este Capítulo se presenta el mapa de distribución de máximas intensidades sísmicas en el Perú a escala 1:2'000,000 confeccionado en este estudio y su documentación.

Igualmente se presenta a la misma escala el mapa preliminar de intensidades máximas del Proyecto SISAN elaborado por el Dr. Ocola y una compilación de mapas de isosistas de diversos autores.

### 3.2 Información Básica

Se efectuó una revisión y recopilación de la información disponible en la literatura sobre datos de intensidades sísmicas históricas y mapas de distribución de isosistas existentes en el Perú. La información relevante se presenta en las referencias de este estudio.

La información disponible de sismos históricos - mayormente consistió de las descripciones de sismos publicadas por Silgado (1973, 1977 y 1978 ). Además, por gentileza del Dr. Leonidas Ocola del Instituto Geofísico del Perú, se tuvo a disposición su mapa preliminar de Intensidades Máximas (Escala MSK) de 1471-1974, elaborado como parte

del Proyecto SISAN patrocinado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur y la Organización de los Estados Americanos. Una copia de este mapa se incluye.

De la información sísmica existente (Alva Hurtado 1981) se determinaron veintisiete mapas de isosistas de sismos con fechas de ocurrencia de 1912 a 1981. Estos mapas de isosistas se dibujaron en un mismo formato, consultando los trabajos originales para corregir errores existentes en publicaciones recientes. Una copia de cada una de los isosistas utilizadas se presentan en el Anexo A.

En adición a la información sobre sismos históricos y mapas de isosistas existentes, se obtuvieron datos puntuales de intensidades de sismos a partir de 1945. La información publicada por el Dr. Enrique Silgado cubre intensidades de sismos de 1945 a 1955 en los boletines No3, 7, 11 y 13 del Instituto Geológico del Perú; en los boletines Nos. 4, y 8 del Instituto Nacional de Investigación y Fomento Mineros y en el Tomo 29 de la Sociedad Geológica del Perú. Durante dichos años para cada sismo importante ocurrido se publicaban intensidades determinadas en localidades cercanas al epicentro. Para sismos recientes se ha utilizado la información puntual de intensidades publicadas por el Instituto Geofísico del Perú.

### 3.3 Metodología utilizada

En resumen, la metodología utilizada consistió en compatibilizar los valores de intensidades sísmicas disponibles y superponer dichos valores

en un mapa del Perú a escala 1: 2'000,000. Algunos valores de intensidad fueron corregidos, las correcciones se documentan en este reporte.

En primer lugar se ubicaron en el mapa los valores de intensidades por localidades publicados por Silgado y por el Instituto Geofísico del Perú. Se uniformizaron los mapas de isosistas a la escala de intensidades Mercalli Modificada, corrigiendo algunos valores de intensidades siguiendo los criterios de Silgado (1977) y Ocola (1982). Se superpusieron en el Mapa del Perú a escala 1:2'000,000 los mapas de isosistas corregidos. Se añadieron al mapa los valores extremos históricos del mapa preliminar de Ocola. Finalmente, en base a la información anterior se trazaron las curvas de intensidades máximas. En el mapa de distribución de máximas intensidades que se presenta en este Capítulo se indican líneas de contorno para las intensidades de los sismos del presente siglo, y valores extremos para los sismos históricos.

A continuación se documenta las modificaciones efectuadas a los mapas de isosistas de sismos del presente siglo y sus referencias.

- Sismo 24 de julio de 1912. Se disminuyó el valor de la máxima intensidad MM a VIII y el epicentro se situó al Oeste del mapa original. (Silgado, 1977).
- Sismos 6 de agosto de 1913, 4 de noviembre de 1913 y 2 de diciembre de 1914. Se disminuyó el valor de la máxima intensidad MM a VIII (Ocola, 1982).

- Sismo 14 de mayo de 1928. Se disminuyó el valor de la máxima intensidad MM a IX. (Silgado, 1977 y Ocola 1982).
- Sismo 10 de noviembre de 1946. Se incorporó el valor extremo de intensidad MM a XI. (Ocola, 1982).
- Sismo 01 de noviembre de 1947. Se incorporó el valor extremo de intensidad MM de X. (Ocola, 1982).
- Sismo 21 de mayo de 1950. Se incorporará el valor extremo de intensidad MM de VIII. (Ocola, 1982).
- Sismo 19 de junio de 1968. Se aumentó el valor de la máxima intensidad MM de X. (Kuroiwa y Deza, 1968).
- Sismo del 01 de octubre de 1969. Se aumentó el valor de la máxima intensidad MM de XI. (Ocola, 1982).

En el trabajo se presentan dos mapas de intensidades. El primero es un mapa actualizado (1471-1981) de aquel presentado por Ocola en el Proyecto SISAN en donde se presentan intensidades máximas. El segundo mapa superpone los mapas de isosistas y las intensidades por localidades. Las isosistas son a partir de 1912 y las intensidades por localidades a partir de 1945. En este mapa también se incorporan los valores extremos presentados en el primer mapa.

### 3.4 Discusión del mapa de distribución de intensidades máximas.

El mapa de distribución de intensidades máximas presenta líneas de contorno de isosistas para los sismos peruanos del presente siglo y valores máximos para los sismos históricos. Se recomienda en el futuro incorporar al mapa presentado, la distribución de intensidades de sismos históricos. Actualmente algunos investigadores están preparando catálogos de intensidades sísmicas históricas, que proporcionarán la información necesaria.

Existe adecuada información de intensidades sísmicas en las zonas de la Costa, Sierra y Selva Alta del Perú. Dicha información es escasa en la zona de la Selva Baja.

Además de la Alta Sísmicidad de la Costa del Perú, se aprecia actividad sísmica en la denominada Zona Sub Andina, localizada en la Selva Alta.

Existe semejanza entre el mapa de distribución de intensidades presentado y el mapa de Zonificación Sísmica del Perú de las Normas de Diseño Sismo-Resistente en vigencia. La zona 3 (sísmicidad baja) coincide con la zona de intensidades menores que IV. La zona 2 (sísmicidad media) se asemeja a la zona de intensidad V, aún cuando existen diferencias en los departamentos de Huancavelica, Ayacucho, Cusco y Puno. El mapa presentado indica en dichas zonas una mayor sísmicidad. La zona 1 (sísmicidad alta) está representada en el presente mapa por zonas de intensidad mayores que VI. De acuerdo a los valo

res de intensidad presentados, la zona 1 podría subdividirse.

En base al mapa de distribución de intensidades presentado, se recomienda modificar el mapa de Zonificación Sísmica del Perú de las Normas de Diseño Sismo-resistente vigentes.

Se recomienda continuar con la toma sistemática de datos de intensidades sísmicas en todo el Perú y la investigación de intensidades de sísmos históricos para ser incorporados al mapa de distribución de máximas intensidades sísmicas propuesto.

## C A P I T U L O   I V

### 4.        ACTIVIDAD SISMICA DEL PERU

#### 4.1      Tectónica de Placas.

Se observa desde hace mucho tiempo que las montañas, los volcanes y los terremotos no están distribuidos de una manera casual sobre la superficie del planeta, sino que se encuentran generalmente en zonas concretas y, además muy limitadas. La consideración de estos hechos, referentes a la inestabilidad de la corteza terrestre, ha promovido algunas hipótesis referentes a estos temas como: la contracción global, los efectos de las fuerzas debidas a la atracción lunar, la deriva continental, etc.

Durante los diez últimos años, la deriva continental ha alcanzado una gran consideración por el desarrollo que ha tenido el concepto de la expansión del suelo oceánico, propuesto inicialmente por Harry H. Hess, de la Universidad de Princeton. Posteriormente se conoció y se aplicó el hecho de que la polaridad del campo magnético terrestre se invertía periódicamente, lo que concluyó a proponer la idea que el modelo magnético propuesto era la evidencia tanto de la expansión del suelo de los océanos, como de las inversiones del campo magnético terrestre (Vine y Matthews, 1963).

Actualmente el concepto de la expansión del suelo oceánico se ha emparejado con la antigua idea de la deriva continental y se han unido para constituir un solo cuerpo conceptual, al que se ha denominado la "teoría de la tectónica de placas". La parte geométrica de esta teoría, nos hace ver la Litósfera o capa más externa de la tierra, como constituida por un número de placas rígidas. La parte cinemática de la teoría sostiene que las placas están en un continuo movimiento relativo, que puede conseguirse por: que las dos placas se deslicen una junto a la otra, o bien ambas convergan, en cuyo caso una de las dos se destruye.

Tras estas consideraciones, es posible aplicar a la luz de la teoría de la tectónica de las placas, los fenómenos relacionados a la inestabilidad de la corteza terrestre o de terremotos, Dewey (1972).

La mayor parte de los terremotos tienen lugar en estrechas zonas que se unen y forman una malla

continúa que limita regiones en las que la sismicidad es poco activa. Esta red sísmica está asociada con una variedad de rasgos característicos, tales como cordilleras oceánicas, cadenas orogénicas, cadenas volcánicas, etc.

Estas áreas sísmicas marcan precisamente los límites entre las placas, las cuales están delimitadas por efectos sísmicos y han podido diferenciarse cuatro tipos de zonas sísmicas, pudiendo distinguir una de otras, por sus características morfológicas y geológicas.

Un primer tipo está representado por zonas estrechas de gran emanación de flujo calorífico y gran actividad volcánica (emanaciones basálticas), que se sitúan a lo largo de las cordilleras centrooceánicas, donde los sismos tienen sus focos a una profundidad moderada (menos de 70 km.).

El segundo tipo de zona sísmica está caracterizada por terremotos de profundidad somera y ausencia de fenómenos volcánicos. Ej.: fallas de San Andrés (California).

Un tercer tipo de zona sísmica, está íntimamente ligado con las profundas fosas oceánicas, asociadas a su vez con los sistemas de arcos, islas de constitución volcánica, etc., tales como los que se encuentran en el Océano Pacífico. Estas regiones son de profundidades intermedias de 70 a 300 km. y profundidades de 300 a 700 km. de profundidad.

Un cuarto tipo de zona de terremotos está tipificado por la faja sísmica que se extiende desde Birmania hacia el Mar Mediterráneo y está constituida por una ancha y difusa zona continental, dentro de la cuál están asociados terremotos que tienen una profundidad somera, que a su vez está relacionada con cadenas de montañas altas que claramente muestran efectos de grandes esfuerzos de comprensión, Dewey (1972).

El concepto fundamental de que las placas son rígidas es esencial para la teoría de la tectónica de placas y puede ser justificado por el hecho de que se puede analizar un ajuste casi perfecto entre algunos márgenes continentales. El hecho de que estas placas rígidas estén sometidas a un movimiento relativo sobre la esfera terrestre, hace suponer que un desplazamiento entre cualquier par de placas, puede ser identificado por una rotación alrededor de un eje que pasará por el centro de la tierra.

El movimiento relativo entre dos placas sobre la superficie tiene lugar a lo largo de círculos de rotación trazados alrededor de un eje. La velocidad de separación de las placas aumenta con la distancia al polo de rotación, este hecho queda reflejado por el progresivo incremento que van tomando a lo largo del eje de la cordillera y la distancia entre las sucesivas anomalías magnéticas (John F. Dewey , 1972).

El mecanismo básico que causa el movimiento de las placas no se conoce, pero se dice que es debido a la corriente de convección o movimien

tos de manto plástico y caliente de la tierra, y también a los efectos gravitacionales y de rotación de la tierra. Los límites o bordes de las placas, raramente coinciden con las márgenes continentales, pudiendo ser de tres tipos:

- 1) Según cordilleras axiales, donde las placas divergen una de otra y en donde se genera un nuevo suelo oceánico.
- 2) Según las fallas de transformación, a lo largo de las cuáles las placas se deslizan una respecto de la otra.
- 3) Según zonas de subducción, en donde las placas convergen y una de ellas se sumerge bajo el borde delantero de la supra - yacente.

#### 4.2 Rasgos Tectónicos y Morfológicos de la Región.

El Perú forma parte de una de las regiones de más alta actividad sísmica: en el mundo, conocida como el cinturón circumpacífico. Los rasgos tectónicos más importantes de la región occidental de Sudamérica, la Cordillera de los Andes y la fosa oceánica Perú-Chile, están relacionados con la generación de sismos en esta zona como consecuencia de la subducción de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana. Esta es la teoría de las placas propuestas por Isacks et al (1968). La idea básica de la teoría es que la envoltura más superficial de la tierra, la litósfera, se halla dividida en varias capas rígidas que crecen a lo largo de estrechas cadenas meso-oceánicas, casi lineales.

(Figura 4-1). Dichas placas son transportadas en otra envoltura menos rígida, y son comprimidas o destruidas en las llamadas zonas de subducción, donde la corteza terrestre es comprimida en cadenas de montañas y existen fosas marinas (Berrocal et al, 1975). Figura 4-2).

La mayor actividad tectónica del mundo, terremotos volcánicos y orogénicos, se encuentra a lo largo de los bordes de las placas. El frotamiento mutuo de éstas placas, es la que produce los terremotos y se encuentran a lo largo de los bordes de estas placas. La costa Oeste de América del Sur, es uno de estos bordes (Figura 4-1). La placa Oceánica Nazca, generada a lo largo de la cordillera pacífica oriental, es absorbida en la fosa Peruano-Chilena, en donde se desliza hacia el interior subyaciendo bajo la placa sudamericana con una velocidad medio de unos 6 cms. por año, James (1973).

Como consecuencia de la acción de un sistema de subducción de esta placa oceánica bajo América del Sur, dió lugar al arrugamiento del margen continental estable que pasa así a constituir una cadena de montañas de materiales plegados, que son los que forman ahora los actuales alineamientos montañosos de los Andes; el nacimiento de la gran cordillera volcánica Andina, al oeste; y el crecimiento hacia el oeste de América del Sur.

La distribución de los terremotos nos evidencia los lugares de interacción de las placas

(teoría de Tectónica de Placas). La zona sísmica que según un plano inclinado se sitúa bajo - las fosas oceánicas (las zonas de Benioff, denominadas así en honor a Hugo Benioff, quién las definió) determinan precisamente la parte superior de las placas oceánicas descendentes. Las placas litosféricas que descienden se encuentran a menor temperatura y se comportan con una mayor rigidez que las de la astenósfera en que se sumergen; por otra parte está generalmente aceptada la suposición de que solamente en la litósfera es donde se puede hallar rocas suficientemente rígidas, como para soportar una fracturación frágil ocasionando desequilibrio de fuerzas y consecuentemente la generación de sismos. (James, 1973).

Bajo los Andes centrales sin embargo, los terremotos no tienen lugar solamente en la placa descendente, sino también se dan a lo largo de la superficie situada entre la corteza y la placa oceánica que se sumerge con una profundidad de 200-300 Km. (Figura 4-3).

El terremoto se produce cuando las tensiones se acumulan hasta el punto de producir la rotura - de rocas de la corteza terrestre. La fractura que se produce es resultado del carácter frágil de las rocas, en contraste con las deformaciones plásticas en que los esfuerzos se liberan - lentamente.

Las primeras ondas que se emiten desde la región en que se ha producido la rotura ( el epicentro), son ondas tanto de compresión como de descompresión, generadas por la rápida li-

beración de energía elástica. Dewey (1972).

Se han señalado además, ciertas discontinuidades de carácter regional que dividen el área en provincias tectónicas, separadas por zonas de transición sismotectónica. (Deza y Carbo-nell, 1978).

#### 4.2.1 Tectónica Superficial.

Los rasgos tectónicos superficiales más importantes en el área en estudio son: (Berrocal - et al, 1975).

- Fosa Oceánica Perú-Chile.
- Dorsal de Nazca.
- Porción hundida de la costa, al norte de la península de Paracas.
- Cadena de los Andes.
- Unidades de deformación y sus intensio - nes magnéticas.
- Sistemas regionales de fallas normales, inversas y de sobreescurremientos.

La dorsal de Nazca tiene una influencia decisiva en la constitución tectónica de la parte oc-cidental, donde se nota un marcado cambio en - la continuidad de los otros rasgos tectónicos. En la parte oceánica, la dorsal de Nazca divi-de la fosa oceánica en la fosa de Lima y la fo-sa de Arica.

La cadena Andina es el rasgo tectónico más evi-dente. Su orogénesis es un producto de la in-teracción de las placas litosféricas, cuyo de-sarrollo está todavía vigente.

La parte continental del área de estudio, está constituida por varias unidades tectónicas de diferente grado de deformabilidad, debido a su diferente litología y época de formación. La unidad de deformación Precambriana no presenta actividad sísmica, mientras que la unidad de deformación Paleozoica presenta actividad sísmica de profundidades superficiales e intermedias, tal como en la zona de Huaytapa llana, en Cusco y en Abancay.

El contacto de la unidad de deformación supraterciaria con las unidades más antiguas, está asociado con sistema de fallas normales e inversas. Otro rasgo importante de esta unidad lo constituyen las deposiciones volcánicas que son antiguas hacia el norte de la zona de transición y modernas y antiguas hacia el sur (Deza y Carbonell, 1978).

#### 4.3 Sismicidad de la Región.

El estudio de sismicidad consiste en la presentación y el análisis interpretativo de un conjunto ordenado de datos, que brindan una adecuada caracterización de la actividad sísmica de una determinada área, para poderla comparar con otras áreas y para poder estimar el riesgo sísmico existente en lugares específicos dentro de dicha área.

Como quiera que la base fundamental para un estudio de sismicidad son los datos de la actividad sísmica ocurrida, tal estudio dependerá entonces, de la cantidad y calidad de dichos datos y sobre todo, del período en que fueron acumulados.

La estimación del Riesgo Sísmico en un determinado lugar, es una especie de pronóstico de lo que podría suceder, en base a los datos sísmicos acumulados y en base a las características tectónicas regionales y locales que puedan explicar la actividad sísmica observada; por lo tanto, dicha estimación será menos imprecisa, si se cuenta con datos sísmicos de buena calidad, correspondiente a un período - amplio de tiempo. Si se conocen los aspectos tectónicos regionales y locales, en términos generales, se estima que la sismicidad de un determinado lugar debe conservarse sin mucha alteración por un período por lo menos igual al período que se acumularon los datos sísmicos con los que se caracterizó dicha sismicidad. (Berrocal, 1975).

El estudio de la actividad sísmica, involucra el estudio de la sismicidad histórica e instrumental, así como la información macrotectónica y geológica, para lograr una adecuada caracterización de la actividad sísmica en la zona en estudio.

El desarrollo de la ciencia sismológica, así como la mayor cantidad de instrumentos de medición instalados en Sudamérica, permiten agrupar los datos sismológicos obtenidos en diferentes períodos de la forma:

- 1) Antes de 1900      Consistente en datos históricos descriptivos de sismos destructivos.

2) De 1900 a 1962 : Consistente en datos instrumentales con determinaciones aproximadas de localización e hipocentros.

Las magnitudes determinadas, están en función de las ondas superficiales u ondas Rayleigh.

3) De 1962 a 1981 : Consistente en datos instrumentales con determinación precisa de localización e hipocentros.

Las magnitudes determinadas están en función de ondas corpóreas.

Toda esta información proporcionará la base para la elaboración de mapas actualizados de la sismicidad de la región. Es evidente que existirán dudas y tal vez algunos errores que sólo podrán ser subsanados mediante la recopilación de datos adicionales con una eficiencia requerida.

Para superar las observaciones simológicas, es necesario mejorar la red de observaciones, así como su instrumental, a fin de estar en condiciones de realizar estudios más completos de la sismicidad de la región y por lo tanto, un mejor estudio del riesgo sísmico.

#### 4.4 Parámetros que intervienen en el Análisis de la Sismicidad.

El conocimiento de los distintos parámetros

que caracterizan la ocurrencia de terremotos es indispensable para la descripción completa del fenómeno sísmico. De acuerdo con esta definición se ha venido considerando que la sismicidad quedaba suficientemente determinada - cuando se conocía la distribución de los terremotos en el espacio  $(x, y, h)$ , magnitud  $(m)$  y tiempo  $(t)$ ; su expresión gráfica parcial venía dada por alguna de las relaciones entre parámetros  $(x, y, h, t_0, m, N)$ .

Recientemente sin embargo, se consideran otras medidas del tamaño de los sismos, en lugar de la magnitud (momento, caída de esfuerzos medio, etc.) y se ha introducido también otros nuevos parámetros que permiten una más adecuada descripción del fenómeno de su origen, las cuales pueden agruparse en los siguientes tipos:

#### 4.4.1 Parámetros de localización.

- a) Para foco puntual:  $(x, y, h, t_0)$
- b) Para foco extenso:
  - rumbo
  - buzamiento
  - longitud (L)
  - anchura (A)

#### 4.4.2 Parámetros de movimiento.

- a) Geométricos :
  - ángulo de deslizamiento
  - deslizamiento medio
- b) Cinemáticos :
  - velocidad media de dislocación. (o descripción temporal)
  - velocidad de ruptura  $V_r$ .
  - tiempo de dislocación  $T_d$ .

#### 4.4.3 Parámetros de dimensión.

- a) magnitud (m) ó intensidad (M)
- b) momento (Mo)
- c) esfuerzo medio
- d) esfuerzo aparente
- e) caída de esfuerzos

Es evidente que los parámetros de los últimos grupos no son independientes; la selección de uno u otro conjunto para caracterizar la sismicidad suele hacerse en función del problema concreto que se estudia.

#### 4.5 Sismicidad histórica.

Esta información comprende la actividad sísmica ocurrida en el pasado, del cual no se poseen datos instrumentales. Los pocos datos e información que existen y se conocen, se encuentran esparcidas en crónicas, lo que dificulta la documentación que aún espera ser estudiada e integrada a la historia sísmica del país y América del Sur. Una descripción más o menos detallada de éstos sismos, se pueden encontrar en Silgado (1969, 1973, 1975 y 1978).

Es evidente que la simple narración de sismos ocurridos no representa fielmente la actividad sísmica que ocurrió en ese entonces, ya que sólo representan los sismos destructivos que han afectado ciudades o pueblos importantes, los cuáles por lo tanto, han podido ser descritos.

Algunos sismos fuertes ocurridos en zonas des pobladas que no causaron destrozos, así como

los sismos de mediana y pequeña magnitud, han pasado desapercibidos por la historia.

Además la información solamente descriptiva - de los sismos históricos no permite utilizar los datos existentes bajo todos los conceptos modernos de sismicidad.

#### 4.5.1 Análisis de los Sismos Históricos.

De acuerdo a la información de la sismicidad - histórica en un período aproximadamente de 400 años, se concluye que se ha producido en la zona en estudio intensidades altas, como mínimo intensidades VIII en la escala de Mercalli Modificada. Estos sismos históricos destructivos son descritos en el Anexo B.

El análisis local puede ser ejecutado usando - la intensidad de Mercalli Modificada como una medida de la intensidad; sin embargo hay que tener cuidado en la interpretación.

Considerando lo descrito en el Anexo B, los sismos más destructivos ocurridos en la Costa Peruana cuyas magnitudes posiblemente hayan sido  $mb \geq 6.7$  son:

09.07.1586	mb (probable)	6.7 ó más
20.10.1687	mb (probable)	6.7 ó más
28.10.1746	mb (probable)	6.8 ó más
15.08.1868	mb (probable)	6.8 ó más

La relación anterior nos indica que aproximadamente en cada siglo desde el siglo XVI, ha ocurrido uno de estos sismos grandes en la costa

de nuestro país, Berrocal et al (1975).

#### 4.6 Sismicidad Instrumental.

Las investigaciones sismológicas basadas en el análisis instrumental, han tenido un gran desarrollo, especialmente en las últimas décadas. Este desarrollo no sólo ha sido en el incremento de equipos de medición, sino fundamentalmente en la introducción de nuevas técnicas de registro, que han permitido ampliar considerablemente, tanto el rango de frecuencia que se registran como la sensibilidad de los equipos utilizados.

Los datos utilizados para la elaboración del catálogo instrumental han sido tomados del catálogo sísmico del United States Geological Survey (USGS), que contiene información hasta el año 1981, cuya copia en cinta magnética la posee la Universidad Nacional de Ingeniería. También se tuvo a disposición una copia del catálogo sísmico de la Pontificia Universidad Católica del Perú, que es similar al catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP). Dicho catálogo, comprende información hasta el año 1974.

Las determinaciones epicentrales utilizando datos sísmicos instrumentales fueron iniciados solamente a principios del presente siglo, pero la falta de estaciones sísmicas, no ha permitido una mayor precisión de las coordenadas de los epicentros y consecuentemente la exactitud de su ubicación.

Producto del avance científico de la sismometría, en las últimas décadas ha mejorado la determinación de epicentros y ha alcanzado un nivel elevado y confiable, de modo que en la actualidad es posible efectuar determinaciones epicentrales de buena calidad.

#### 4.6.1 Análisis de Datos de la Sismicidad Instrumental.

De la información instrumental disponible se observa que existe pequeñas discrepancias en algunos valores de la magnitud; esto implica que algunos de éstos sismos, no poseen, idénticas características de localización y, considerando que es preferible utilizar la mayor cantidad posible de determinaciones epicentrales, se ha comparado los catálogos del United States Geological Survey (USGS), catálogo del Instituto Geofísico del Perú (IGP), y el catálogo de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), donde las magnitudes publicadas de los sismos peruanos, han sido calculadas usando diferentes escalas de magnitud, esto complica la evaluación de las magnitudes máximas y el análisis de recurrencia de los sismos lo que se traduce en una diferencia de pronósticos tal como se describe en el Capítulo II.

El estudio de la relación entre la magnitud, intensidad, etc. y la frecuencia de ocurrencia de sismos es realizable a partir de los datos instrumentales que se disponen. Los principales antecedentes históricos de sismos destructores ocurridos en el país, permiten obtener algunos parámetros sísmicos característicos de la mis-

ma. Estos parámetros constituyen la base fundamental a partir de la cual se indica la probable actividad sísmica futura.

El proceso de instrumentación ha permitido la recopilación de datos necesarios para desarrollar fórmulas empíricas en función de las magnitudes o intensidades y la distancia epicentral o hipocentral obtenidas de los registros de acelerógrafos de las aceleraciones horizontales máximas, -llamadas FUNCION DE ATENUACION y son calculadas mediante regresión lineal de mínimos cuadrados del logaritmo de las máximas aceleraciones, estas funciones o leyes de atenuación tienen aplicación directa en la parte teórica y aplicada de la investigación. (Capítulo V).

Una comparación de las curvas de atenuación derivadas por: Espinoza (1980), Schnabel y Seed (1973), Donovan (1973), Esteva (1976), Boore et al (1980) se muestra en la Figura 4-4. Estas curvas no son equivalentes ya que algunos de los investigadores usan distanciashipocentrales y otros distancias -epicentrales. (Espinoza, 1980).



FIG. 4-1 TEORIA DE PLACAS  
(Dewe/, 1972)

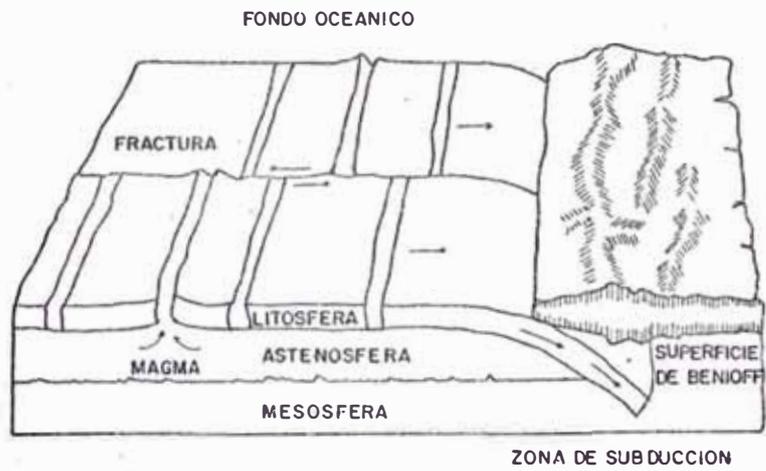


FIG. 4-2 ISOMETRICO DE DORZALES Y ZONAS DE FRACTURA Y DE SUBDUCCION  
( James , 1973 )

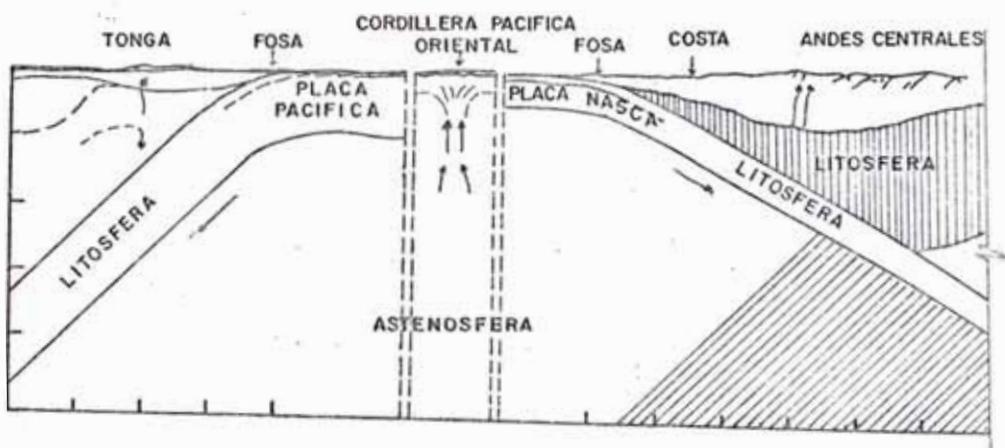


FIG. 4-3  
( James , 1973 )

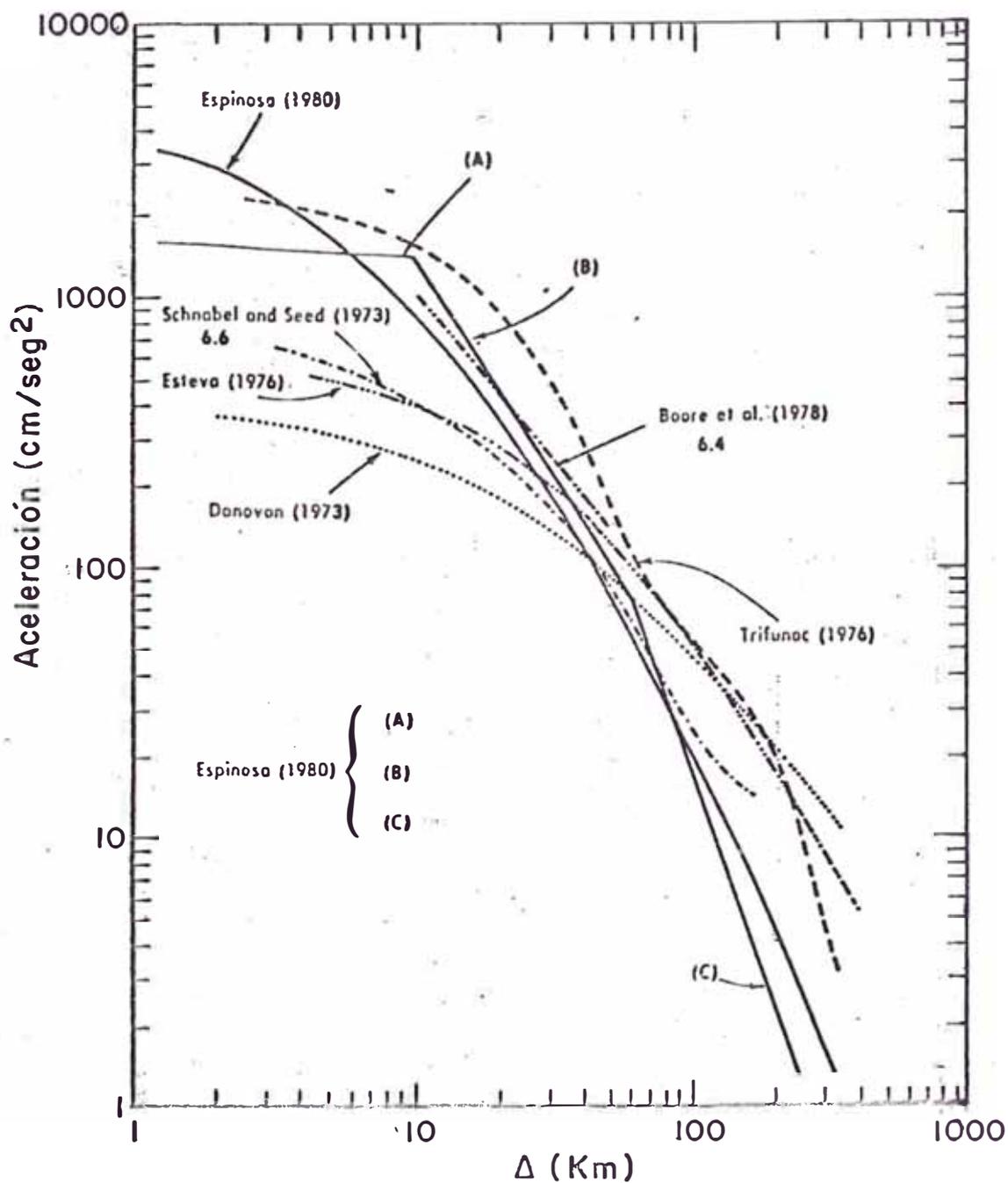


FIG. 4-4 CURVAS DE ATENUACION DE ACELERACIONES

(Espinoza , 1980)

## C A P I T U L O   V

### 5.   ESTUDIO DEL PELIGRO SISMICO

#### 5.1   Consideraciones.

Este Capítulo presenta la metodología utilizada en la evaluación del peligro sísmico en dos zonas de estudio: La Costa Central del Perú y la Costa Zona Norte (Piura).

Para determinar el peligro sísmico en el lugar de un proyecto ingenieril se han desarrollado métodos analíticos por Cornell (1968, 1971), Esteva (1969) y han sido aplicados en años recientes por Algermissen y Perkins (1972) y Donovan y Valera (1972).

R.Mc Guire (1976) ha desarrollado el programa de cómputo RISK para evaluar numéricamente el

peligro sísmico; la implementación de este programa de cómputo ha sido efectuada en la Universidad Nacional de Ingeniería para ser usado en el presente trabajo.

## 5.2 Fundamentos del Análisis del Peligro Sísmico.

El Peligro Sísmico se define por la probabilidad de que en un lugar determinado y en un período de tiempo, ocurra un movimiento sísmico de una intensidad igual o mayor que un valor fijado. En general se hace extensivo el término intensidad a cualquier otra característica de un sismo, tal como su magnitud, aceleración máxima, el valor espectral de la velocidad, el valor del desplazamiento del suelo, el valor medio de la intensidad en la escala de Mercalli Modificada u otro parámetro.

Para el análisis del Peligro Sísmico es necesario adoptar un mecanismo de ocurrencia de sismos en la zona en estudio. La ocurrencia de sismos de una cierta magnitud, intensidad, etc, constituye un tiempo y espacio por lo tanto puede representarse por un proceso estocástico continuo. Estos procesos son estacionarios porque la frecuencia media de ocurrencia de un evento por unidad de tiempo no depende del tiempo. Y son independientes porque el número de eventos que ocurre en cualquier intervalo  $t$ , no depende del número de eventos ocurridos en cualquier otro intervalo  $t_1$ , ubicado en forma arbitraria. Esto es, que para un cierto intervalo de magnitud, intensidad etc., tiene la misma probabilidad de ocurrir en cualquier período unitario de tiempo.

La ocurrencia de un sismo es de carácter aleatorio y por lo tanto la teoría de las probabilidades es aplicable en el análisis del Peligro Sísmico de su ocurrencia. Aplicando esta teoría se puede demostrar que si la ocurrencia de un evento A depende de la ocurrencia de otros eventos  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos; entonces, de acuerdo al teorema de la "probabilidad total", se tiene para la probabilidad de ocurrencia de A.P.(A) está dada por:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A/E_i) P(E_i) \quad (5-1)$$

donde:

$P(A/E_i)$  es la probabilidad condicional que A ocurra dado que  $E_i$  ocurra.

La intensidad generalizada (I) de un sismo en un lugar fijado, puede considerarse dependiente del tamaño del sismo (la magnitud o intensidad epicentral) y la distancia del lugar de interés. Si el tamaño del sismo (S) y su localización (R) - son considerados como variables aleatorias continuas independientes, las cuales influyen en A y están definidas por sus funciones de densidad de probabilidad,  $f_S(s)$  y  $f_R(r)$  respectivamente; el Peligro Sísmico definido por la probabilidad que la intensidad I sea igual o mayor que una intensidad dada:  $P(I \geq i)$  y está dada por la expresión:

$$P(I \geq i) = \iint P\{I/(r,s)\} f_S(s) f_R(r) ds dr \quad (5-2)$$

Esta expresión resume la teoría desarrollado por Cornell (1968, 1971), Merz y Cornell (1973) para

analizar el Peligro Sísmico. La evaluación numérica de la integral (5-2) es efectuada por el programa de cómputo RISK desarrollado por R. Mc Guire (1976) en el cálculo del Peligro Sísmico.

#### 5.2.1 Probabilidad condicional y Valor medio de la intensidad.

La expresión  $P \{ I/(r,s) \}$  que es un factor en la evaluación del Peligro Sísmico, representa una función de probabilidad condicional de que la intensidad "I" exceda un cierto valor "i" en un lugar fijado, dados s y r. La evaluación de esta probabilidad se efectúa adoptando una distribución normal, esto se hace en base a que este tipo de distribución ha sido usada en las condiciones de una variedad de intensidades de movimientos sísmicos por varios investigadores, tales como Esteva 1970, Donovan (1974) y Mc. Guire (1974).

El valor medio,  $m_I$ , de la intensidad usado en la evaluación de la probabilidad condicional es asumido como una función decreciente con la distancia, esto es:

$$m_I (S,R) = C_1 + C_2 S + C_3 \ln (R + r_0) \quad (5-3)$$

donde:

$C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $r_0$  son constantes, S representa el tamaño del sismo y R es la distancia epicentral o hipocentral, la fórmula presenta una típica "FUNCION DE ATENUACION" y a menudo se presenta en su conversión de forma exponencial decreciente; algunos investigadores tales como Gupta y Nuttli (1975) y Howell y Schultz (1975) han exami

minado formas modificadas de (5-3) tal como la siguiente, entre otros:

$$m_I (S,R) = C_1 + C_2 + C_3 \ln (R + r_o) + C_4 (R + r_o) \quad (5-4)$$

La desviación estandar de la intensidad,  $\sigma_I$ , es generalmente considerada constante, es decir sin depender de S y R. De acuerdo a lo expuesto, la expresión  $P [I/(S,r)]$  puede ser escrita así:

$$P [I/(S,r)] = \phi^* \left\{ \frac{i - m_I}{\sigma_I} \right\}$$

Sustituyendo la expresión de  $m_I$  dada en (5-3) se tiene la función de distribución de probabilidad de las intensidades como sigue:

$$P [I/(s,r)] = \phi^* \left\{ \frac{i - [C_1 + C_2 S + C_3 \ln (R + r_o)]}{\sigma_I} \right\} \quad (5-5)$$

donde:  $\phi^* = 1 - \phi$ , y representa la función complementaria de la distribución normal estandarizada,  $\phi$ .

### 5.2.2 Valores picos de movimientos sísmicos y medidas espectrales de la intensidad.

Cuando los valores picos del movimiento (aceleración, velocidad o desplazamiento), o valores espectrales de la velocidad son usados como medida de la intensidad del movimiento sísmico; estas variables son asumidas con distribución logarítmica normal. O sea, los logaritmos de estas variables, tienen distribución normal.

El valor medio ( $m_{Ag}$ ) de valores pico de aceleraciones como función de la magnitud  $m$  (según Rich-

ter) y la distancia hipocentral R, es tomada generalmente como:

$$m_{Ag}(M,R) = C_1' e^{C_2 M} (R+r_0)^{C_3} \quad (5-6)$$

En este caso la intensidad I, discutida anteriormente es: ( $\ln Ag = I$ ) S es equivalente a M, y la ecuación (5-3) es obtenida por una transformación logarítmica de la ecuación (5-6).

$$m(I) = \ln Ag = \ln C_1' + C_2 M + C_3 \ln(R+r_0) \quad (5-7)$$

$$C_1 = \ln C_1'$$

Además  $\sigma_I$ , es la desviación estandar del logaritmo de la aceleración pico. Si (como es usual),  $C_1, C_2$  y  $C_3$  son calculados por regresión de mínimos cuadrados del logaritmo de la aceleración pico o medida de la velocidad espectral,  $C_1'$  se reporta a menudo como simplemente el antilogaritmo de  $C_1$ , en cuyo caso  $C_1$  se calcula como el logaritmo de  $C_1'$ . Más rigurosamente, de la relación entre el valor medio y la varianza de una variable normalmente distribuída y el valor medio de la variable correspondiente normalmente distribuída,  $C_1'$  puede estimarse como:

$$C_1' = \exp \left( C_1 + \frac{1}{2} \sigma_I^2 \right) \quad (5-8)$$

Si la distribución de la magnitud es,  $f_M(m)$  y si el número de sismos  $n_M$  que tienen una magnitud mayor que M y que ocurren en un área (Fuente Simogénica), se asume que sigue la relación de Richter (1958).

$$\log n_M = a - bM \quad (5-9)$$

donde:

a y b, son constantes características de la fuente. La constante "b" indica las distribuciones relativas de pequeños y grandes sismos. Cuando b es grande, indica pocos sismos y cuando b es pequeña indica muchos sismos. Los valores de b son relativamente constantes para diferentes áreas, de rango (0.67 a 1.29) para USA, Evernden (1970) y un valor de 0.88 es típico para el Sur de California.

Asumiendo que los eventos ocurren independiente de fuente en fuente, la distribución acumulativa de M para cada evento será:

$$F_M(m) = K \left\{ 1 - \exp[-\beta(m-m_0)] \right\}, m_0 \leq m \leq m_1 \quad (5-10)$$

donde:

$m_0$ , es el límite inferior de magnitudes consideradas.

$m_1$ , es la magnitud máxima de la fuente

$$\beta = b \ln 10$$

$$K = \left\{ 1 - \exp[-\beta(m_1 - m_0)] \right\}^{-1}$$

De la ecuación (5-10) se deduce que la función de densidad de la magnitud (M) es dada por:

$$f_M(m) = \frac{d F_M(m)}{dm} = \beta K \exp[-\beta(m-m_0)], m_0 \leq m \leq m_1 \quad (5-11)$$

Considerando la función densidad como una función de la distancia en la ecuación (5-2), entonces podemos sustituir s y m en las ecuaciones (5-4) y (5-2) y obtenemos la probabilidad que la intensi-

dad I sea excedida en el lugar.

$$\begin{aligned}
 P(I \geq i) &= \int_r \int_{m_0}^{m_1} \left\{ \phi^* \left\{ \frac{i - [C_1 + C_2 m + C_3 \ln(r+r_0)]}{\sigma_I} \right\} \right. \\
 &\quad \left. \cdot \beta K \exp(-\beta(m-m_0)) f_R(r) dm dr \right. \\
 P(I \geq i) &= \int_r \int_{m_0}^{m_1} \left\{ \phi^* \left\{ \frac{i-m_I}{\sigma_I} \right\} f_M(m) f_R(r) dm dr \right. \\
 &\hspace{15em} (5-12)
 \end{aligned}$$

A través de operaciones algebraicas (Cornell, (1971), Mertz y Cornell (1973) la integración - puede ser realizada analíticamente, resultando en:

$$\begin{aligned}
 P(I \geq i) &= \int_r \left\{ (1-K) \phi^* (Z/\sigma_I) + k \phi^* (Z'/\sigma_I) + \right. \\
 &\quad \left. \frac{\beta C_3}{C_2} \exp \left( -\frac{i\beta}{C_2} + \frac{\beta C_1}{C_2} + \beta m_0 + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{\beta \sigma_I^2}{2C_2} \right) \cdot \right. \\
 &\quad \left. \cdot \left[ \phi^* \left( \frac{Z - \beta \sigma_I^2 / C_2}{\sigma_I} \right) - \phi^* \left( \frac{Z' - \beta \sigma_I^2 / C_2}{\sigma_I} \right) \right] \right\} f_R(r) dr \\
 &\hspace{15em} (5-13)
 \end{aligned}$$

donde: las constantes Z y Z', han sido definidas. Siendo la función densidad en distancia f<sub>R</sub>(r) función de la relación espacial entre la fuente y el lugar de estudio. Entonces el peligro sísmico es evaluado por la integración numérica de la ecuación (5-13).

Una vez que el peligro asociado a un nivel de intensidad ( $i$ ) en el lugar ha sido calculado por la ocurrencia de un sismo de magnitud arbitraria y localizado en una fuente, el número anual de eventos esperados desde la fuente que causa la intensidad  $I > i$  es obtenido multiplicando un evento simple por el número esperado de eventos durante un año.

Los riesgos están calculados asumiendo que los sismos siguen un proceso de Poisson temporalmente homogéneo para la ocurrencia de sismos con una velocidad,  $u$ , de ocurrencia para sismos con magnitud mayores que el límite inferior, esto es:

$$\text{Riesgo} = 1 - \exp(-\text{número total esperado})$$

### 5.3 Evaluación de las Zonas Sismogénicas.

En el Capítulo II se ha podido identificar hasta cuatro referencias que presentan distintas zonas sismogénicas para la zona Nor-Oeste del Perú (Piura) y dos referentes a la Costa Central del Perú (Lima). Sin embargo, los resultados más recientes y completos han sido presentados por Huaco (1981) en el Estudio del Proyecto de Irrigación de Olmos, y el Estudio de Peligro Sísmico para la Zona del Transvase Mantaro, Huaco (1982), para las Zonas Norte y Centro respectivamente; y los trabajos de Casaverde y Vargas referidas al estudio de Zonificación Sísmica del Perú (1980) y Mapa Probabilístico de Intensidades (1982).

La Figura 5-1, presenta las zonas sismogénicas según Casaverde y Vargas aplicables para la zona de Piura. Se ha mantenido la misma nomen -

clatura, utilizando sólo aquellas zonas que tienen influencia en el área limitada por latitud  $0.05^{\circ}\text{S}$  y  $14.90^{\circ}\text{S}$  y longitud  $83.05^{\circ}\text{W}$  y  $75.80^{\circ}\text{W}$ . La Figura 5-2 presenta las zonas sismogénicas - aplicables a la zona de Lima, utilizando sólo - las zonas que tienen influencia en el área limitada por latitud  $6.10^{\circ}\text{S}$  y  $17.50^{\circ}\text{S}$ , y longitud -  $80.50^{\circ}\text{W}$  y  $73.0^{\circ}\text{W}$ .

La determinación de las fuentes sismogénicas se ha basado en el mapa de distribución de epicentros, así como las características tectónicas - del área de influencia. Se han presentado las fuentes como áreas, ya que no existen suficientes datos como para modelar fallas como fuentes lineales.

La mayor parte de los sismos ocurridos en el área considerada es producto de la interacción de las Placas de Nazca y Sudamericana. La Placa Nazca penetra debajo de la Sudamericana a ángulos variables.

La Placa Nazca se profundiza a medida que avanza hacia el continente, por lo que pueden distinguirse fuentes del litoral (F1, F2, y F3) y fuentes continentales (F5, F7, F10, F12, F15, - F18 y F21). Debido a la existencia de la Deflexión de Abancay, las fuentes del litoral se han dividido en F2 y F3, con características de recurrencia diferentes. Las fuentes del litoral tienen profundidades focales superficiales, menores de 70 Kms. Las fuentes continentales de la zona de subducción se caracterizan por tener profundidades focales medianas, mayores de 70 Kms. Las particiones transversales de las fuentes del

litoral y continentales corresponden al cambio de buzamiento de la superficie de Benioff con la latitud. Dichas particiones coinciden con accidentes geológicos de importancia (Deflexiones de Huancabamba, Cajamarca y Abancay), La Deflexión de Abancay también ha dividido F7 de F10. La fuente F21 corresponde a profundidades focales un poco mayores.

Las fuentes F13, F16 y F17 corresponden a sismos superficiales (5-60) Km. asociados a la actividad sísmica regional (andina). Las fuentes F14 y F19 corresponden a sismos muy superficiales, que podrían estar asociados a fallas aún no definidas.

Las fuentes F8, F11 y F20 están asociadas a la sismicidad regional andina con profundidades locales superficiales, sin estar asociadas a fallas activas. Por último, la fuente F9 está asociada a la falla de Huaytapallana. Las tablas 5-1, 5-2 presentan las coordenadas de las fuentes sismogénicas utilizadas.

La Figura 5-3 presenta las fuentes sismogénicas utilizadas por Huaco (1981) para la determinación del peligro sísmico del Proyecto Olmos. La fuente 1 abarca la actividad sísmica con epicentros próximos a la fosa oceánica Perú-Chile con profundidades focales superficiales.

La fuente 2 ocurre entre la fosa oceánica y la costa, esta zona produce sismos que podrían estar asociados a la falla Illescas. La fuente 3 abarca el extremo Nor-oriental de la zona, esta zona es la que mayor actividad sísmica ha presentado históricamente e instrumentalmente.

La fuente 4 es continental, a una profundidad menor de 30 Kms. la Fuente 5 es la más extensa e incluye toda la actividad sísmica que ocurre en el continente a una profundidad mayor de 70 Km. La fuente 6 es una fuente muy local. Debido a que solamente se utilizan estas fuentes sismogénicas de manera referencial, no se presentan las coordenadas de las fuentes.

Para la zona de Lima de manera referencial y a modo de comparación, se han utilizado además en el análisis las fuentes sismogénicas utilizadas por Huaco (1982), Figura 5-4 para la determinación del Peligro Sísmico para la zona del Transvase Mantaro. En dicho estudio la fuente 1 abarca la actividad sísmica con epicentros - próximos a la Fosa Oceánica Perú-Chile, con profundidades focales superficiales. La fuente 2 ocurre entre la fosa oceánica y los contra fuertes andinos, con profundidades intermedias. La fuente 3 tiene amplia distribución con profundidades focales entre 70 y 150 Kms. La fuente 4 está compuesta por todos los sismos de profundidades focales entre los 150 y 300 Kms. Los sismos de la fuente 5 ocurren dentro de la placa, en los Andes, con profundidades focales superficiales, La fuente 6 es similar a la fuente 5 con profundidades focales intermedias.

#### 5.4 Análisis Estadístico de Recurrencia.

El catálogo instrumental de sismos comienza en 1913 para la zona en referencia. La información existente hasta el año 1963 es incompleta, ya que no cuenta con valores de magnitud de ondas de cuerpo mb y profundidad focal. Se deci

dió utilizar la información a partir de 1963 para la realización del análisis estadístico de recurrencia.

La recurrencia de terremoto se determina de acuerdo a la expresión de Gutenberg y Richter (1954).

$$\log N = a - bM$$

donde:

N = número de sismos de magnitud M o mayor por unidad de tiempo

a, b = parámetros que dependen de la región.

La expresión anterior también se puede escribir como:

$$N = \gamma_0 e^{-\beta M}$$

donde:

$\gamma_0 = 10^a$ : es el número de sismos por unidad de tiempo con  $M > 0$

$$\beta = b \ln 10$$

En el caso de tener un nivel inferior de magnitud  $M_0$ . en lugar de magnitud igual a cero, las expresiones de recurrencia se convierten en:

$$\log N_{M_0} = a_{M_0} - b(M - M_0) \quad \text{ó}$$

$$N_{M_0} = \gamma_{M_0} e^{-\beta(M - M_0)} \quad \text{para } M \geq M_0$$

Los parámetros estadísticos de recurrencia para cada una de las fuentes sismogénicas de las Zonas Norte y Centro, Figuras 5-5 a 5-8 (Casaver-

de y Vargas, 1980, 1982), se han calculado utilizando magnitudes de ondas de cuerpo, para luego convertirlas a valores de magnitudes de ondas de superficie mediante la expresión de Richter (1958).

$$m_b = 2.50 + 0.63 M_s$$

El valor de  $a_{mb}$  es la tasa de actividad sísmica para el límite inferior de magnitud determinado a partir del catálogo y  $b_{M_s} = 0.63 b_{mb}$  determinado a partir de las curvas de recurrencia de las Figuras 5-5, 5-6 para la zona Norte y Figuras 5-7 y 5-8 para la zona Centro.

El análisis estadístico de los parámetros de recurrencia se realizó considerando datos de 1963 -1975 (Figuras 5-5, 5-6) y de 1963-1981 (Figuras 5-7 y 5-8). Las tablas 5-3 y 5-4 presentan los parámetros de recurrencia correspondientes a la fuentes sismogénicas de las Figuras 5-1 y 5-2 de las Zonas Norte y Centro, y se comparan con las tablas 5-5 y 5-6 que muestran los parámetros de recurrencia actualizados a 1981 correspondiente a las mismas fuentes de la Zona Norte y Centro, respectivamente.

La tabla 5-7 presenta los parámetros estadísticos de recurrencia para cada una de las fuentes sismogénicas de la Figura 5-3, para la Zona de Olmos (zona Norte), los mismos que fueron determinados por Huaco (1981), y la tabla 5-3 muestra los parámetros de recurrencia para cada una de las fuentes sismogénicas de la Figura 5-4 para la zona del Transvase Mantaro (Zona Centro) determinados por Huaco (1982). Dichos valores fueron calculados utilizando los valo

res de magnitud de ondas de cuerpo para convertirlos luego a valores de magnitud de ondas de superficie, mediante la expresión:

$$m_b = 3.3 + 0.42 M_s$$

Los valores de las tablas 5-7 y 5-8, fueron utilizados en el análisis de riesgo que utiliza las fuentes sismogénicas presentados por Huaco (1981, 1982) respectivamente.

#### 5.5 Leyes de Atenuación.

Se han utilizado asociadas a las fuentes sismogénicas de las Figuras 5-1 y 5-2, las leyes de atenuación de aceleraciones, velocidades y desplazamientos propuestas por Vargas (1979) y Casaverde y Vargas (1980). Estas leyes están basadas en los registros de acelerógrafos de los componentes horizontales de diez sismos peruanos (Brady y Pérez, 1971, Alva y Chang, 1978) registrados en Lima y alrededores. Es notoria la menor atenuación de sismos en otras partes del mundo (Cluod y Pérez, 1971, Saragoni et al (1982). Los sismos fueron registrados en acelerógrafos instalados en el local del Instituto Geológico en la Plaza Habich, el Instituto Geofísico del Perú en la Avenida Arequipa, en Zárate, en la casa del Dr. Huaco en las Gardenias y en la Molina. Las leyes son:

Atenuación de Aceleraciones:

$$a = 68.7e^{0.8 M_s - 1.0} \quad (R+ 25)$$

Atenuación de Velocidades:

$$v = 13 e^{1.0 M_s} (R+25)^{-1.5}$$

Atenuación de Desplazamientos:

$$d = 0.41 e^{1.2 M_s} (R+25)^{-1.3}$$

donde:

a, es la aceleración en cm/seg<sup>2</sup>.

v, es la velocidad en cm/seg.

d, es el desplazamiento en cm.

M<sub>s</sub>, es la magnitud de las ondas superficiales.

R, es la distancia hipocentral en Km.

Es evidente que existe escasez de datos de registros de aceleraciones en el Perú. Todos los registros existentes son para la ciudad de Lima y alrededores. Sin embargo, debe notarse que existe bastante dispersión en los datos de atenuación de energía sísmica con distancia hipocentral. La Figura 5-9 presenta la ley de atenuación de aceleraciones utilizada en conjunción con las fuentes sismogénicas de las Figuras 5-1 y 5-2.

Como comparación, también se ha utilizado en este estudio la ley de atenuación de aceleraciones propuesta por Huaco (1982):

$$a = 4395 e^{0.41 M_s} (R+50)^{-1.2}$$

en conexión con las fuentes sismogénicas propuestas por el mismo autor para el proyecto de Irrigación Olmos y para el Proyecto Transvase Manta-

ro. Lamentablemente en dichos estudios no se presentan leyes de atenuación para velocidades y desplazamientos, por lo que solamente se determinaron aceleraciones con esta metodología.

## 5.6 Evaluación del Peligro Sísmico.

Se ha determinado el Peligro Sísmico para las Zonas Norte en un punto con coordenadas  $5.0^{\circ}$  S y  $80^{\circ}$  W y la de la Zona del Centro en un punto con coordenadas  $11.90^{\circ}$  S y  $76.57^{\circ}$  W, usando el programa de cómputo RISK desarrollado para este tipo de análisis por R.K. Mc.Guire (1976). Se han realizado los cálculos con RISK utilizando cuatro diferentes conjuntos de datos; los datos del Proyecto Olmos de Huaco (1981), los datos del Proyecto Transvase Mantaro de Huaco (1982), los datos de Casaverde y Vargas (1980), y los datos de recurrencia sísmica de Casaverde y Vargas (1982) actualizados hasta el año 1981.

Con los datos del Proyecto Olmos y del Proyecto Transvase Mantaro solamente se ha determinado la probabilidad de ocurrencia de un sismo cuya aceleración máxima sea igual o mayor que ciertos valores esperados. Con los dos conjuntos de datos restantes se ha podido determinar además velocidades y desplazamientos. Los riesgos se calculan para lapsos especificados de: diez, veinte, treinta, cincuenta, cien, quinientos y mil años.

El Peligro Sísmico anual se presenta como la inversa del período de diseño en la Figura 5-10, que presenta los resultados de aceleraciones utilizando las metodologías anteriormente presentadas para la Zona Norte. La Figura 5-11 pre -

senta los resultados de las velocidades y la Figura 5-12 presenta los resultados de los desplazamientos para la Zona Norte del Perú.

Una comparación de resultados del Peligro Sísmico Anual para la zona del Centro se muestra en la Figura 5-13, donde se presentan los resultados de aceleraciones utilizando la metodología presentada anteriormente. La Figura 5-14 presenta los resultados de las velocidades; mientras que la Figura 5-15 presenta resultados de los desplazamientos para la Zona del Centro.

Debe indicarse sin embargo que en la comparación de las metodologías existentes para evaluar probabilísticamente las aceleraciones máximas esperadas en roca, se aprecia que los valores propuestos con datos actualizados son siempre menores pero bastante cercanos a los determinados utilizando los valores de Casaverde y Vargas (1980) tanto para la Zona Norte y Centro, Los valores propuestos por Huaco (1981) para la Zona Norte son muy cercanos a estos. Sin embargo, los valores propuestos por Huaco para la Zona Centro (1981) son mayores, existiendo mayores diferencias para tiempos de exposición menores. La mayor parte de estas diferencias se debe a la diferencia de curvas de atenuación de aceleraciones, aún cuando utilizando la misma atenuación, los valores obtenidos por el Dr. Huaco siguen siendo mayores debido a la diferencia de zonas sísmogénicas en la Zona Centro.

Los resultados de la integración numérica del

programa de cómputo RISK utilizando los parámetros por ambos autores se muestran en el anexo C, donde se observa que para la Zona del Centro con parámetros del Dr. Huaco, indican errores en la integración numérica, por lo que sería recomendable una mayor investigación en la utilización de dichos parámetros.

Finalmente, las tablas 5-9 y 5-10 presentan la comparación de las aceleraciones esperadas como fracción de la gravedad, utilizando las distintas metodologías. La comparación se realiza para tiempos de exposición de 30, 50 y 100 años, en ambos casos se aprecia que los valores propuestos con la información sísmica actualizada (1963-1981) son inferiores a aquellos que utilizan las metodologías existentes.

TABLA - 5-1

COORDENADAS DE LAS FUENTES SISMOGENICAS ZONA NORTE  
(Casaverde y Vargas, 1980)

Fuente	1		2		3		4	
	Lat <sup>o</sup> S	Long <sup>o</sup> W						
F 1	4.35	83.05	3.50	81.45	8.80	80.90	8.00	79.25
F 2	8.60	80.50	8.00	79.20	14.90	77.10	14.08	76.00
F12	3.90	81.25	2.80	79.20	8.00	79.25	6.80	77.20
F13	3.90	81.25	2.80	79.20	8.00	79.25	6.80	77.20
F14	3.90	81.25	3.55	80.60	4.55	80.95	4.20	80.25
F15	1.10	82.70	0.05	80.60	3.90	81.25	2.80	79.20
F16	1.10	82.70	0.05	80.60	3.90	81.25	2.80	79.20
F17	0.05	80.60	0.55	76.00	6.80	77.20	5.90	75.80
F18	0.05	80.60	0.55	76.00	6.80	77.20	5.90	75.80
F19	5.25	77.50	5.25	76.75	5.85	77.50	5.85	76.75

TABLA - 5 - 2

COORDENADAS DE LAS FUENTES SIMOGENICAS ZONA CENTRO  
(Casaverde y Vargas, 1980)

Fuente	1		2		3		4	
	Lat°S	Long°W	Lat°S	Long°W	Lat°S	Long°W	Lat°S	Long°W
F 2	8.60	80.50	8.00	79.25	14.90	77.10	14.08	76.00
F 3	14.90	77.10	14.08	76.00	17.50	73.70	16.40	72.70
F 5	16.75	73.00	14.10	70.60	18.45	70.25	16.35	67.20
F 7	14.30	76.30	12.45	73.80	16.75	73.00	14.60	71.00
F 8	14.08	76.00	12.45	73.80	16.40	72.70	14.60	71.00
F 9	11.40	75.30	11.40	74.80	12.00	75.30	12.00	74.80
F10	8.20	79.65	6.80	77.20	14.30	76.30	12.45	73.80
F11	8.00	79.25	6.80	77.20	14.08	76.00	12.45	73.80
F20	6.80	77.20	5.90	75.80	12.45	73.80	11.90	73.00
F21	6.80	77.20	5.10	74.50	12.45	73.80	11.90	73.00

TABLA - 5 - 3

PARAMETROS DE RECURRENCIA PARA LA ZONA NORTE  
(Casaverde y Vargas, 1980)

Fuente	Mag. Inf.	Mag. Sup.	1963 - 1974		Profundidad Km.
			$\beta$	Tasa	
F 1	5.0	7.38	1.0730	0.5000	10, 20, 30, 40, 50
F 2	5.0	7.60	1.4070	1.2850	25
F12	5.0	6.50	2.1030	0.0130	70
F13	5.0	7.00	2.3490	0.0624	25, 35
F14	5.0	7.10	1.4220	0.3900	5
F15	5.0	6.90	1.7550	0.0220	70
F16	5.0	7.80	1.8000	0.0710	25
F17	5.0	7.30	1.1460	0.3530	25
F18	5.0	7.90	0.9860	0.9500	70, 90, 110
F19	5.0	7.50	1.3970	0.2400	5

TABLA - 5 - 4

PARAMETROS DE RECURRENCIA PARA LA ZONA CENTRO  
(Casaverde y Vargas, 1980)

Fuente	Mag. Inf.	Mag. Sup.	1963 - 1974		Profundidad Km.
			B	Tasa	
F 2	5.00	7.60	1.407	1.285	10, 20, 30, 40, 50
F 3	5.00	8.60	1.886	0.250	25
F 7	5.00	7.00	1.182	0.704	70
F 8	5.00	7.40	1.262	0.070	25
F 9	5.00	5.60	1.364	0.150	5
F10	5.00	7.00	1.277	0.320	70, 90, 110
F11	5.00	7.25	1.712	0.130	15, 25, 35, 45
F20	5.00	7.30	1.175	0.170	25
F21	5.00	6.75	1.233	0.565	70

TABLA - 5 - 5

PARAMETROS DE RECURRENCIA PARA LA ZONA NORTE  
(Casaverde y Vargas, 1982)

Fuente	Mag. Inf.	Mag. Sup.	$\beta$	Tasa	Profundidad Km.
F 1	5.0	7.38	1.0328	0.5030	10, 20, 30, 40, 50
F 2	5.0	7.60	1.4318	0.9690	25
F12	5.00	6.50	1.7553	0.0270	70
F13	5.0	7.00	1.1054	0.1000	25, 35
F14	5.0	7.10	1.4318	0.2960	25
F15	5.0	6.90	1.8278	0.0161	70
F16	5.0	7.80	1.7408	0.0760	25
F17	5.0	7.30	1.0764	0.3744	25
F18	5.0	7.90	0.9719	0.8870	25
F19	5.0	7.50	1.3636	0.2110	5

TABLA - 5 - 6

PARAMETROS DE RECURRENCIA PARA LA ZONA CENTRO  
(Casaverde y Vargas, 1982)

Fuente	Mag. Inf.	Mag. Sup.	$\beta$	Tasa	Profundidad Km.
F 2	5.00	7.60	1.432	0.969	10, 20, 30, 40, 50
F 3	5.00	8.60	1.800	0.306	25
F 5	5.00	7.50	1.211	0.545	25
F 7	5.00	7.00	1.277	0.547	70
F 8	5.00	7.40	1.400	0.064	25
F 9	5.00	5.60	1.364	0.150	5
F10	5.00	7.00	1.103	0.421	70, 90, 110
F11	5.00	7.25	1.575	0.150	15, 25, 35, 45
F20	5.00	7.30	1.000	0.256	25
F21	5.00	6.75	1.204	0.615	70

TABLA - 5 - 7

PARAMETROS DE RECURRENCIA PARA LA ZONA NORTE  
(Huaco, 1,981)

Fuente	Mag. Inf.	Mag. Sup.	$\beta$	Tasa	Profundidad Km
F 1	4.75	8.25	1.12	0.680	30
F 2	4.50	7.75	1.410	0.830	70
F 3	4.5-	8.00	0.740	0.680	30
F 4	4.50	7.75	1.130	0.470	90
F 5	4.50	8.25	1.270	0.700	30
F 6	4.50	7.25	0.450	0.090	30

TABLA - 5 - 8

PARAMETROS DE RECURRENCIA PARA LA ZONA CENTRO  
(Huaco, 1982 )

Fuente	Mag. Inf.	Mag. Sup.	$\beta$	Tasa	Profundidad Km.
F 1	4.00	8.20	1.170	3.300	30
F 2	4.00	7.75	1.450	3.620	70
F 3	4.00	7.75	1.610	3.790	120
F 4	4.25	6.50	1.470	0.470	250
F 5	4.00	7.25	1.520	1.520	10
F 6	4.00	6.25	0.990	0.540	70

TABLA - 5 - 9

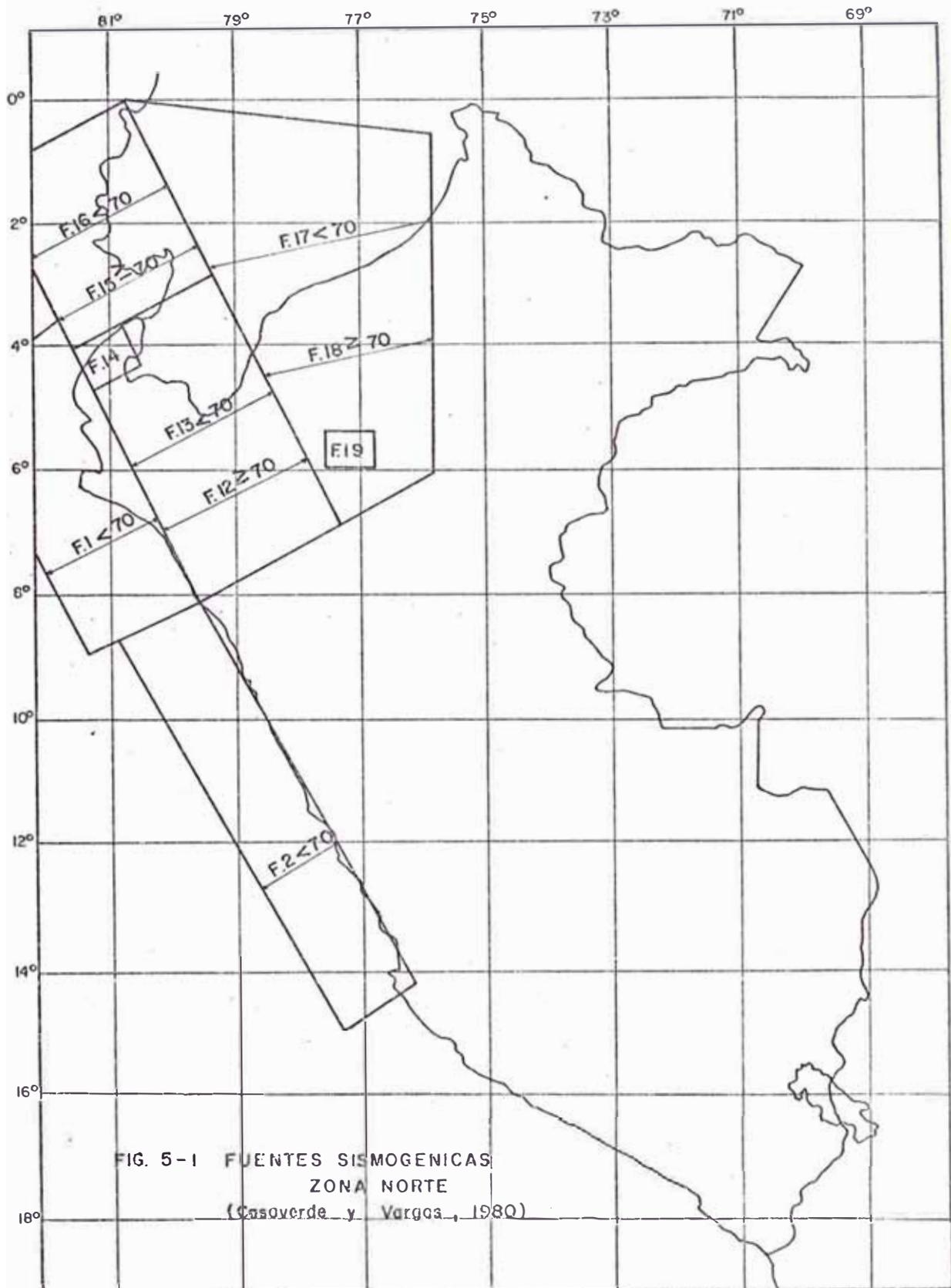
ACELERACIONES ESPERADAS % g PARA LA ZONA NORTE

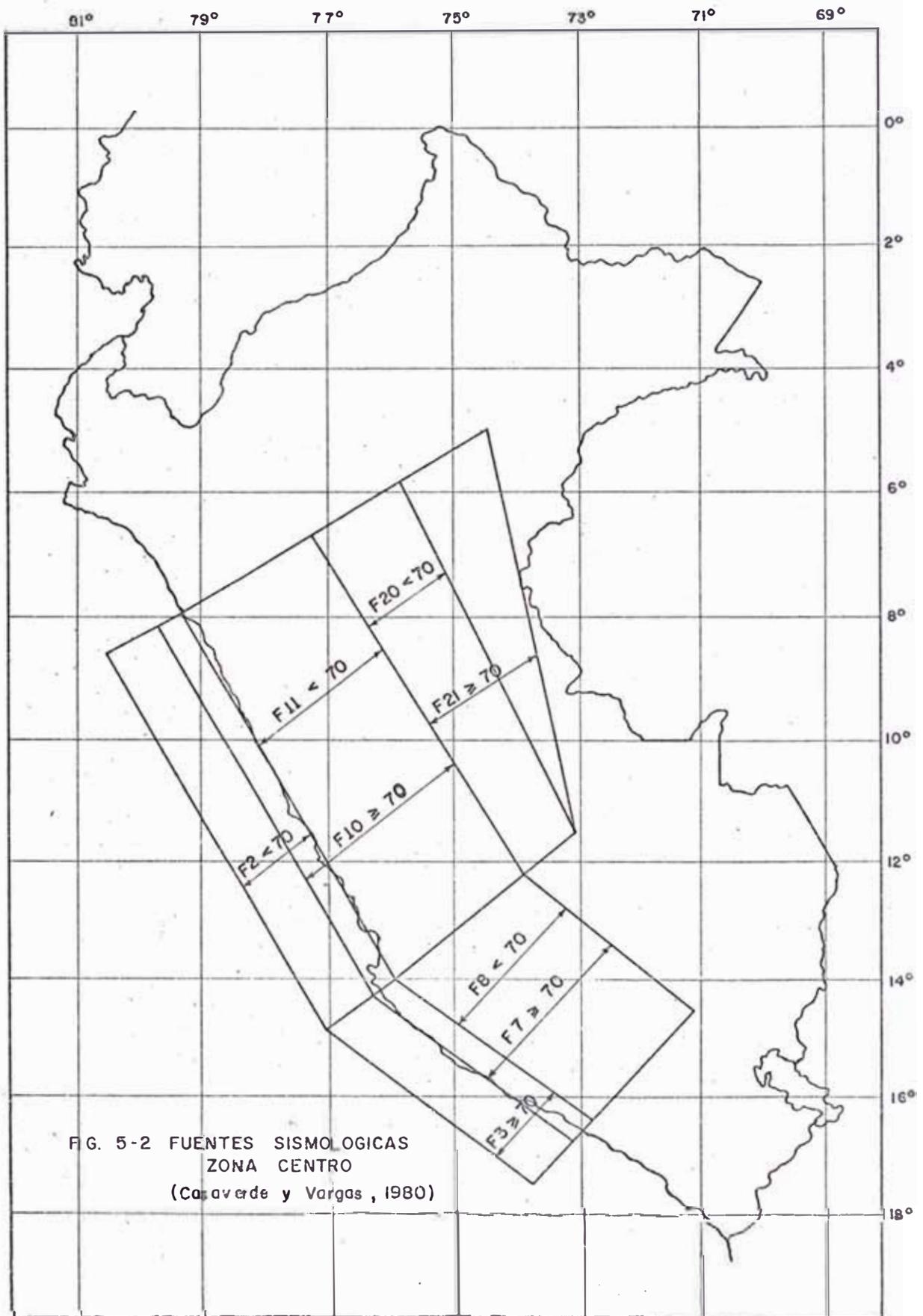
METODOLOGIA	Tiempo de Exposición (años)		
	30	50	100
Proyecto Olmos (Huaco, 1981)	-	0.282	0.344
Datos 1963-1976 (Casaverde y Vargas, 1980)	0.210	0.255	0.328
Datos 1963-1981 (Casaverde y Vargas, 1982)	0.204	0.247	0.319
			0.535

TABLA - 5 - 10

ACELERACIONES ESPERADAS % g PARA LA ZONA CENTRO

METODOLOGIA	Tiempo de Exposición (años)		
	30	50	100
Transvase Mantaro (Huaco, 1982)	0.265	0.306	0.358
Datos 1963-1976 (Casaverde y Vargas, 1980)	0.175	0.213	0.271
Datos 1963-1981 (Casaverde y Vargas, 1982)	0.167	0.202	0.256
			0.429





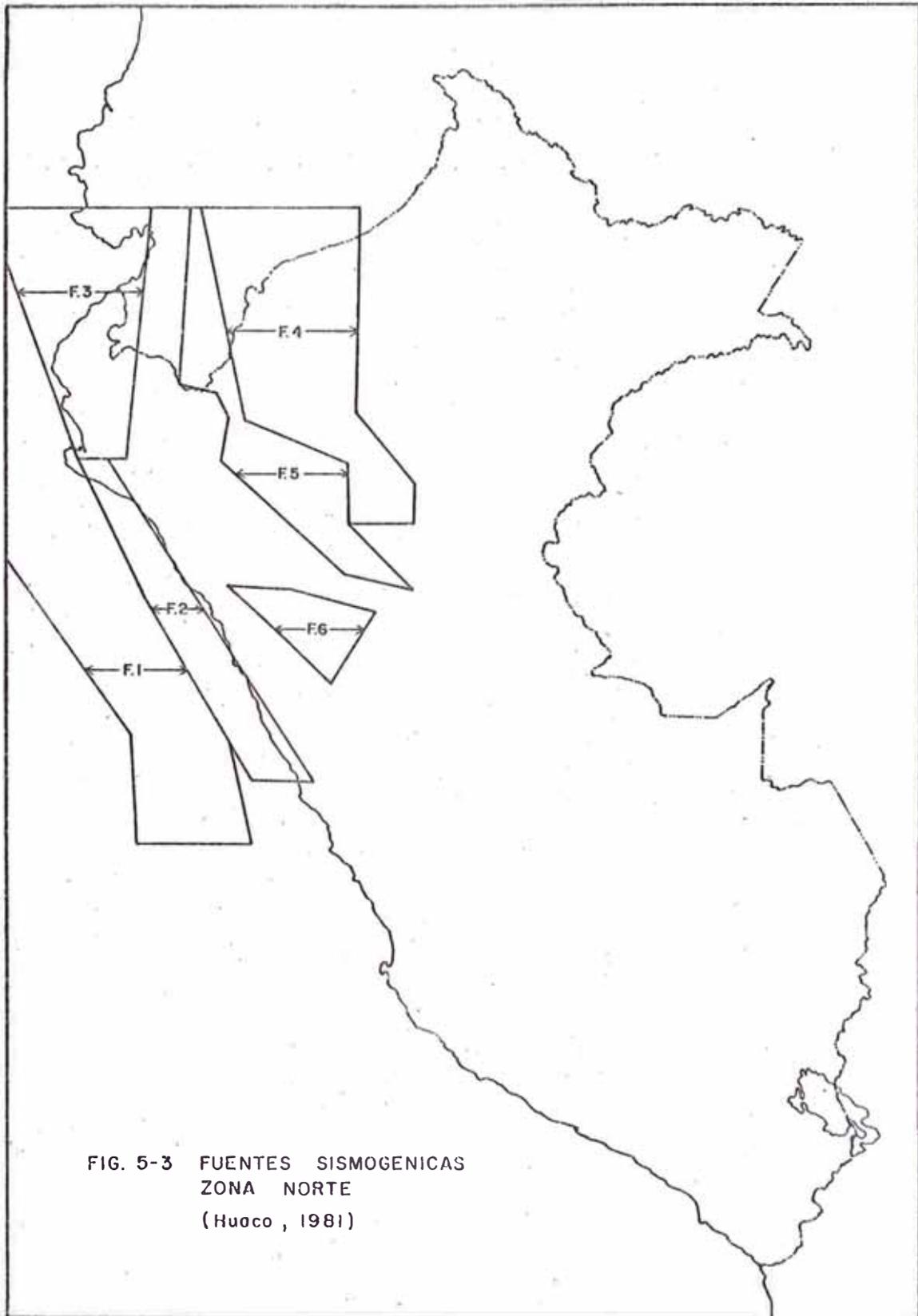


FIG. 5-3 FUENTES SISMOGENICAS  
ZONA NORTE  
(Huaco , 1981)

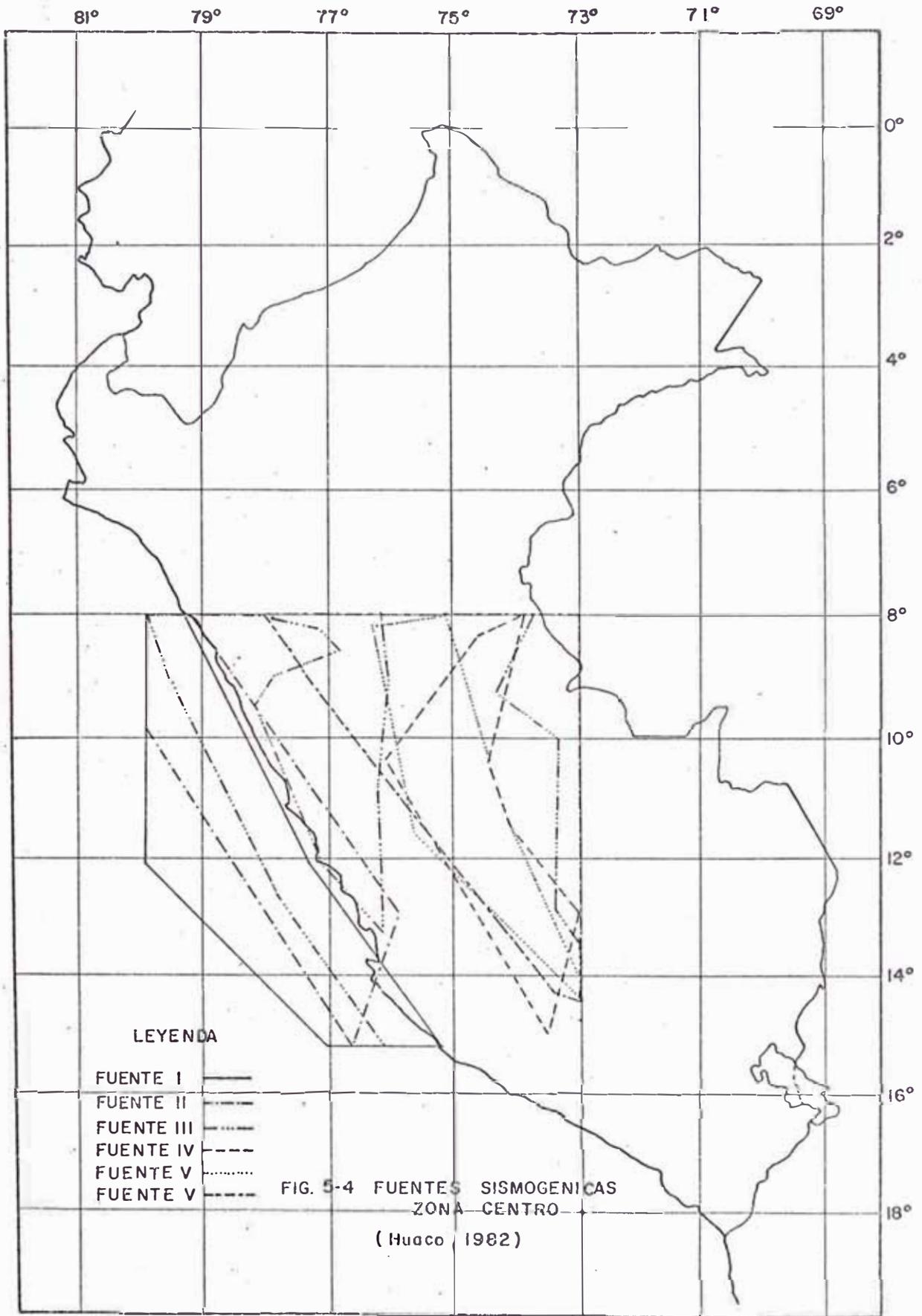


FIG. 5-5 CURVAS DE RECURRENCIA POR FUENTE ZONA NORTE (Casaverde y Vargas , 1980)

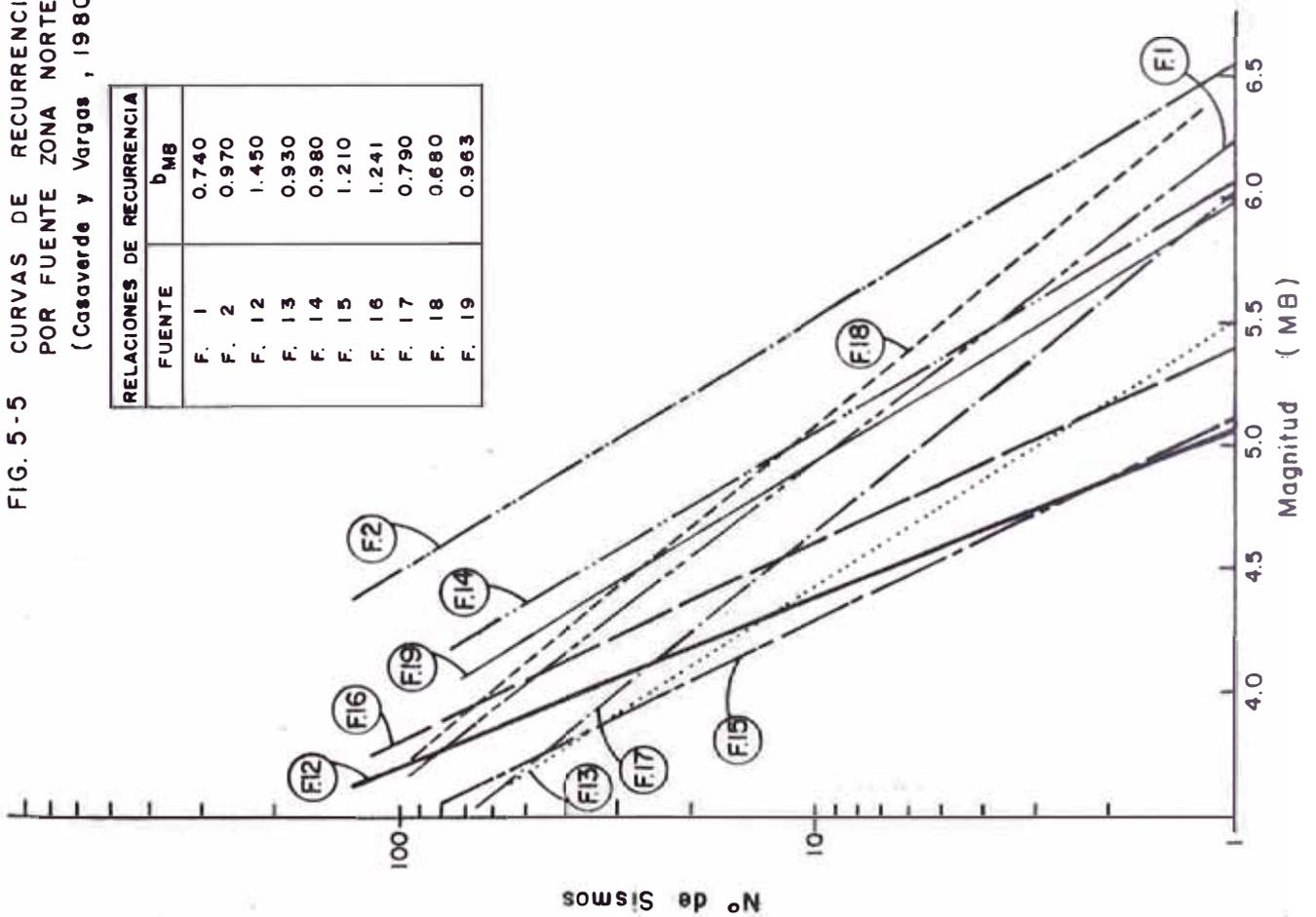


FIG. 5-6 CURVAS DE RECURRENCIA POR FUENTE ZONA NORTE (Casaverde y Vargas , 1982)

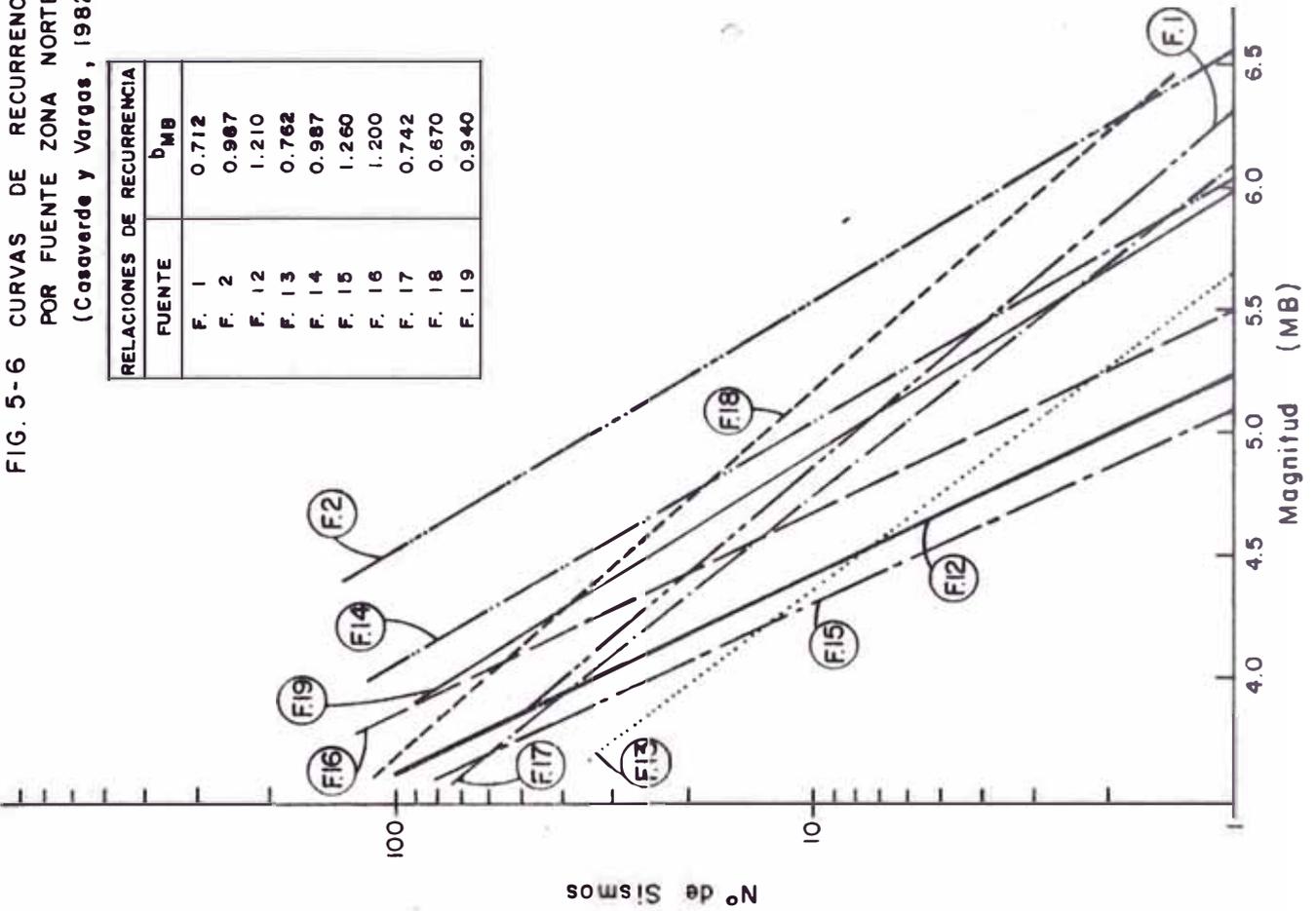


FIG. 5-7 CURVAS DE RECURRENCIA POR FUENTE ZONA CENTRO (Casaverde y Vargas , 1980)

RELACIONES DE RECURRENCIA	
FUENTE	$b_{MB}$
F. 2	0.970
F. 3	1.300
F. 7	0.815
F. 8	0.870
F. 10	0.880
F. 11	1.180
F. 20	0.610
F. 21	0.850

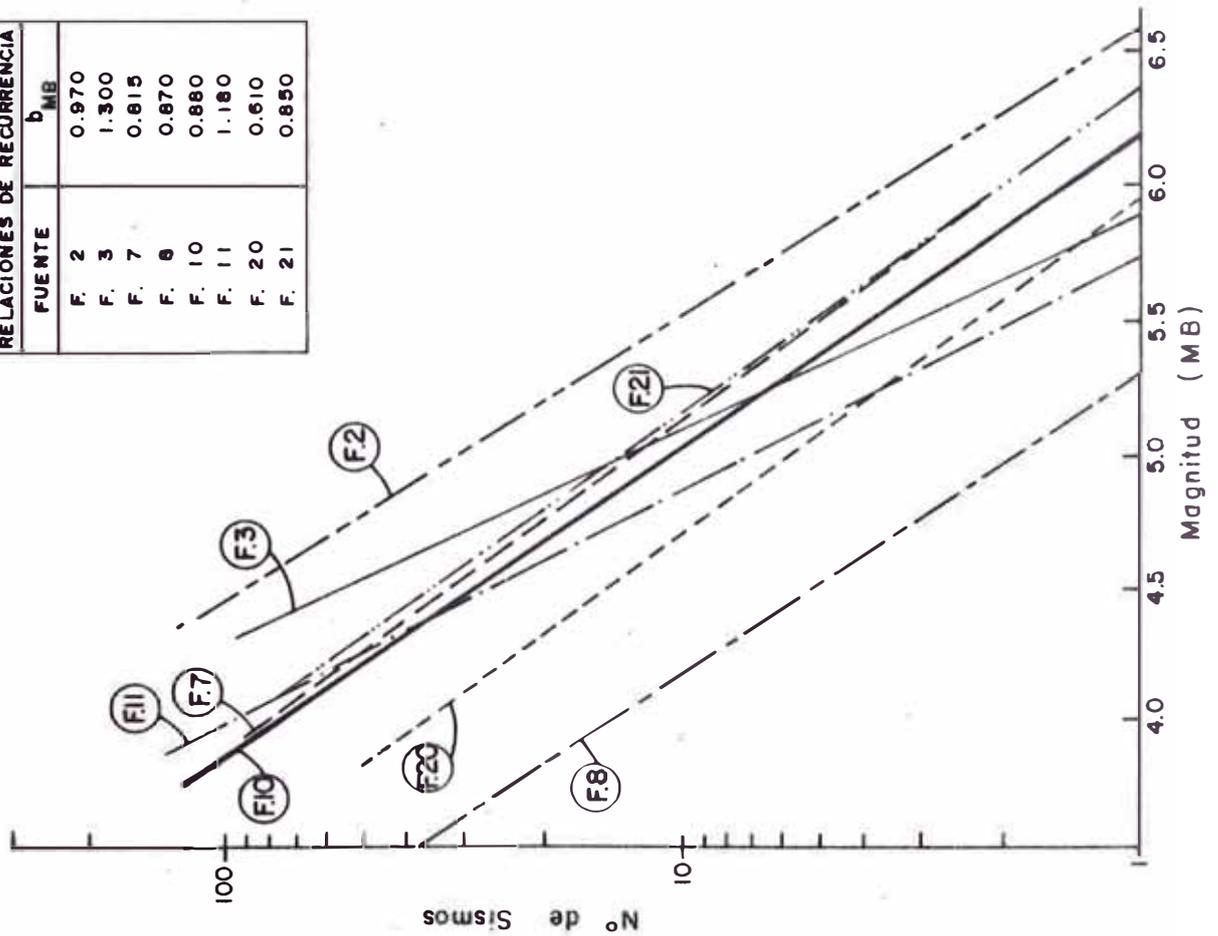
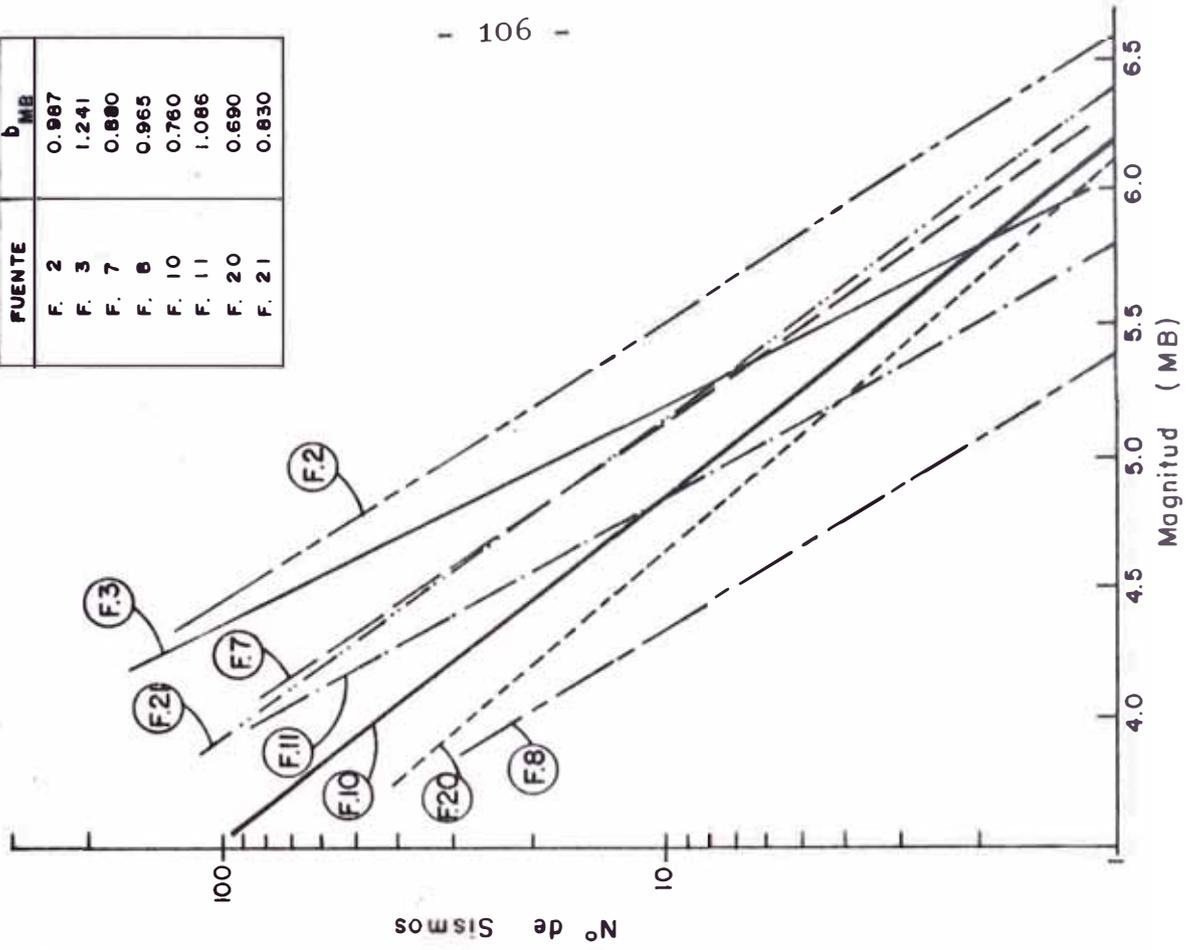


FIG. 5-8 CURVAS DE RECURRENCIA POR FUENTE ZONA CENTRO (Casaverde y Vargas , 1982)

RELACIONES DE RECURRENCIA	
FUENTE	$b_{MB}$
F. 2	0.987
F. 3	1.241
F. 7	0.880
F. 8	0.965
F. 10	0.780
F. 11	1.086
F. 20	0.690
F. 21	0.830



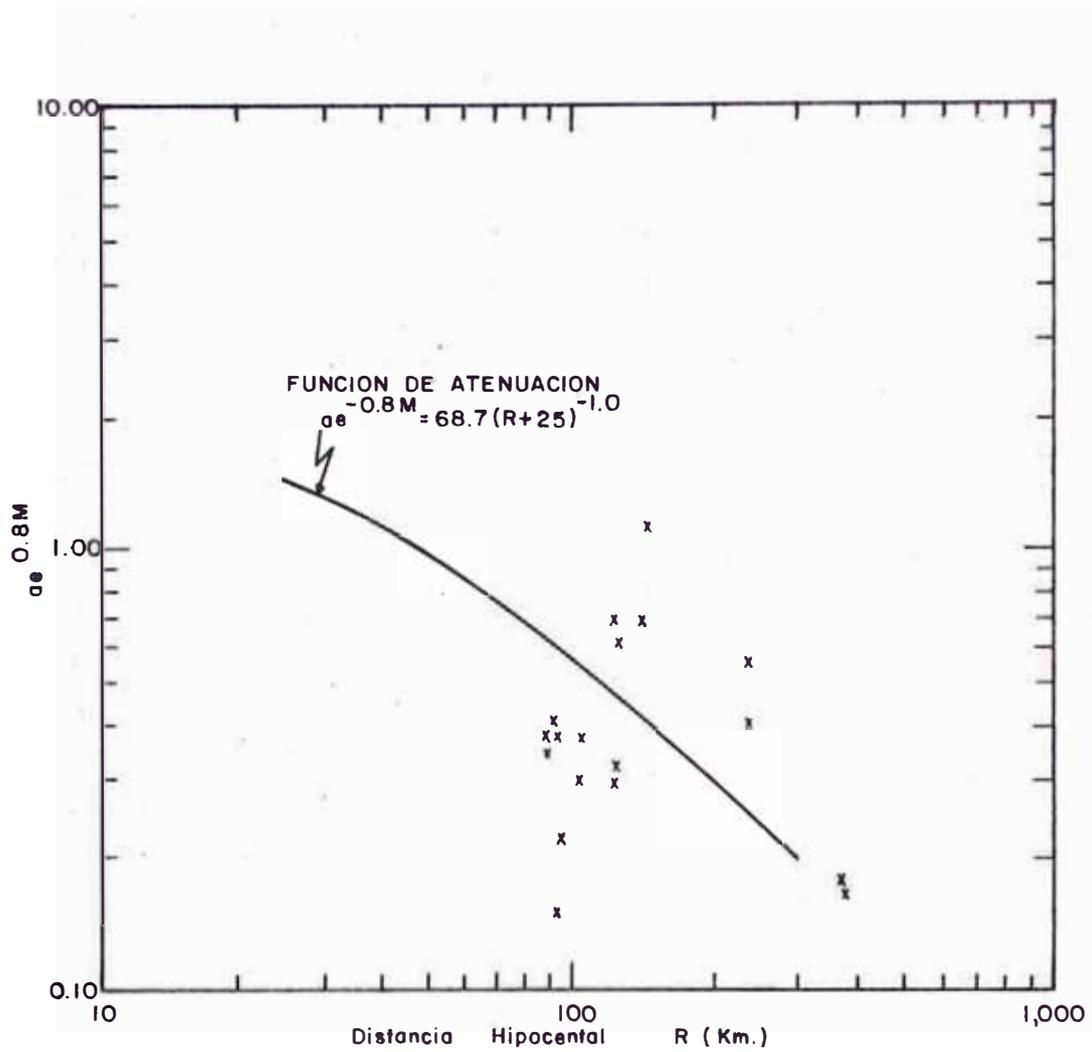


Fig.5-9 VARIACION DE LA ACELERACION MAXIMA CON LA DISTANCIA HIPOCENTRAL (Casaverde y Vargas, 1980)

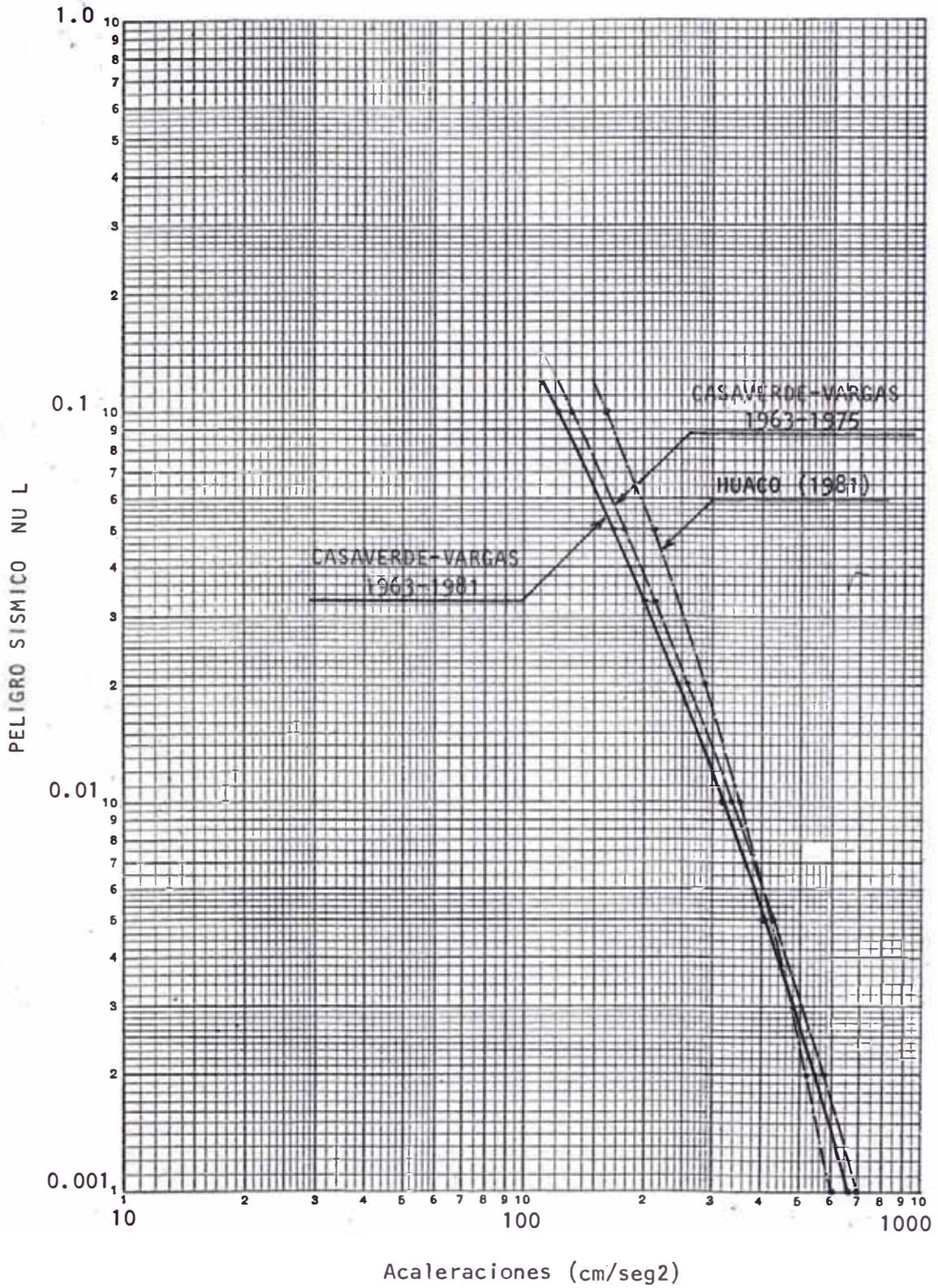


FIG. 5-10 PELIGRO SISMICO ANUAL PARA LA ZONA NORTE

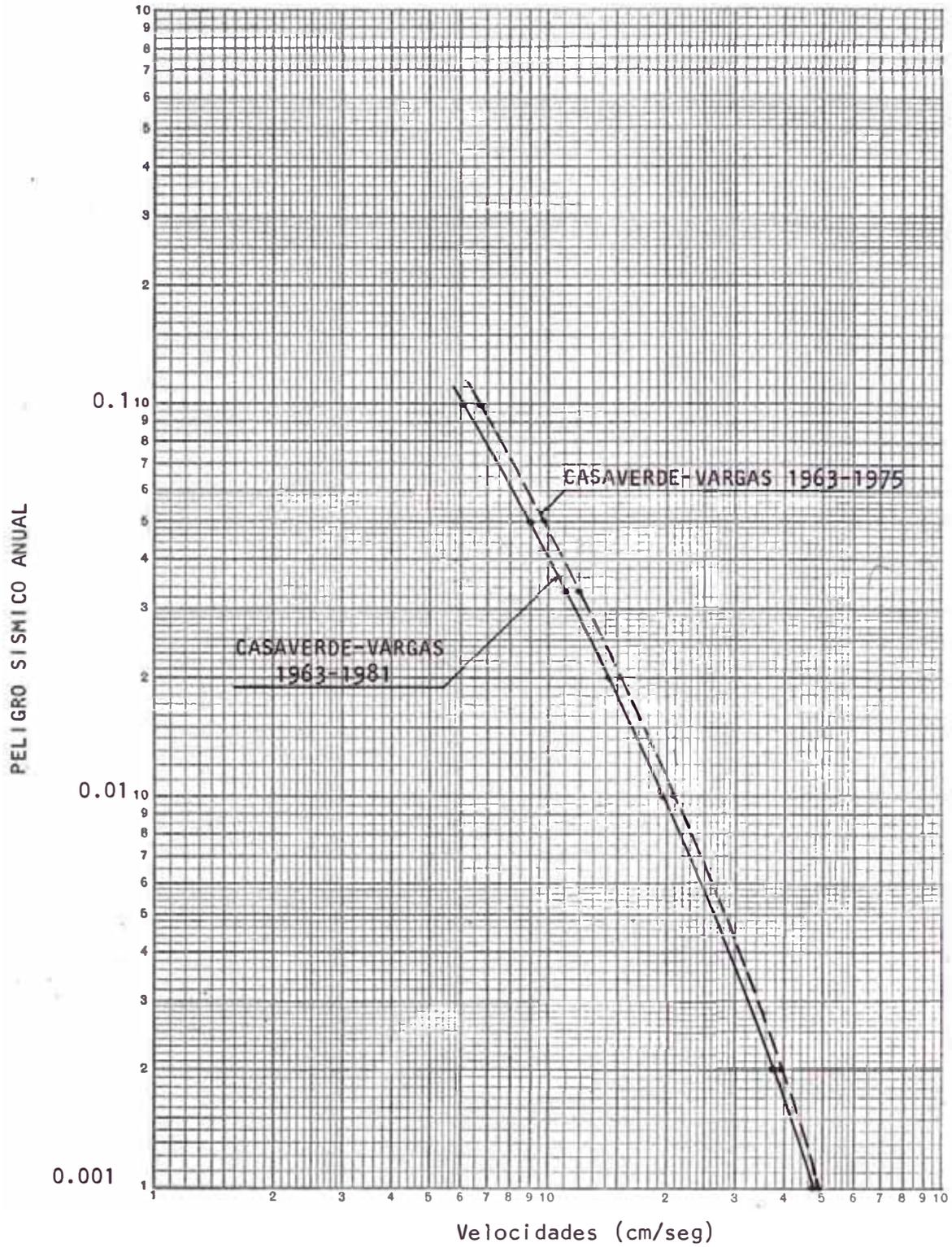


FIG. 5-11 PELIGRO SISMICO ANUAL PARA LA ZONA NORTE

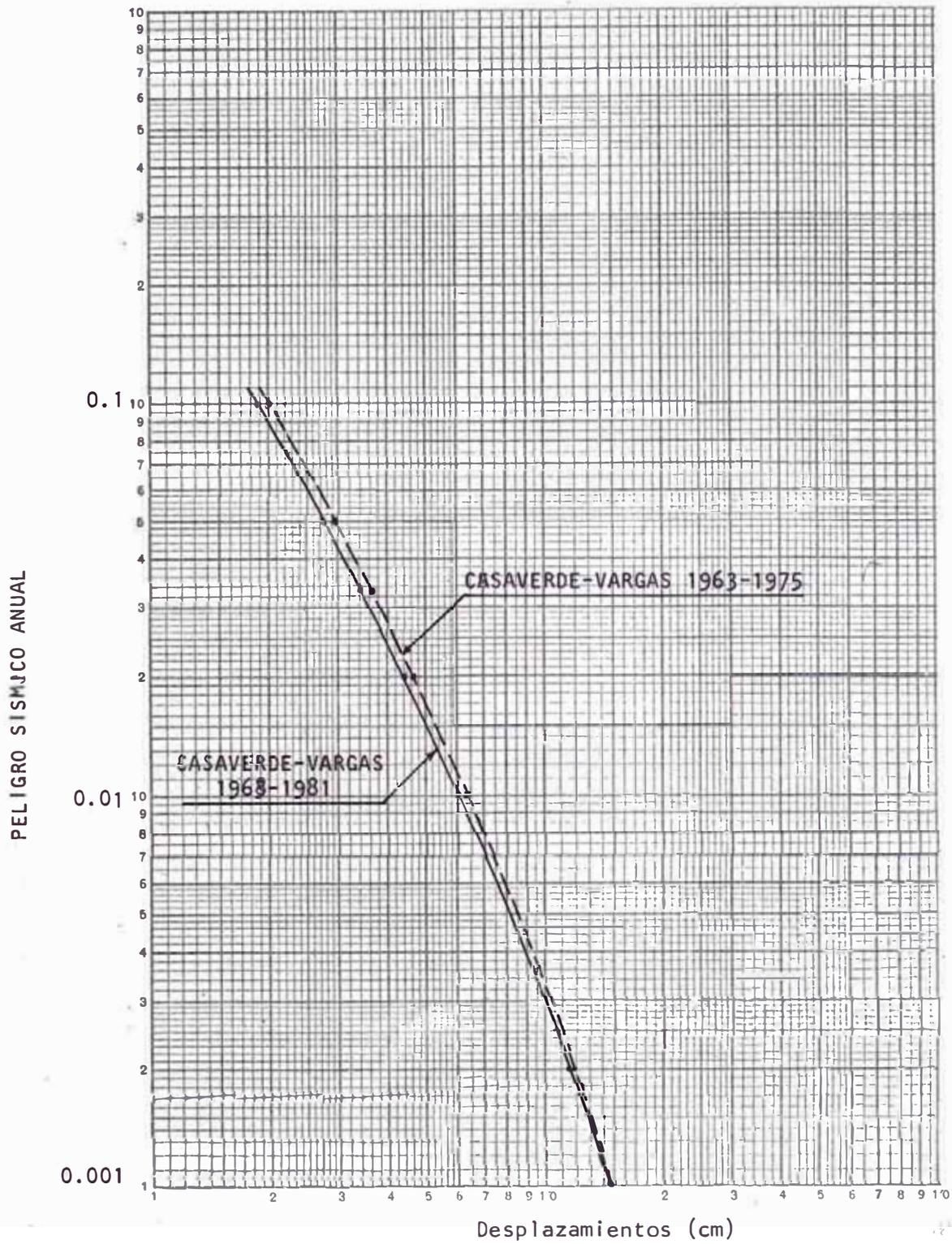


FIG. 5-12 PELIGRO SISMICO ANUAL PARA LA ZONA NORTE

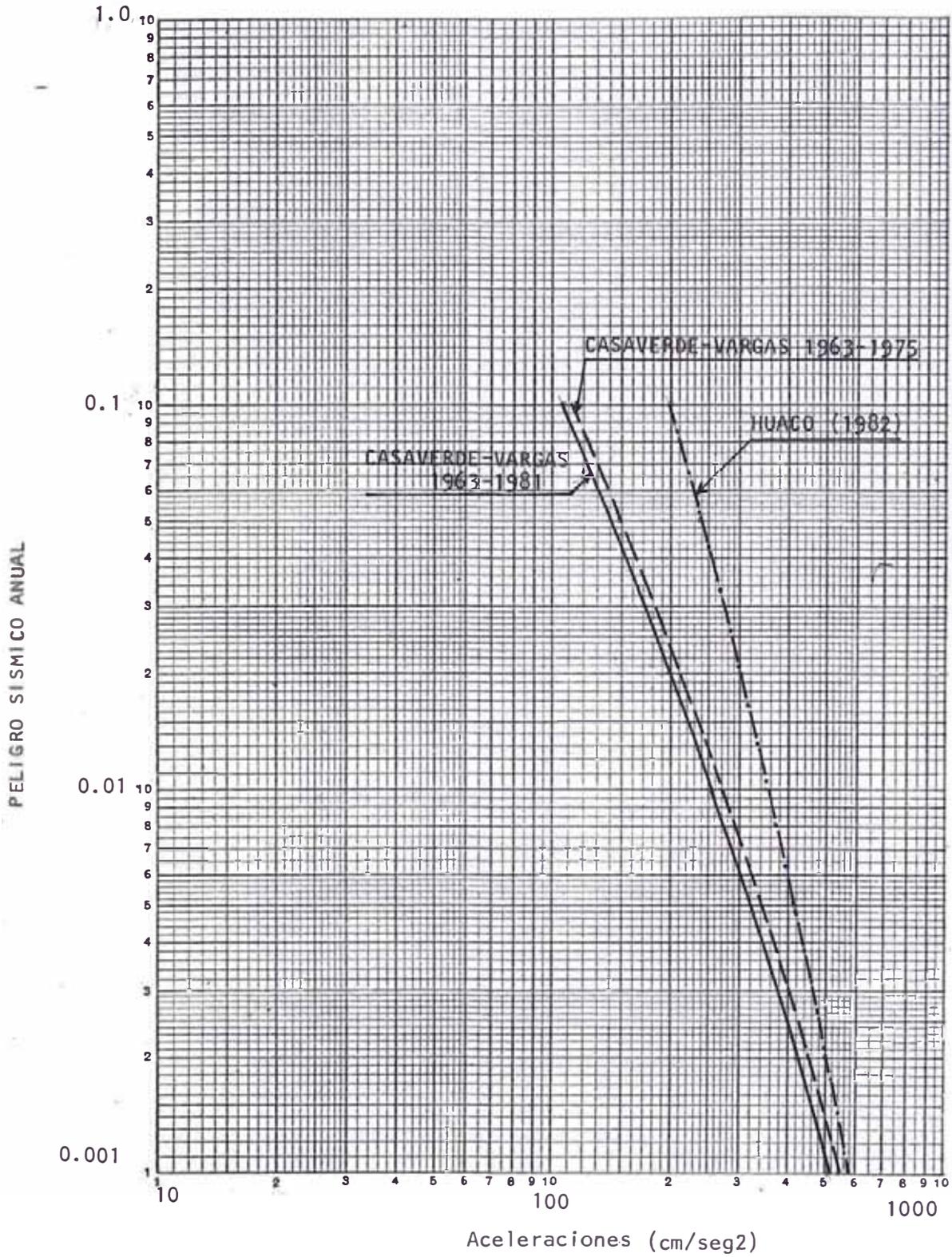


FIG. 5-13 PELIGRO SISMICO ANUAL PARA LA ZONA CENTRO

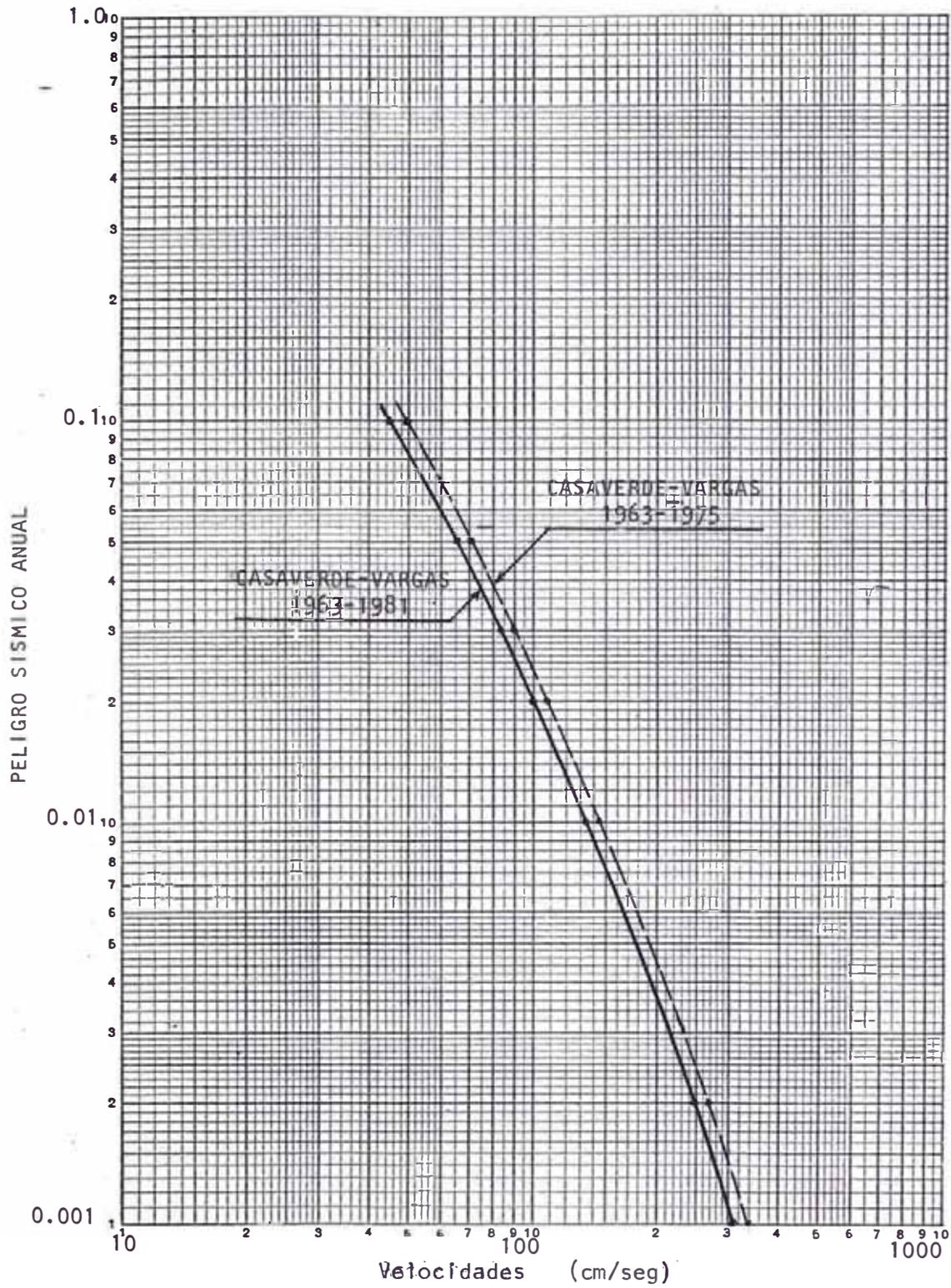


FIG. 5-14 PELIGRO SISMICO ANUAL PARA LA ZONA CENTRO

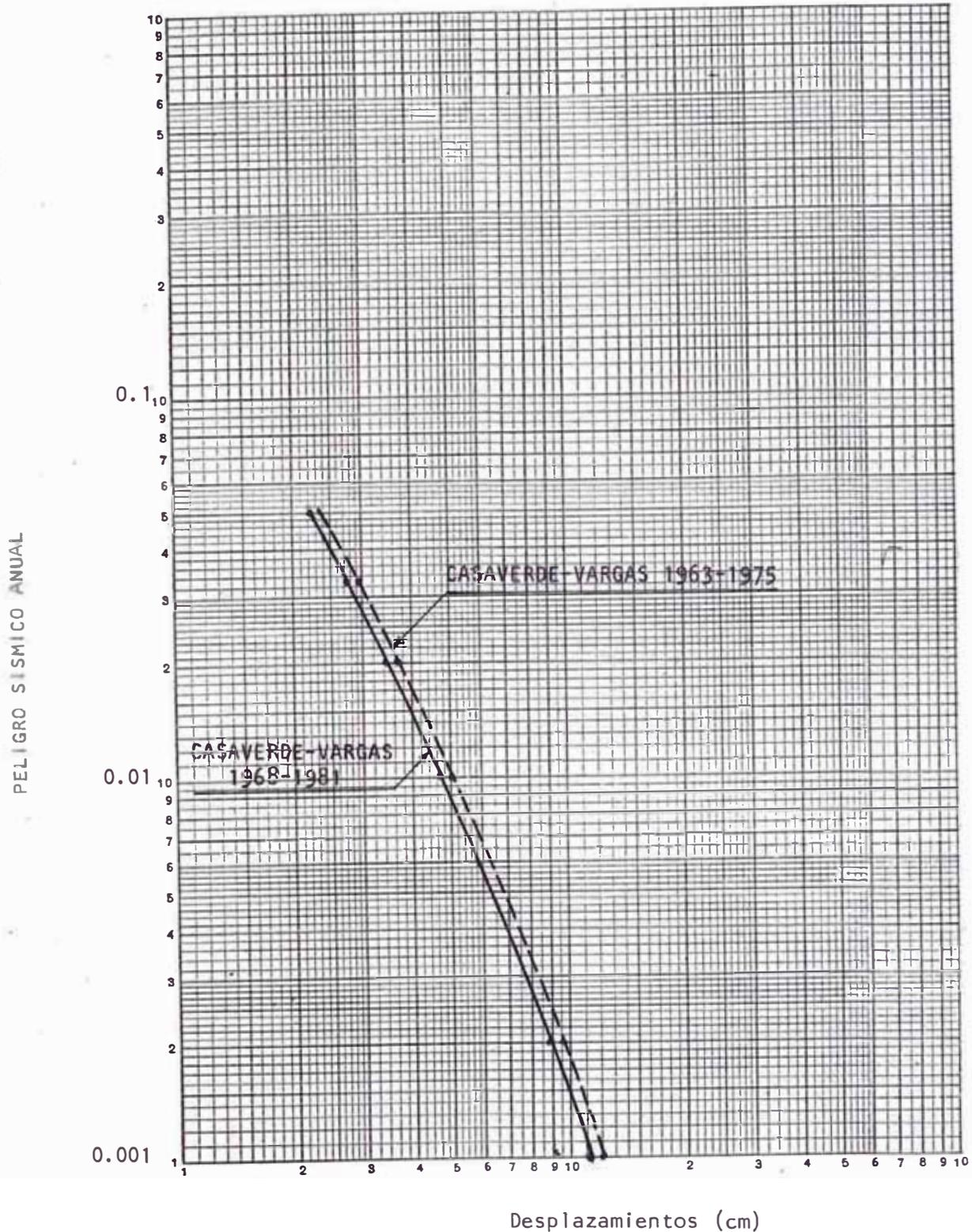


FIG. 5-15 PELIGRO SISMICO ANUAL PARA LA ZONA CENTRO

## C A P I T U L O VI

### 6. ESTUDIO DE SITIO Y DE MICROZONIFICACION SISMICA

#### 6.1 Consideraciones Generales.

El presente Capítulo tiene por objeto realizar el estudio de sitio y de microzonificación sísmica. Para este estudio se ha considerado únicamente la zona Norte del Perú (Piura). No fué posible realizar este estudio en la zona de la Costa Central del Perú (Lima), debido a que no se disponían de algunas características geotécnicas del terreno al momento de realizar el presente Estudio.

En el estudio de sitio se ha utilizado y comparado métodos simplificados existentes y el analítico de respuesta dinámica del suelo, utili-

zando la solución continua de la propagación vertical de las ondas de corte, con parámetros no lineales del suelo.

Schnabel, Lysmer y Seed, (1972) desarrollaron un programa de cómputo SHAKE que evalúa la amplificación sísmica mediante el método analítico. La implementación de este Programa fué realizada en el Centro de Cómputo de la Universidad Nacional de Ingeniería, durante el desarrollo del presente trabajo.

El Estudio se basa en la sismicidad y peligro sísmico del lugar, así como las características del terreno. Se ha utilizado información del terreno disponible en estudios previos realizados por INIE (1979), INGEMET (1979), JICA (1979), ELECTROPERU (1981,1982), ASCOSESA (1982) y ALVA (1982). Los parámetros del terreno consistieron en valores de penetración estandar y densidad de campo con la profundidad y la ubicación del nivel freático. Las propiedades dinámicas del terreno fueron asumidas, debido a que no existían disponibles ensayos dinámicos de laboratorio del suelo en la zona del estudio.

La máxima aceleración del sismo de diseño para el análisis se determinó por métodos probabilísticos (Capítulo V), Se utilizaron los registros digitizados y corregidos por Brady y Pérez, (1977) escogiéndose tres de ellos, del 17 de octubre de 1966 en un componente  $N08^{\circ}E$ , del 31 de mayo de 1970 en su componente L y del 03 de octubre de 1974 en Lima, en su componente  $N 82^{\circ}W$ , escalados a valores de aceleración máxima, representando diferentes tiempos de exposición de la ocurrencia de un sismo.

En el análisis de licuación se comparan los resultados utilizando los métodos simplificados y analíticos, así como las influencias de los sismos de diseño y sus aceleraciones máximas. Con el método analítico se determinaron además espectros de respuesta en tres niveles del terreno: en la superficie, a nivel de la cimentación y en la base. Se presentan los factores de amplificación y las formas de los espectros normalizados de respuesta. La metodología se seguida se documenta de manera detallada.

En el diseño sismo-resistente de obras civiles existe tres problemas de origen geotécnico:

a) Amplificación sísmica, que resulta de la influencia de las condiciones geológicas y del suelo en el sitio; b) Interacción suelo-estructura, que consiste en la determinación de es fuerzos y movimientos en la interfase entre la estructura y el suelo que la rodea. Los efectos en la interfase dependen de las respuestas dinámicas de la estructura y del suelo y, c) Licuación, que es la posible pérdida de resistencia del suelo durante un sismo con la inestabilidad resultante en el sitio y la pérdida de capacidad portante.

Los tres problemas mencionados están interrelacionados. Por ejemplo, la pérdida de rigidez del terreno ocasionada por el sismo, tiene gran influencia en el movimiento superficial del terreno. Sin embargo, los fenómenos pueden estudiarse separadamente, teniendo en mente que dichos fenómenos están interrelacionados.

Existe documentación sobre la ocurrencia de los fenómenos de licuación y amplificación sísmi-

ca en el Perú, debido a terremotos ocurridos en Tumbes y Piura, Moyobamba, Juanjuí, Ica, Cañete, Tambo de Mora y Cusco. Quizás el caso más difundido es el fenómeno de licuación y amplificación sísmica ocurrido entre Puerto Casma y Chimbote, a raíz del terremoto del 31 de mayo de 1970. (Alva Hurtado, 1981).

Este trabajo presenta los resultados de un estudio de sitio en la zona Norte (Piura). Se ha utilizado la información del terreno disponible en estudios previos realizados por ELECTROPERU, aplicándose métodos simplificados y analíticos para determinar el potencial de licuación y la amplificación sísmica con un terremoto esperado.

## 6.2 Base Teórica.

La teoría considera las respuestas asociadas con la propagación vertical de las ondas de corte, a través de un sistema viscoelástico-lineal, mostrado en la Figura 6-1 (Schnabel et al, 1972).

El sistema consiste de  $n$  capas horizontales que se extienden hasta el infinito en la dirección horizontal y que tienen un semiespacio como capa de fondo. Cada capa es homogénea, isotrópica y se caracteriza por: su espesor ( $h$ ), su densidad de masa ( $\rho$ ), su módulo de corte ( $G$ ) y su factor de amortiguamiento ( $\beta$ ).

### 6.2.1 La propagación de las ondas de corte armónicas en un sistema unidimensional.

La propagación vertical de las ondas de corte a través de un sistema mostrado en la Figura (6-2), causará únicamente desplazamientos horizontales.

$$u = u(x,t) \quad (6-1)$$

que debe satisfacer la ecuación de onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} \quad (6-2)$$

Los desplazamientos armónicos con frecuencia pueden ser escritos en la forma:

$$U(x,t) = U(x) e^{i\omega t} \quad (6-3)$$

reemplazando la ecuación (6-3) en la ecuación (6-2) resulta una ecuación diferencial:

$$(G + i\omega\eta) \frac{d^2 U}{dx^2} = \rho\omega^2 U$$

que tiene la solución general:

$$U(x) = E e^{ikx} + F e^{-ikx} \quad (6-5)$$

en la cual:

$$k^2 = \frac{\rho\omega^2}{G^* + i\omega\eta} = \frac{\rho\omega^2}{G^*} \quad (6-6)$$

donde:  $K$  es el número de onda compleja y  $G^*$  es el módulo de corte complejo. La razón crítica de amortiguamiento,  $\beta$ , está relacionada con viscosidad  $\eta$  por:

$$\omega\eta = 2G\beta$$

Experimentos en muchos materiales de suelo, indican que  $G$  y  $K$  están próximos o son constantes sobre el rango de frecuencia que es de principal interés en el análisis. Es por lo tanto conveniente, expresar el módulo de corte complejo en términos de la razón crítica de amortiguamiento

to en el lugar de la viscosidad.

$$G^* = G + i\omega\eta = G(1+2i\beta) \quad (6-7)$$

Donde  $G^*$  puede ser asumido como independiente de la frecuencia.

Las ecuaciones (6-3) y (6-5) dan la solución de la ecuación de onda para un movimiento armónico de frecuencia  $\omega$ .

$$u(x,t) = Ee^{i(kx + \omega t)} + Fe^{-i(kx - \omega t)} \quad (6-8)$$

donde: el primer término representa la propagación de la onda incidente bajando en la dirección negativa del eje X, (hacia arriba) y el segundo término representa la propagación de la onda reflejada viajando en la dirección positiva del eje X (hacia abajo).

La ecuación (6-8) es válida para cualquiera de las capas de la Figura 6-2. Introduciendo un sistema de coordenadas locales X para cada capa, los desplazamientos en la parte superior y en la parte inferior de la capa m son:

$$u_m(X=0) = (E_m + F_m)e^{i\omega t} \quad (6-9)$$

$$u_m(X=h_m) = -(E_m e^{ik_m h_m} + F_m e^{-ik_m h_m}) \cdot e^{i\omega t} \quad (6-10)$$

donde los esfuerzos de corte sobre un plano horizontal son:

$$\tau(x,t) = G \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = G^* \frac{\partial u}{\partial x} \quad (6-11)$$

o por la ecuación (6-8):

$$\zeta(x,t) = ikG^* (Ee^{ikx} - Fe^{-ikx}) e^{i\omega t} \quad (6-12)$$

y los esfuerzos de corte en la parte superior e inferior de la capa  $m$  son respectivamente:

$$\zeta_m(X=0) = ik_m G_m^* (E_m - F_m) e^{i\omega t} \quad (6-13)$$

$$\zeta_m(X=h_m) = ik_m G_m^* (E_m e^{ik_m h_m} - F_m e^{-ik_m h_m}) e^{i\omega t} \quad (6-14)$$

Los esfuerzos y desplazamientos deben ser continuos en todas las interfases. De aquí, por las ecuaciones (6-9), (6-10), (6-13) y (6-14).

$$E_{m+1} + F_{m+1} = E_m e^{ik_m h_m} + F_m e^{-ik_m h_m} \quad (6-15)$$

$$E_{m+1} - F_{m+1} = \frac{k_m G_m^*}{k_{m+1} G_{m+1}^*} (E_m e^{ik_m h_m} - F_m e^{-ik_m h_m}) \quad (6-16)$$

sustrayendo o adicionando las ecuaciones (6-15) y (6-16) obtendremos las siguientes fórmulas relativas para las amplitudes  $E_{m+1}$  y  $F_{m+1}$  de las ondas incidentes y reflectadas en la capa  $m+1$ , expresadas en términos de las amplitudes en la capa  $m$ .

$$E_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 + \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 - \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \quad (6-17)$$

$$F_{m+1} = \frac{1}{2} E_m (1 - \alpha_m) e^{ik_m h_m} + \frac{1}{2} F_m (1 + \alpha_m) e^{-ik_m h_m} \quad (6-18)$$

donde:  $\alpha_m$ , es la razón de impedancia compleja.

$$\alpha_m = \frac{k_m G_m}{k_{m+1} G_{m+1}} = \left( \frac{\rho_m G_m^*}{\rho_{m+1} G_{m+1}^*} \right)^{1/2} \quad (6-19)$$

la cual es también independiente de la frecuencia.

En la superficie libre los esfuerzos de corte deben ser cero. Además, en la ecuación (6-12) con  $\tau_1$  y  $X_1$  iguales a cero, nos resulta  $E_1 = F_1$ , es decir, las amplitudes de las ondas incidentes y reflejadas son siempre iguales en una superficie, usando de nuevo las fórmulas de recursión ecuaciones (6-17) y (6-18), conducen a las siguientes relaciones entre las amplitudes de la capa  $m$  y aquellas en la capa de superficie.

$$E_m = e_m(\omega) E_1 \quad (6-20)$$

$$F_m = f_m(\omega) E_1 \quad (6-21)$$

Las funciones de transferencia  $e_m$  y  $f_m$ , son simplemente las amplitudes para los casos en que  $E_1 = F_1 = 1$ , y pueden ser determinadas sustituyendo esta condición en las fórmulas de recursión mencionadas arriba.

Otras funciones de transferencia se obtienen fácilmente a partir de las funciones  $e_m$  y  $f_m$ . La función de transferencia  $e_m, f_m$  entre el desplazamiento en un nivel  $n$  y  $m$ , se define por:

$$A_{n,m}(\omega) = u_m / u_n$$

y sustituyendo las ecuaciones (6-20) y (6-21)

$$A_{n,m}(\omega) = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (6-22)$$

Basada en éstas ecuaciones, la función de transferencia  $A(\omega)$ , se puede encontrar entre cualquiera de dos capas del sistema. De aquí que si el movimiento es conocido en cualquier capa del sistema, el movimiento puede ser computado en cualquier otra capa.

Las amplitudes  $E$  y  $F$  pueden así ser computadas para todas las capas en el sistema y las deformaciones y aceleraciones, pueden ser derivadas a partir de la función de desplazamiento. Las aceleraciones son expresadas por la ecuación:

$$\ddot{u}(x,t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 (Ee^{i(kx+\omega t)} + Fe^{-i(kx-\omega t)}) \quad (6-23)$$

y los esfuerzos por:

$$\gamma = \frac{\partial u}{\partial x} = ik(Ee^{i(kx+\omega t)} - Fe^{-i(kx-\omega t)}) \quad (6-24)$$

### 6.2.2 Relación entre los movimientos en Roca Superficial y Roca Base.

Si las amplitudes de las componentes de las ondas incidentes y reflectadas  $E_N$  y  $F_N$ , en el semiespacio elástico Figura 6-3a, se conocen los movimientos en el semiespacio con el sistema de suelos extraídos Figura 6-3b, son fácilmente computados. Los esfuerzos de corte en cualquier superficie libre son cero; así una amplitud resultante de  $2E_N$  en la superficie libre del semiespacio es impuesto que la onda reflectada es completamente absorbida en el semiespacio, y no contribuye a la onda incidente. La componente de la onda incidente,  $E_N$ , es por lo tanto igual en todos los sistemas mostrados en la Figura 6-3.

La relación entre el movimiento de la base,  $u_N$ , y el movimiento  $u'_N$ , en la superficie libre, puede ser calculado a partir de la función de transferencia.

$$A'_{N,1}(\omega) = \frac{u_N}{u'_N} = \frac{e_N(\omega) + f_N(\omega)}{2e_N(\omega)} \quad (6-25)$$

La función de transferencia entre el movimiento de la superficie del depósito,  $u_1$ , y el movimiento en la superficie libre del semiespacio es:

$$A'_{N,1}(\omega) = \frac{1}{e_N(\omega)} \quad (6-26)$$

Si el semiespacio es la formación rocosa yace a un depósito de suelo, la ecuación (6-25), muestra la la relación entre el movimiento del basamento y el afloramiento superficial de la roca. La relación entre las amplitudes del movimiento del basamento y la roca superficial es siempre menor que la unidad, con valores mínimos en la frecuencia de resonancia del depósito. La función de transferencia para depósitos usados se muestra en la Figura 6-4.

La amplitud del movimiento del basamento en sólo el 65% de la amplitud del movimiento en la roca superficial a la frecuencia natural del depósito. Esta diferencia es función de la relación de impedancia entre el depósito y la roca y el amortiguamiento del depósito.

Las diferencias en las respuestas computadas resultantes del uso de una base rígida, relativas al uso de una base elástica dependen también de las frecuencias dominantes en el movimiento de la roca. Los movimientos de la roca con frecuen

cia dominante cerca de la frecuencia de resonancia del depósito, serán considerablemente más afectivos que los movimientos con frecuencia dominante entre las funciones de resonancia, Figura 6-4.

El efecto de la elasticidad de la roca base, es por lo tanto, no solo una función de la relación de la impedancia entre el depósito y la roca y el amortiguamiento del depósito, sino también es función de la distribución de frecuencia de la energía en el movimiento de la roca relativa a frecuencia de resonancia del depósito.

Una aproximación para el movimiento de la Figura 6-3b la superficie libre para una de las capas del sistema, se puede obtener de una manera similar al semiespacio, con tal que la componente de la onda incidente en la capa superficial y en la capa dentro del sistema sean iguales, es decir  $E_m = E'_m$ . Esto es aproximadamente el caso cuando las propiedades del estrato  $m$  y todas las capas debajo de ellas son iguales en ambos sistemas y cuando la impedancia,  $\rho_m v_m$ , es del mismo orden de magnitud que el semiespacio. Este es el caso por ejemplo, de capas de rocas sedimentarias que suprayacen sobre roca base cristalina.

Para una solución más exacta el movimiento en las capas superficiales debe ser computados en un sistema esperado del movimiento en el semiespacio.

### 6.2.3 Movimientos Transitorios.

Las expresiones desarrolladas anteriormente son válidas para movimientos armónicos en estado constante. La teoría se puede extender para movimientos transitorios, usando las transformaciones de

Fourier.

Un registro sismográfico digitado con  $n$  valores de aceleraciones equidistantes,  $\ddot{u}_j (J, \Delta t)$ ,  $j = 0, 1, \dots, n-1$ , pueden ser representadas por una suma finita de movimientos armónicos.

$$\ddot{u}(t) = \sum_{s=0}^{n/2} (a_s e^{i\omega_s t} + b_s e^{-i\omega_s t}) \quad (6-27)$$

donde:  $\omega_s$ ,  $s=0, \dots, n/2$ , son las frecuencias equidistantes.

$$\omega_s = \frac{2\tilde{f}}{n \cdot \Delta t} \cdot s \quad (6-28)$$

$a_s$  y  $b_s$  designan los coeficientes complejos de la serie Fournier.

$$a_s = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \ddot{u}(t) e^{-i\omega_s t}, \quad b_s = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \ddot{u}(t) e^{i\omega_s t} \quad (6-29)$$

y cada término en la ecuación (6-27) es un movimiento armónico oscilante con frecuencia  $\omega_s$ .

Si las series en la ecuación (6-27) representan el movimiento en un estrato  $m$ , una nueva serie que representa el movimiento en cualquier otro estrato  $n$ , se obtiene aplicando factores de amplificación apropiados a partir de la ecuación (6-23) para cada término de la serie:

$$\ddot{u}_n(t) = \sum_{s=0}^{n/2} A_{m,n}(\omega_s) \cdot (a_{m,s} e^{i\omega_s t} + b_{m,s} e^{-i\omega_s t}) \quad (6-30)$$

La representación de un movimiento discreto con su transformada de Fourier, dá una representación exacta del movimiento en los puntos discretos  $t = j \ t$ ,  $j = 0, \dots, n-1$ . La repetición cúbica del movimiento con el período  $T = n \ t$ , es implicada en la solución.

La solución se aplica, por lo tanto, a un tren infinito de acelerogramas idénticos en vez que a un único acelerograma dado. Para sistemas con amortiguamiento, esto no tiene ninguna consecuencia significativa, desde que los acelerogramas individuales pueden ser separados por una zona quieta - de ceros que hacen que las respuestas de un ciclo se amortiguen antes que comience el próximo ciclo.

La transformada de Fourier puede ser ejecutada por varias formas. El programa SHAKE utiliza el algoritmo de la transformada rápida de Fourier desarrollado por Cooley and Tukey (1965), el cual es más rápido en un factor  $n/\log n$  sobre el método convencional. Esta técnica evalúa todos los valores en las series simultáneamente. El método requiere que el número de términos en la serie, sea una potencia de 2. Un análisis típico - que usa un registro de aceleración de 800 términos, con un incremento de tiempo  $\Delta t = 0.02$  seg., usará 1024 valores en la transformada rápida de Fourier, con todos los valores entre 800 y 1024 igualados a cero. Esto satisface los requerimientos de una zona quieta después del regis-

tro de aceleración y que el número total de términos, debe ser una potencia de 2.

### 6.3 Licuación de suelos.

El cambio de suelo firme a un fluido denso con la ocurrencia de un sismo, se denomina licuación. El suelo pierde su resistencia cortante, las estructuras se hunden en el suelo y ocurren grandes flujos de tierra. Este fenómeno ocurre en arenas saturadas. Las principales manifestaciones de dicho fenómeno son:

- 1) El suelo pierde su capacidad portante, con el hundimiento de estructuras.
- 2) Los taludes y terraplenes pierden su resistencia y se generan flujos de suelo y lodo.
- 3) Aparecen conos o volcanes de arena.
- 4) Los pilotes y cajones de cimentación flotan o pierden su resistencia lateral.

Para que ocurra licuación, la resistencia del suelo debe ser nula o muy pequeña. Como la resistencia de los suelos friccionantes depende del esfuerzo efectivo, éste debe ser disminuído por el incremento del exceso de presión de poros, a la ocurrencia de un sismo. Basado en las experiencias de licuación en el Japón, Kishida (1969, 1970) presenta las siguientes reglas prácticas para determinar la posibilidad de licuación en un suelo granular.

- 1) Que el suelo sea una arena fina con el diámetro promedio  $D_{50}$  comprendido entre 0.07 mm y 0.4 mm.
- 2) Que el suelo sea uniforme con un coeficiente

de uniformidad menor de 2.

- 3) Que el suelo sea suelto con una densidad relativa menor de 75%.
- 4) Que el esfuerzo efectivo vertical sea menor de  $2.0 \text{ Kg/cm}^2$ , es decir a una profundidad inferior a 20 mts. por debajo de la superficie.
- 5) Que el valor de la penetración estandar sea menor que el doble de la profundidad, en metros.
- 6) Que exista un nivel freático alto y que exista en la zona la posibilidad de ocurrencia de un terremoto severo.

Existen metodologías simplificadas para determinar la posibilidad de ocurrencia de licuación en un sitio específico, éstas son: (Alva Hurtado y Orihuela, 1982):

#### 6.3.1 Método simplificado basado en el comportamiento del suelo en terremotos pasados.

Este método consiste en comparar las condiciones de sitio en donde haya o no haya ocurrido licuación en terremotos pasados, con las condiciones de sitio del caso en estudio. Se compara la relación de esfuerzos  $\tau/\bar{\sigma}_v$  (esfuerzo cortante actuante promedio/esfuerzo vertical efectivo), con valores de penetración corregidos. Whitman (1971) fué el primero en presentar la información de esta manera.

La relación más reciente es la presentada por Seed, Mori y Chan (1975) que se reproduce en la Figura 6-5. Dicha curva está influenciada grandemente por el terremoto de Niigata de magnitud

7.5; el uso de esta relación para sismos de magnitudes menores producirá resultados en el lado conservador.

Las desventajas de usar esta metodología son:

- 1) Se necesitan más datos para determinar la frontera que separa los casos en donde ha ocurrido o no ha ocurrido licuación.
- 2) La presentación de datos en dicha forma no considera todos los factores significantes que producen licuación, tal como duración del sismo, etc.
- 3) Los valores de penetración pueden no ser un índice apropiado de las características de licuación de los suelos.
- 4) Los valores de penetración estandar no siempre se determinan en el campo con confiabilidad, su valor depende de las condiciones de perforación y muestreo.

#### 6.3.2 Método simplificado basado en procedimientos de estimación de ciclos uniformes equivalentes.

El método de utilizar un número de esfuerzos cíclicos uniformes como equivalentes a los esfuerzos irregulares producidos por un terremoto, fue planteado originalmente por Seed e Idriss (1971) en su metodología simplificada. El método consiste en determinar el esfuerzo cortante anticipado en el terreno por un sismo y el esfuerzo cortante cíclico de resistencia a la licuación. Se comparan los dos valores para determinar la posible ocurrencia de licuación. En el método propuesto se incorporan los siguientes factores: tipo de suelo (granulometría y uniformidad), densidad relativa, presión efectiva de confinamiento

to e intensidad de movimiento sísmico. El esfuerzo cortante anticipado se determina como una modificación del esfuerzo cortante producido en una columna rígida de suelo, y el esfuerzo cortante cíclico de resistencia se determina para 10 y 30 ciclos, de gráficos proporcionados por Seed e Idriss (1971).

Seed et al (1975) y Seed (1979) presentan información reciente para la determinación del número equivalente de ciclos de esfuerzo promedio - de un sismo, en función de su magnitud. Esta información se presenta en la Figura 6-6. Debe recordarse que para la transformación se ha asumido que:

- 1) El movimiento del terreno es uniforme en todos los lugares y para todas las distancias de las fuentes sísmicas.
- 2) El tiempo-historia de esfuerzos a la profundidad de interés es directamente proporcional a la aceleración registrada en o cerca a la superficie.
- 3) Para todos los suelos, los resultados de los ensayos de laboratorio pueden representarse por una curva única normalizada que relaciona los esfuerzos al número de ciclos de falla.

Es bastante conocido que los esfuerzos cíclicos de resistencia a la licuación presentados por - Seed e Idriss (1971) son conservadores y se aplican mayormente a materiales sueltos. Se ha escogido presentar una compilación de ensayos triaxiales de licuación de arenas de la marina norte americana (Ferrito y Forrest, 1971), como alter-

nativa para determinar esfuerzos cortantes resistentes a la licuación. La Figura 6-7 presenta los valores de licuación inicial para materiales SP-SM, existiendo curvas para otros tipos de materiales.

### 6.3.3 Método analítico utilizando esfuerzos de corte - por medio de análisis de respuesta del terreno.

Los esfuerzos de corte producidos en el terreno por un terremoto también pueden determinarse por métodos analíticos que utilizan la teoría unidimensional de propagación de ondas (Schnabel et al, 1972).

La solución continua a la propagación vertical de las ondas de corte con parámetros no lineales del suelo para la determinación de esfuerzos de corte, tiene un uso muy generalizado. En este Estudio se presentan los esfuerzos de licuación actuantes basados en dicha metodología.

### 6.4 Amplificación Sísmica.

Los estudios más comunes de amplificación sísmica de suelos, asumen que ocurre un terremoto en una formación rocosa horizontal infrayaciendo una capa de suelo con estratificación horizontal infinita. El movimiento sísmico se transmite de la roca al suelo como ondas de corte con propagación vertical, el movimiento de partículas en el suelo es horizontal. Si se considera al suelo como viga de corte, es posible resolver las ecuaciones de movimiento. Existen dos técnicas utilizadas: la primera representa al suelo como una serie de masas, resortes y amortiguadores; la segunda resuelve las ecuaciones de movimiento como una viga de corte capa a ca-

pa, igualando los coeficientes desconocidos en las fronteras. La base teórica de dichos métodos se presentan en Roesset y Whitman (1969).

El programa de cómputo SHAKE (Schnabel et al.,- 1972) pertenece al segundo tipo, en el que la solución continua permite al amortiguamiento del suelo variar con la frecuencia y requiere además el uso de la transformada rápida de Fourier.

Además se ha incorporado una técnica iterativa en el programa para tratar la no linealidad de los parámetros del suelo. El usuario primero asume valores del módulo de corte y amortiguamiento para cada una de las capas, resuelve el problema de amplificación de suelos y determina la deformación producida. Si se conoce la variación de dichos parámetros con la deformación, se pueden calcular nuevos parámetros compatibles con la deformación y repetir el análisis. El procedimiento tiende a una convergencia. Las Figuras(6-8 y 6-9 ) presentan las relaciones no lineales para arenas, mientras que las Figuras (6-10 y 6-11) presentan los valores para arcillas saturadas, existiendo además valores para roca y grava (Seed e Idriss, 1970).

Los efectos de la amplificación de suelos dependen de la frecuencia del movimiento de entrada. Si dicha frecuencia está cercana a la frecuencia de resonancia de las capas del suelo, existirá amplificación. Un terremoto contiene muchas frecuencias, por lo que una manera de medir la amplificación es calcular el espectro de

respuesta para un cierto amortiguamiento en la roca basal y en la superficie del terreno. Para una frecuencia dada se puede calcular la relación de dichos espectros, que indicaría la amplificación a esa frecuencia.

El programa SHAKE ha sido utilizado en este estudio para la determinación de esfuerzos cortantes producidos por sismos y para el cálculo de la amplificación sísmica en el terreno en estudio.

#### 6.5 Evaluación de Información Geotécnica existente.

La información disponible consiste en: Ascosesa (1981), ELECTROPERU (1981, 1982), INGEMMET (1979) INIE (1979), JICA (1979) y Michelena y Asociados (1972). La información geotécnica ha sido evaluada previamente por Alva Hurtado (1982), dando mayor énfasis a los ensayos de clasificación de suelos y de penetración estandar, ya que se trataba de evaluar el potencial de licuación de suelos mediante métodos simplificados.

En este estudio se presenta el análisis de licuación y amplificación sísmica en la zona Norte (Piura) con coordenadas  $5.00^{\circ}\text{S}$  y  $80.67^{\circ}\text{W}$ , por lo que solamente la información referente a dicha zona será presentada. En dicha zona se han realizado los sondajes a percusión SCM-A y SCM-B hasta los 25.0 mts., efectuándose ensayos de penetración estandar a cada metro de profundidad. Igualmente se realizaron en la zona los sondajes rotatorios SCM-1 y SCM-2 hasta los 40.0 mts. de profundidad (INIE, 1979 y ELECTROPERU, 1981). También se realizaron ensayos de penetración es-

tandar en dicha zona para el Proyecto Chira- Piura, zona de la Rápida de Curumuy (Michelena y Asociados, 1972).

La figura (6-12) presenta los valores de penetración estandar en la área de estudio y la columna estratigráfica que consiste en una capa superficial limo-arcillosa de 3.0 mts., suprayaciendo 27.0 mts. de arena fina limosa que reposa sobre lentes de arcilla y limo. El nivel freático se encuentra a los 4.50 mts.

El estrato de arena fina limosa (SM) sería el potencialmente licuable. Los valores de penetración asignados a dicha capa serían los que corresponden a aquel sonsoje que en promedio proporciona los valores más bajos de N y no un simple promedio aritmético por elevaciones. El sonsoje representativo en la zona en estudio corresponde al SCM-A.

En cuanto a las características granulométricas de la arena fina limosa, su diámetro promedio  $D_{50}$  está comprendido entre 0.07 mm y 0.4 mm. En algunos casos el coeficiente de uniformidad llega a valores hasta de 2.91. El porcentaje de finos (pasa malla No.200) alcanzan un valor máximo de 23.8, siendo menor de 12 en la mayoría de los casos. La densidad relativa de la arena (Tabla 6-1) calculada en base a los valores de penetración estandar es menor de 75% en la mayor parte del estrato de arena, llegando a valores de 44% a los 17 metros de profundidad (Alva Hurtado 1982). Las características granulométricas y de densidad relativa de la arena fina lo hacen susceptibles al fenómeno de licuación.

### 6.5,1 Estudio del Peligro Sísmico.

En el Capítulo previo se ha determinado el peligro sísmico de la zona Norte (Piura) utilizando métodos probabilísticos para determinar la intensidad esperada de un sismo en base a la recurrencia sísmica de las zonas sismogénicas propuestas, tiempo de exposición y nivel de confianza utilizados. Para el caso de la zona Norte, para un tiempo de exposición de 30 años, se esperaría una intensidad MM aproximado de VII-VIII con una aceleración probable de 0.25 g. y para 100 años una intensidad MM de VIII con una aceleración estimada de 0.32 g. También se determinaron velocidades y desplazamientos para los mismos tiempos de exposición.

### 6.6 Estudio de Sitio.

#### 6.6.1 Parámetros del terreno.

Se ha escogido el perfil estratigráfico representativo de la zona en estudio presentado en la Figura (6-13).

El perfil consiste de una capa limo-arcillosa superficial de 3.0 metros de espesor con una resistencia a la compresión no drenada de:  $S_u = 0.75 \text{ Kg/cm}^2$ . La capa limo-arcillosa suprayace siete capas de arena. Se asume que el suelo resistente se encuentra a los 32.0 metros de profundidad. El nivel freático se encuentra a los 4.30 mts. Cada capa de arena tiene asignado un valor promedio de penetración estandar. El módulo de corte inicial de las arenas se ha determinado del valor de la velocidad de las ondas de corte, que han sido determinadas de los valo

res de penetración estandar. El amortiguamiento inicial de los suelos se asume como 5%. Los valores no lineales del módulo de corte y amortiguamiento utilizados son los presentados en las Figuras (6-8 y 6-9) para las arenas de la zona y en las Figuras (6-10 y 6-11) para la arcilla. La tabla 6-2 presenta resultados de ensayos de clasificación de las arenas en la zona en estudio.

#### 6.6.2 Sismo de Diseño.

En el país solamente existen registros de aceleraciones digitizados y corregidos para Lima (Alva Hurtado y Chang, 1978). En este trabajo se han utilizado tres registros tiempo-historia peruanos: la componente  $N08^{\circ}E$  del terremoto del 17 de octubre de 1966. la componente longitudinal del terremoto del 31 de mayo de 1970 y la componente  $N82^{\circ}W$  del terremoto del 03 de octubre de 1974.

El registro de 1966 tiene una máxima aceleración de 0.27g a los 20.3 segs. y una frecuencia promedio de 7.33 ciclos/seg. El registro de 1970 tiene una máxima aceleración de 0.11g a los 9.0 seg y una frecuencia promedio de 6.69 ciclos/seg. El registro de 1974 tiene una máxima aceleración de 0.20 a los 19.8 segs. y una frecuencia promedio de 5.35 ciclos/seg. Cada uno de los registros fué escalado a las aceleraciones máximas de 0.21g, 0.25g y 0.32g que corresponden a tiempos de exposición de 30, 50 y 100 años respectivamente. En el análisis utilizando SHAKE se tomaron 60 segs. del sismo de 1966, 32segs. del sismo de 1970 y 60 segs. del sismo de 1974.

### 6.6.3 Resultado del Análisis.

Se realizaron nueve corridas de SHAKE con el perfil estratigráfico presentado en la Figura (6-13) tres corridas con cada uno de los sismos de diseño escalados a las máximas aceleraciones de 0.21g, 0.25g y 0.32g. Los valores del módulo de corte y del amortiguamiento para cada sismo al final de 5 iteraciones, considerando una deformación efectiva del 67% de la deformación máxima se presentan en las Tablas (6-3, 6-4 y 6-5). Se aprecia que el módulo de corte disminuye con el nivel de aceleración, mientras que el amortiguamiento aumenta con el nivel de aceleración para un sismo dado. El módulo de corte no lineal al final de las iteraciones es mínimo en la capa 5 para todos los casos y el amortiguamiento es máximo en dicha capa.

El período del suelo aumenta con el valor de la aceleración máxima del registro. El registro de 1974 produce los mayores períodos del suelo. Los valores de los períodos se presentan en las Tablas (6-3, 6-4 y 6-5).

Los esfuerzos de corte promedio actuantes calculados por SHAKE se presentan en la Tabla 6-6. El esfuerzo de corte actuante promedio ha sido tomado como el 65% del esfuerzo de corte máximo. El esfuerzo de corte aumenta con la profundidad y con el nivel de aceleración. Los mayores esfuerzos de corte los produce el registro del 03 de octubre de 1974.

La variación de las aceleraciones máximas con la profundidad se presentan en las Figuras (6-14, -

6-15 y 6-16) para los registros de 1966, 1970 y 1974 respectivamente.

En los casos de los sismos de 1966 y 1970 la máxima aceleración en el perfil estratigráfico se alcanza a los 16.0 metros de profundidad. En el caso del sismo de 1974, la máxima aceleración ocurre en todos los casos en la superficie del terreno. En algunos casos se producen deamplificaciones en capas intermedias.

#### 6.6.4 Licuación de Arenas.

ELECTROPERU (1982) y Alva Hurtado (1982) han presentado el análisis simplificado de licuación para la zona en estudio. No se repetirán aquí dichos cálculos. El resultado de estudio de licuación simplificado indica que ocurrirá el fenómeno de licuación a las profundidades de 8 a 10 metros y de 12 a 17 metros en el área de cimentación de la zona estudiada. Como el nivel de excavación estará a los 15 metros de profundidad se recomendaban las alternativas de densificar el material hasta los 17 metros o de reemplazar el material existente por material compactado que cumpla los requerimientos granulométricos de filtraje para lograr una rápida difusión del incremento de la presión de poros inducida por el sismo.

El análisis de licuación utilizando los resultados del programa SHAKE se presentan en la Figura (6-17). Los esfuerzos cortantes promedio producidos por el sismo de 03 de octubre de 1974 escalado a las aceleraciones máximas de 0.21g, 0.25g. y 0.32g se presentan en dicha figura. Se ha considerado dicho sismo por ser el que produce -

mayores esfuerzos cortantes en el perfil del área estudiada. Los esfuerzos cortantes cíclicos de resistencia con 10 y 20 ciclos uniformes equivalentes se presentan en la Tabla (6-7), que se basa en la Figura (6-7) (Ferrito y Forrest, 1977). Los valores de 10 y 20 ciclos se han determinado de la Figura (6-6) para valores de magnitud de terremotos comprendidos entre 7 y 8. La Figura (6-17) muestra los esfuerzos cortantes cíclicos de resistencia con 10 y 20 ciclos uniformes equivalentes. El valor de 10 ciclos corresponde a una magnitud de 7.0 y un tiempo de exposición de 30 años. El valor de 20 ciclos a una magnitud de 8.0 y un tiempo de exposición de 100 años. Para condiciones de resistencia promedio menos una desviación estandar, se confirma la ocurrencia del fenómeno de licuación hasta una profundidad de 17 metros.

En este análisis se ha supuesto que no existe excavación hasta la cota de cimentación. Existe la justificación de utilizar dicha suposición ya que el esfuerzo transmitido por la cimentación es equivalente a la sobrecarga del terreno.

#### 6.6.5 Amplificación Sísmica.

Con el objeto de ilustrar la amplificación sísmica producida en la zona en estudio, se han calculado los espectros normalizados de aceleraciones absolutas de los sismos de diseño con 5% de amortiguamiento en la base, en el nivel supuesto de cimentación a los 12.3 metros de profundidad y en la superficie. Las Figuras (6-18, 6-19 y 6-20) presentan los espectros normalizados del sismo de diseño del 17 de octubre de 1966, compo

nentes N08<sup>0</sup>E escalado a 0.21g , 0.25g y 0.32 g. respectivamente. Las Figuras (6-21, 6-22 y 6-23) presentan los espectros normalizados del sismo de diseño del 31 de mayo de 1970 y las Figuras (6-24 6-25, 6-26) los espectros normalizados del sismo de diseño del 03 de octubre de 1974.

En las figuras se puede apreciar las diferentes formas de los espectros de respuesta en la superficie y al nivel de cimentación con respecto a - la base. También se puede notar la generación de picos máximos en períodos coincidentes con los períodos del suelo y la máxima amplificación de aceleraciones. Con los valores presentados se puede trazar una curva envolvente al nivel deseado, para ser utilizada en diseño.

La mayor amplificación producida por el sismo de 1966 es en la base y es de 3.3 en el período de 0.10 segs. En la superficie se producen altas - aceleraciones hasta períodos de 0.6 segs. A partir de 0.6 segs. las ordenadas del espectro de respuesta en la superficie y nivel de cimentación son mayores que las del sismo de entrada. La mayor amplificación producida por el sismo de 1970 es en la superficie y en el nivel de cimentación, y es de 3.9 en el **período** 0.7 segs. A partir de 0.7 segs. las ordenadas del espectro de respues- ta en la superficie y el nivel de cimentación son mayores que en la base. La mayor amplifica- ción producida por el sismo de 1974 es en la superficie y el nivel de cimentación, y es de 2.9 en el período de 0.75 seg. A partir de 0.75 segs. se producen amplificaciones con respecto al sis- mo en la base similares a los espectros anterio- res.

## 6.7 Espectros de Respuesta.

Existen diversas metodologías para determinar los espectros de diseño. Una de ellas es realizar el análisis de respuestas dinámica del terreno con tiempos históricos apropiados en la roca, para determinar espectros de respuesta en la superficie. Los espectros normalizados en la superficie pueden ser escalados hasta ser compatibles con los niveles resultantes del riesgo anual elegido del estudio del peligro sísmico.

Considerando que el tiempo esperado de operación de un proyecto sea de 50 años, el cual por experiencia en otros lugares parece ser adecuado, más aún en estos tiempos, que los requerimientos y avances tecnológicos hacen preveer amplificaciones u modificaciones en un futuro cercano. Para este tipo de vida proyectado, se ha determinado que la aceleración máxima del suelo resistente (base) es de 0.25 g y para este valor, se han preparado las envolventes de espectros de aceleraciones.

La Figura 6-27 representa la envolvente de los espectros de aceleraciones para el nivel de cimentación proyectado que involucra los tres sismos usados en este estudio y la Figura 6-28 representa la envolvente de los espectros de aceleraciones para el nivel superficial; en ambas curvas envolventes se dan las máximas amplificaciones en fracciones de la gravedad, g's y se observa la ocurrencia de los picos, como se indicó anteriormente, en concordancia con el período predominante del suelo.

En base al criterio planteado en el "Proyecto de Normas Sismo-resistentes" desarrollado en la Universidad Nacional de Ingeniería, se han elaborado los espectros de diseño, para los niveles en estudio, reduciendo las amplificaciones de las envolventes por el factor de suelo  $s$ , que considera, los efectos de amplificación de la acción sísmica que se producen por características del subsuelo de cimentación. Las normas vigentes consideran los factores de suelo. En este caso para suelos arenosos, tipo III es 1.4, además las normas indican una clasificación de suelo y les asigna períodos de vibración para diferentes tipos de suelo.

La Figura 6-29 muestra el espectro de diseño para el nivel de cimentación y una curva espectral propuesta, cuya ecuación empírica resulta:

$$a_{\text{máx}} = \frac{0.11}{\frac{T}{0.8} - 0.75} \text{ g} \quad , \text{Para } T \geq 0.8 \text{ seg.}$$

$$a_{\text{máx}} = 0.45 \text{ g} \quad , \text{Para } T < 0.8 \text{ seg.}$$

$$\text{con, } a_{\text{máx}} = 0.15 \text{ g}$$

la cual "envuelve" a la curva espectral calculada. En forma análoga, en la Figura 6-30 se indican ambas curvas espectrales, para el nivel de superficie, la curva espectral propuesta resulta la ecuación:

$$a_{\text{máx}} = \frac{0.8}{\frac{T}{0.8} - 0.7} \text{ g} \quad , \text{Para } T \geq 0.8 \text{ seg.}$$

$$a_{\text{máx}} = 0.60 \text{ g} \quad , \text{Para } T < 0.8 \text{ seg.}$$

$$\text{con, } a_{\text{mín}} = 0.20 \text{ g}$$

Estas curvas resumen el estudio de respuesta dinámica del suelo y deberán ser usados en el diseño de las estructuras a proyectarse en la zona de estudio en los niveles indicados.

Para completar el presente estudio se han transformado linealmente los resultados de las respuestas de suelo, considerando un coeficiente de amortiguamiento de 10% a fin de ser comparables con los espectros de diseño que establece el Reglamento Nacional de Construcciones de 1977, en lo referente a las Normas de diseño Sismo-Resistente. Las Figuras 6-31 y 6-32 representan dichas curvas espectrales las cuales con el 10% de amortiguamiento, las curvas espectrales de diseño propuestas y las de diseño vigentes en las normas, cuya ecuación es dada como un coeficiente sísmico.

$$c = \frac{0.8}{\frac{T}{T_s} + 1.0}, \quad c = \frac{0.8}{\frac{T}{0.8} + 1.0} \quad , \text{Para } T \geq 0.8 \text{ seg.}$$

$$\text{con, } c_{\text{máx}} = 0.4 \quad , \text{Para } T < 0.8 \text{ seg.}$$

$$\text{y } c_{\text{mín}} = 0.16$$

Para evaluar la fuerza sísmica o corte basal sobre cada estructura, se deberá emplear la expresión.

$$H = \frac{USCP}{R_d}$$

Siendo P el peso de la estructura más una fracción de la sobrecarga según lo indicado en el Reglamento Nacional de Construcciones o criterios semejantes.  $R_d$  depende del tipo de estructura y de las decisiones del diseñador, para disminuir el nivel de daño aceptable en tipos de estructuras propias de una obra importante.

La estimación de  $T_s$  (en expresiones de S y C) deben ser realizadas a la luz de estudios apropiados del suelo.

## 6.8 Discusión de los Resultados.

Este Capítulo ha presentado el Estudio de Sitio - del área en estudio en la zona de Piura y que consistió en el análisis de licuación de suelos y amplificación sísmica, utilizando metodologías simplificadas y una metodología analítica de propagación vertical de las ondas de corte.

Se ha utilizado información geotécnica proporcionada por ELECTROPERU en una localización particular. No existen resultados de ensayos dinámicos de laboratorio de las muestras del suelo ni mediciones de la velocidad de las ondas de corte en los suelos por lo que dichos parámetros han sido asumidos. Se recomienda en el futuro realizar - dichos ensayos para verificar los valores asumidos.

No se cuenta con registros sísmicos de aceleraciones en el Perú para lugares fuera de Lima. Se han utilizado tres sismos registrados en Lima, escalados en sus valores de aceleración máxima a los resultados del estudio del peligro sísmico realizado previamente.

El análisis de licuación de suelos por el método ana lítico presentado en este capítulo confirma los re - sultados obtenidos por los métodos simplificados de licuación de suelos, los que indican licuación hasta una profundidad de 17 metros, por lo que sería reco - mendable mejorar las condiciones del terreno de los 15 a 17 metros o sustituir el material arenoso por grava para la cimentación de las estructuras.

El perfil estratigráfico del área en estudio ha pro - ducido amplificaciones sísmicas y ha modificado la forma del espectro de respuesta. Se han presentado espectros de respuestas normalizados a tres niveles de profundidad que pueden ser utilizados en un dise ño antisísmico.

Es recomendable la utilización de los espectros cal culados en el diseño sismo-resistente de las estruc turas localizadas en el área en estudio.

TABLA - 6-1

CALCULO DE PENETRACION Y DENSIDAD RELATIVA

Profundidad (mts.)	$\sigma_0 = \gamma h$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_{vo}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\bar{\sigma}_{vo}$ (K.s.f.)	N	$C_N$	$N_1$	$N_B$	$D_R$ (%)
1.45	0.247	0.247	0.50	13	1.76	22.9	26	57
2.45	0.417	0.417	0.86	17	1.47	25.1	25	56
3.45	0.587	0.587	1.20	27	1.29	34.8	32	63
4.45	0.757	0.757	1.55	21	1.15	24.2	23	54
5.45	0.927	0.857	1.75	35	1.08	37.9	38	69
6.45	1.157	0.957	1.96	30	1.02	30.7	32	63
7.45	1.357	1.057	2.16	30	0.97	29.1	32	63
8.45	1.557	1.157	2.36	24	0.92	22.1	25	56
9.45	1.757	1.257	2.57	23	0.88	20.1	24	54
10.45	1.957	1.357	2.77	34	0.83	28.4	34	66
11.45	2.157	1.457	2.97	41	0.80	32.6	41	72
12.45	2.357	1.557	3.18	23	0.76	17.5	23	53
13.45	2.557	1.657	3.38	26	0.73	18.9	25	56
14.45	2.757	1.757	3.59	19	0.69	13.2	18	48
15.45	2.957	1.857	3.79	16	0.66	10.7	15	44
16.45	3.157	1.957	3.99	30	0.64	19.1	28	59
17.45	3.357	2.057	4.20	71	0.61	43.2	66	91
18.45	3.557	2.157	4.40	41	0.58	23.9	30	69
19.45	3.757	2.257	4.60	36	0.56	20.1	33	64
20.45	3.957	2.357	4.81	80	0.53	42.8	72	95
21.45	4.157	2.457	5.01	100	0.51	51.2	89	105
22.30	4.327	2.542	5.17	30	0.49	14.8	26	57
23.25	4.517	2.637	5.38	80	0.47	37.9	70	93
24.45	4.757	2.757	5.62	82	0.45	36.9	70	94
25.45	4.957	2.857	5.83	81	0.43	34.8	69	93

$$C_N = 1 - 1.25 \log \bar{\sigma}_{vo} \quad N_B = \frac{4N}{(1 + 2 \bar{\sigma}_{vo})}$$

$$N_1 = C_N N \text{ (SPT)} \quad N_B = \frac{4N}{(3.25 + 0.25 \bar{\sigma}_{vo})}$$

$$D_R = \frac{N_B}{80}$$

$\bar{\sigma}_{vo} \leq 1.5 \text{ Ksf}$

$\bar{\sigma}_{vo} > 1.5 \text{ Ksf}$

(Seed, Mori y Chan, 1975)

(Pock y Bazarna, 1969)

TABLA - 6 - - 2

CLASIFICACION SE SUELOS, ZONA EN ESTUDIO

Sondaje	SCM	PCM	PCM	SCM-1 Alter.Inalt.	SCM-1 Inalt.	SCM-2 Inalt.	SCM-2 Inalt.	SCM-2 Alter.	SCM-2 Alter.	SCM-2 Alter.	SCM-A Alter.	SCM-B Alter.							
Muestra	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M2	M5	M-1	M-2	M-1	M-1	M-3	M-10	M-1	M-1	M-1	
profundidad (mts.)	1.50- 2.50	2.50- 4.40	4.40- 6.00	6.00- 6.65	6.65- 9.00	9.00- 9.60	9.60- 12.00	1.60- 3.00	6.00- 6.70	2.70- 5.60	9.20- 9.56	15.11- 15.61	17.33- 17.68	5.00- 7.50	38.40- 38.80	12.60- 16.00	15.00- 18.00		
SUCS	SP-SM	SP	SP	SP-SM	SP	SP-SM	SP-SM	SP	SP-SM	SM	SM	SM	SM	SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	
Cu=D60/D10	1.90	1.64	1.82	2.20	2.10	2.30	2.10	1.88	2.06	2.57	2.55	2.91	2.50	2.83	2.57	2.00	2.25		
Cc= $\frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$	0.89	0.99	0.89	0.89	0.92	0.98	1.06	0.83	0.92	1.24	1.05	1.14	1.11	1.41	1.45	0.89	0.04		
% No.200	5.2	3.0	1.9	5.2	3.2	11.7	5.6	3.7	5.2	12.3	23.8	18.7	18.8	13.3	5.3	7.8	13.1		
D50 (mm)	0.17	0.17	0.18	0.19	0.14	0.14	0.15	0.13	0.14	0.16	0.13	0.14	0.14	0.15	0.32	0.15	0.15		

TABLA 6-3

PARAMETROS NO LINEALES FINALES SISMO 17-10-66 COMPONENTE NO8°E

Capa	Prof: mts:	$a_{mx} = 0.21g$		$a_{mx} = 0.25g$		$a_{mx} = 0.32g$	
		G(Kg/cm <sup>2</sup> )	$\beta$	G(Kg/cm <sup>2</sup> )	$\beta$	G(Kg/cm <sup>2</sup> )	$\beta$
1	1.50	881.2	0.038	854.3	0.039	804.7	0.042
2	3.65	359.0	0.087	336.5	0.094	307.3	0.102
3	5.85	427.2	0.096	398.7	0.102	370.4	0.110
4	9.85	359.6	0.122	339.7	0.127	308.0	0.135
5	14.35	273.2	0.140	248.9	0.146	214.6	0.163
6	17.35	625.1	0.107	580.4	0.115	526.3	0.124
7	21.45	726.7	0.101	681.5	0.107	622.9	0.117
8	28.30	1059.8	0.090	931.4	0.102	829.6	0.114
Ts (secs)			0.65		0.68		0.72

TABLA 6- 4

PARAMETROS NO LINEALES FINALES SISMO 31-05-70 COMPONENTE L

Capa	Prof. mts.	$a_{mx} = 0.21g$	$a_{mx} = 0.25g$	$a_{mx} = 0.32g$
		G(Kg/cm <sup>2</sup> )	G(Kg/cm <sup>2</sup> )	G(Kg/cm <sup>2</sup> )
		$\beta$	$\beta$	$\beta$
1	1.50	853.5	842.0	794.3
2	3.65	335.1	303.4	276.2
3	5.85	394.0	364.8	318.5
4	9.85	380.3	323.3	256.6
5	14.35	293.8	227.0	190.6
6	17.35	618.1	538.5	462.7
7	21.45	654.8	564.5	489.4
8	28.30	883.8	777.0	713.1
Ts (segs)		0.67	0.73	0.79

TADLA - 6-5

PARAMETROS NO LINEALES FINALES SISMO 03-10-74 COMPONENTE N82°W

Capa	Prof. mts.	$a_{mx} = 0.21g$		$a_{mx} = 0.25g$		$a_{mx} = 0.32g$	
		G(Kg/cm <sup>2</sup> )	$\beta$	G(Kg/cm <sup>2</sup> )	$\beta$	G(Kg/cm <sup>2</sup> )	$\beta$
1	1.50	811.6	0.041	791.2	0.041	731.6	0.045
2	3.65	295.9	0.106	273.3	0.114	239.4	0.127
3	5.85	338.6	0.119	304.4	0.129	258.7	0.142
4	9.85	274.3	0.144	237.5	0.157	211.9	0.172
5	14.35	201.1	0.171	175.9	0.186	145.6	0.204
6	17.35	457.7	0.136	401.6	0.146	349.8	0.161
7	21.45	468.2	0.141	416.9	0.149	384.0	0.160
8	28.30	729.1	0.126	718.3	0.128	628.7	0.139
Ts (secs)			0.76		0.80		0.84

TABLA - 6 - 6

ESFUERZOS DE CORTE ACTUANTES - METODO ANALITICO

$$\tau_{ap} = 0.65 \tau_{a \max} \text{ (KGS/cm}^2\text{)}$$

Capa	Prof. mts.	N	Sismo 17-10-66			Sismo 31-05-70			Sismo 03-10-74		
			0.21g	0.25g	0.32g	0.21g	0.25g	0.32g	0.21g	0.25g	0.32g
1	1.50	15	0.034	0.037	0.042	0.037	0.039	0.045	0.042	0.046	0.054
2	3.65	20	0.077	0.084	0.093	0.084	0.094	0.110	0.100	0.112	0.133
3	5.85	25	0.113	0.121	0.137	0.125	0.140	0.168	0.158	0.177	0.207
4	9.85	30	0.182	0.194	0.214	0.166	0.203	0.245	0.235	0.266	0.302
5	14.35	21	0.210	0.226	0.266	0.199	0.250	0.298	0.287	0.321	0.365
6	17.35	50	0.215	0.239	0.272	0.222	0.271	0.315	0.323	0.356	0.407
7	21.45	45	0.207	0.225	0.259	0.255	0.308	0.351	0.368	0.395	0.433
8	28.30	60	0.237	0.281	0.334	0.318	0.368	0.403	0.382	0.396	0.453

TABLA - 6 - 7

ESFUERZO CORTANTE CICLICO DE RESISTENCIA (Ferrito y Forrest, 1977)

$\tau_r$  (Kg/cm<sup>2</sup>)

Profundidad mts.	$\sigma_{vo}$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	DR %	10 Ciclos			20 Ciclos		
			- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$	- $\sigma$	Prom.	+ $\sigma$
1.45	0.25	57	0.05	0.07	0.10	0.05	0.06	0.09
2.45	0.42	56	0.09	0.12	0.16	0.07	0.11	0.14
3.45	0.59	63	0.14	0.19	0.25	0.12	0.17	0.22
4.45	0.76	54	0.16	0.21	0.28	0.14	0.18	0.25
5.45	0.86	69	0.23	0.30	0.40	0.20	0.27	0.36
6.45	0.96	63	0.34	0.30	0.41	0.20	0.27	0.36
7.45	1.06	63	0.25	0.33	0.45	0.22	0.30	0.40
8.45	1.16	56	0.25	0.33	0.44	0.21	0.29	0.39
9.45	1.26	54	0.26	0.34	0.46	0.22	0.31	0.41
10.45	1.36	66	0.34	0.45	0.60	0.30	0.40	0.54
11.45	1.46	72	0.40	0.53	0.70	0.35	0.47	0.63
12.45	1.56	53	0.31	0.41	0.55	0.27	0.37	0.50
13.45	1.66	56	0.35	0.47	0.62	0.31	0.42	0.56
14.45	1.76	48	0.32	0.42	0.57	0.28	0.38	0.51
15.45	1.86	44	0.31	0.41	0.55	0.27	0.37	0.49
16.45	1.96	59	0.44	0.58	0.77	0.38	0.52	0.69
17.45	2.06	91	0.71	0.94	1.26	0.62	0.84	1.12
18.45	2.16	69	0.57	0.75	1.00	0.49	0.67	0.89
19.45	2.26	64	0.55	0.72	0.97	0.48	0.65	0.87
20.45	2.36	95	0.85	1.12	1.50	0.74	1.01	1.35
21.45	2.46	105	0.98	1.29	1.73	0.85	1.16	1.53
22.30	2.56	57	0.55	0.72	0.97	0.48	0.65	0.87
23.25	2.64	93	0.93	1.23	1.64	0.81	1.10	1.47
24.45	2.76	94	0.99	1.30	1.74	0.86	1.17	1.56
25.45	2.86	93	1.01	1.33	1.78	0.88	1.20	1.60

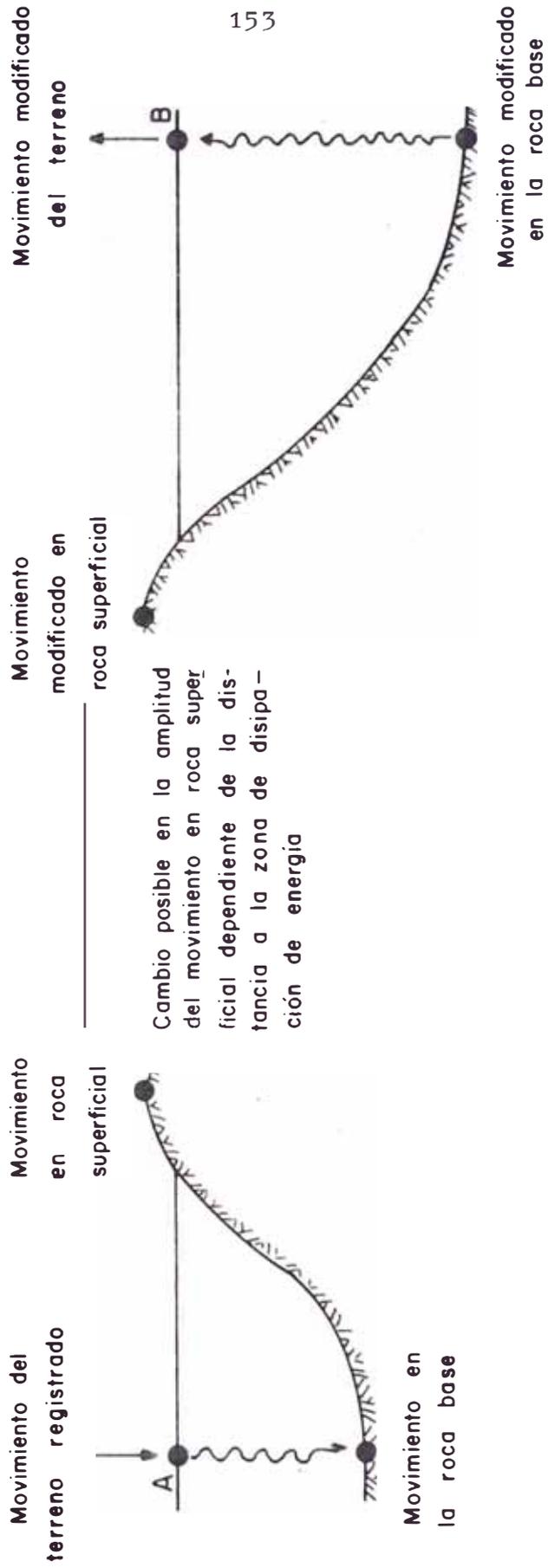


FIG. 6-1 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL PROCEDIMIENTO DE CALCULO DE LOS EFECTOS DE LAS CONDICIONES LOCALES DEL SUELO EN EL MOVIMIENTO DEL TERRENO

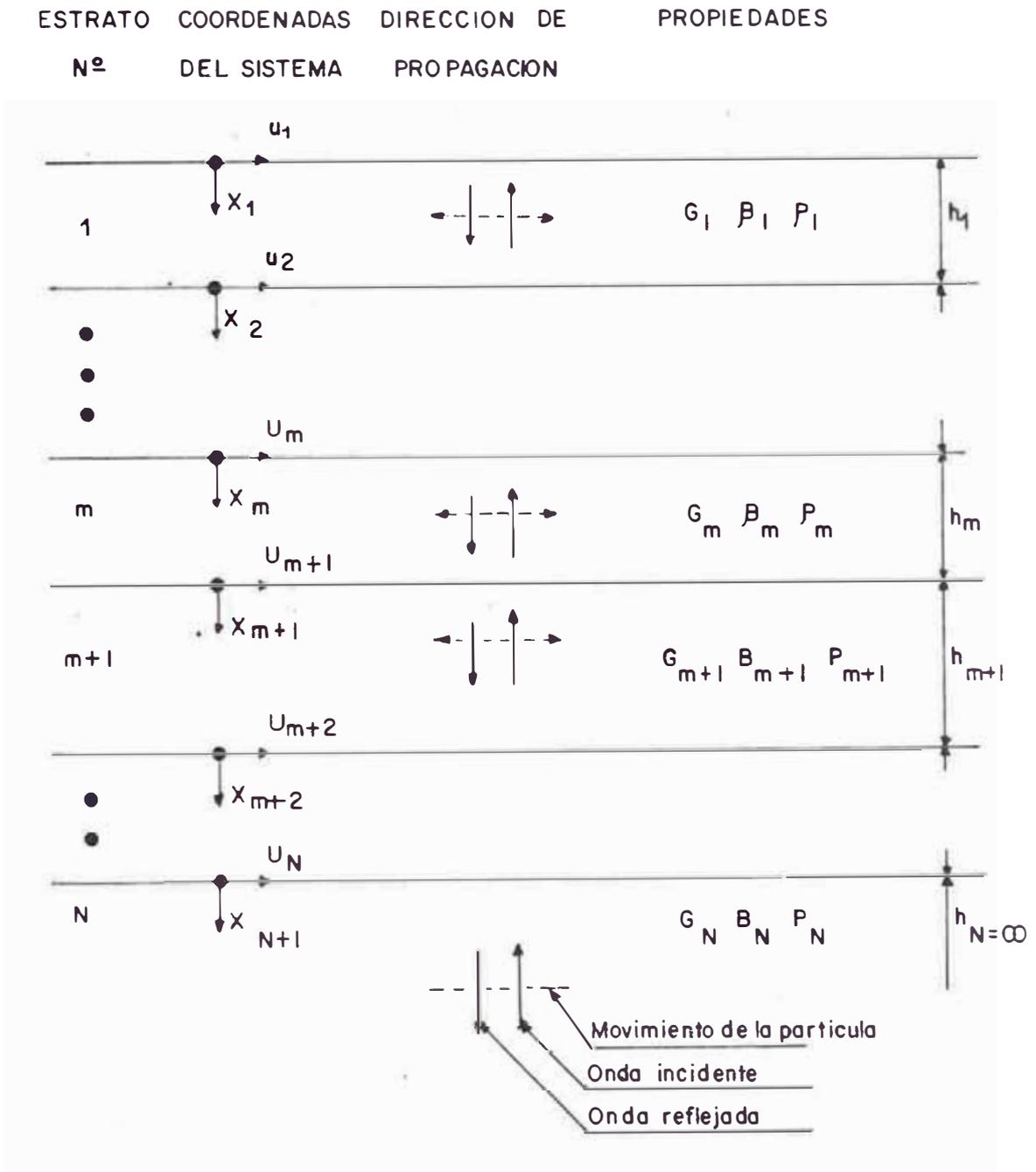


FIG. 6 - 2 SISTEMA UNIDIMENSIONAL

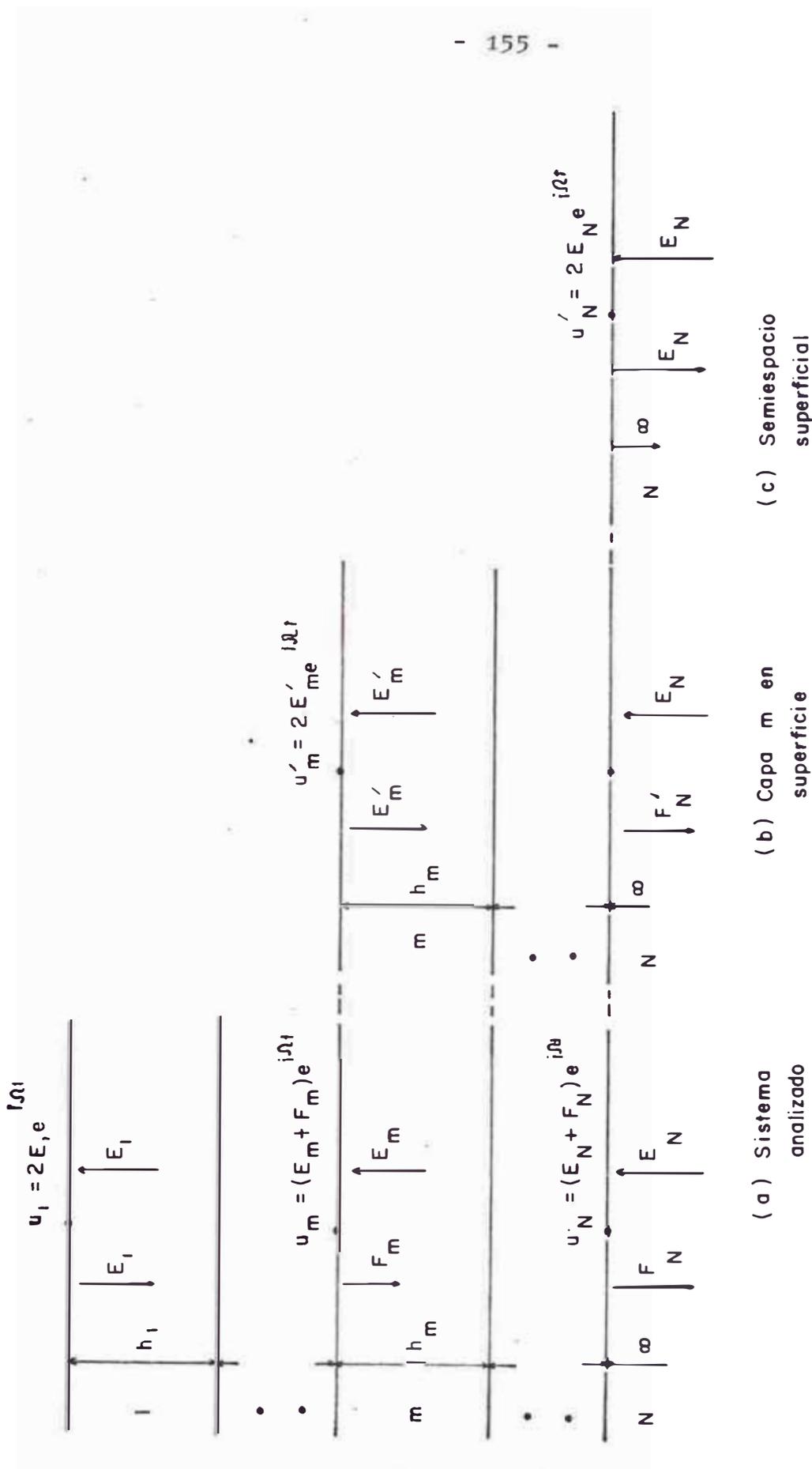


FIG. 6-3 SISTEMA UNIDIMENSIONAL CON CAPAS EN SUPERFICIE

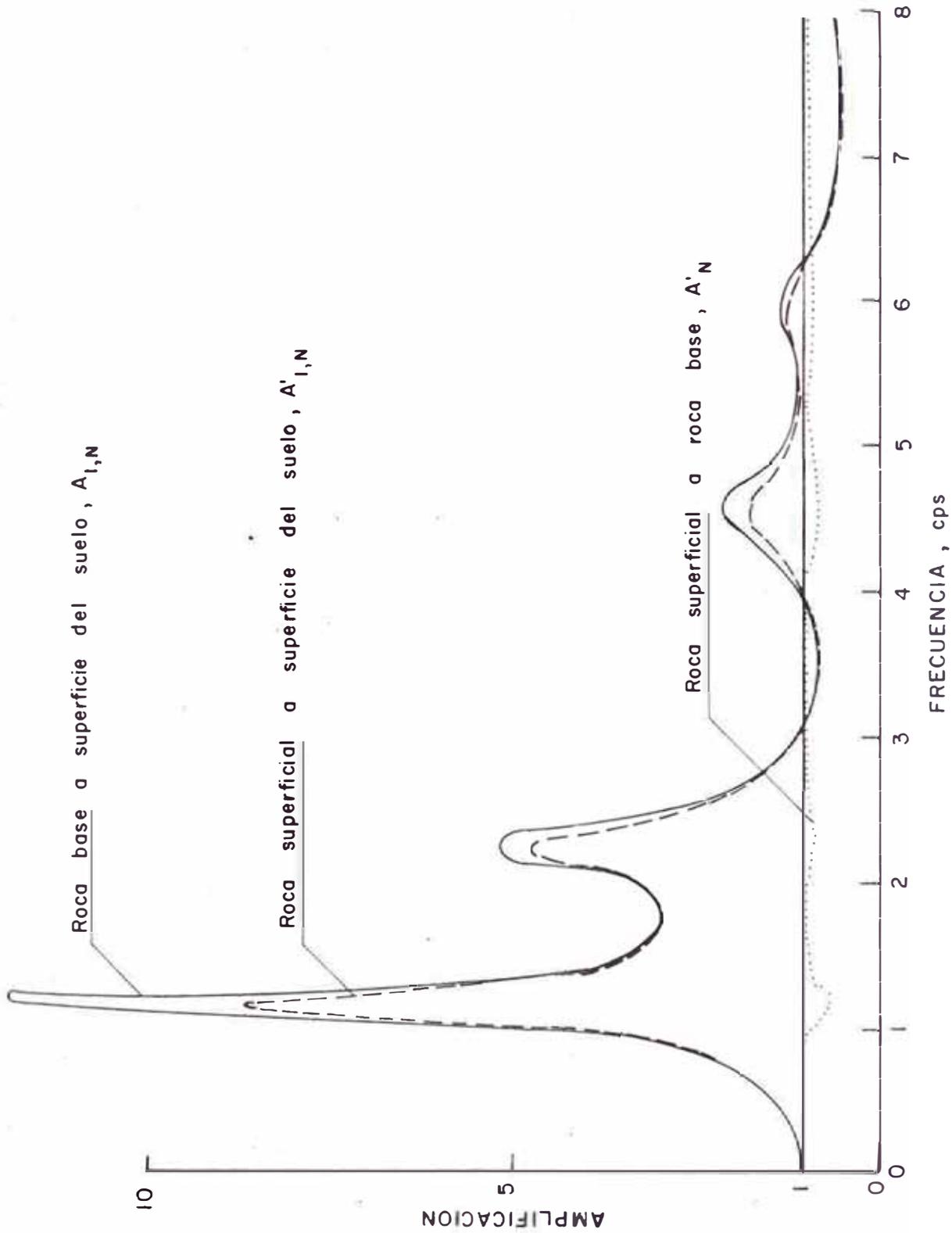


FIG. 6-4 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

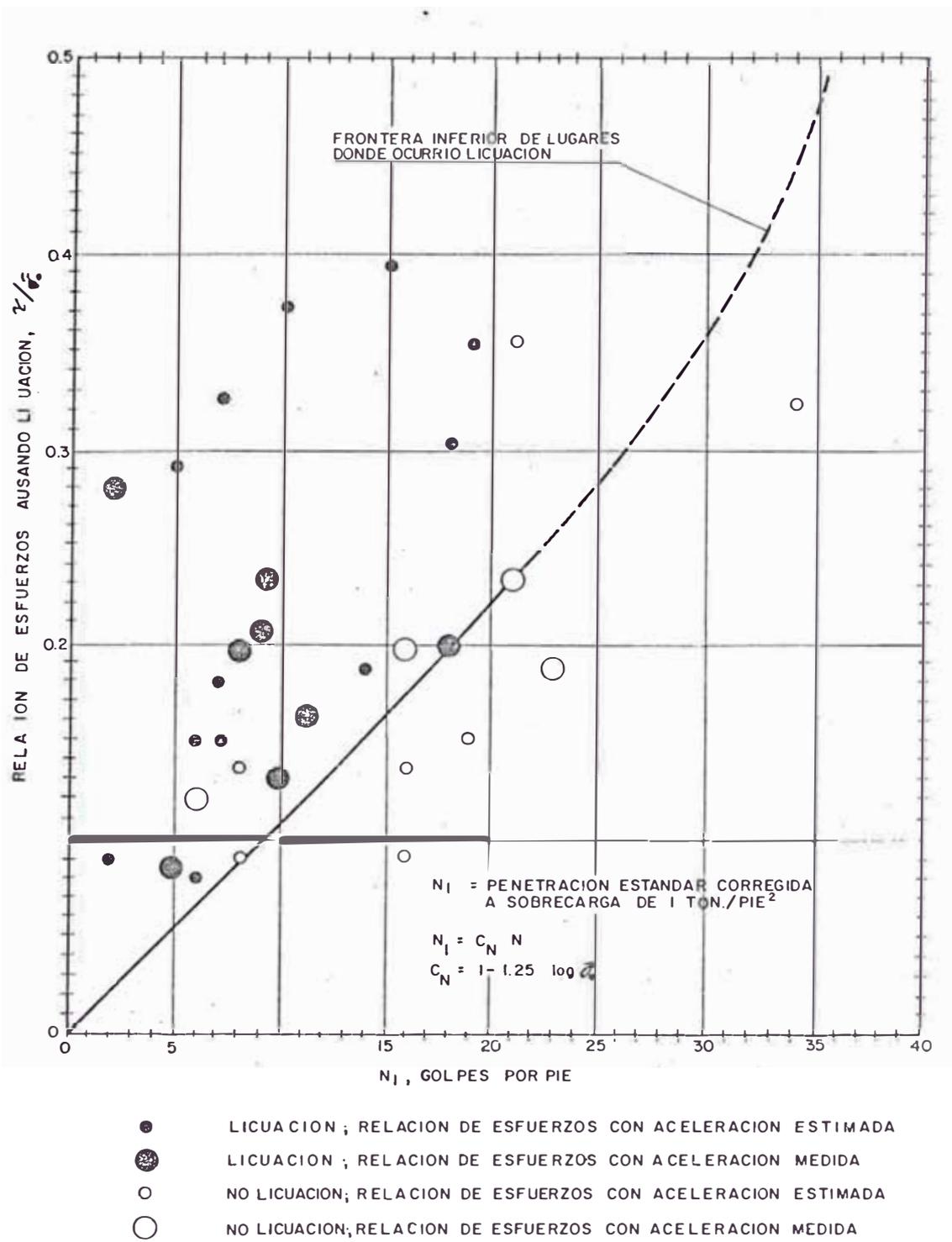


FIG. 6-5 METODO SIMPLIFICADO BASADO EN TERREMOTOS PASADOS

( Seed, Mori y Chon , 1975)

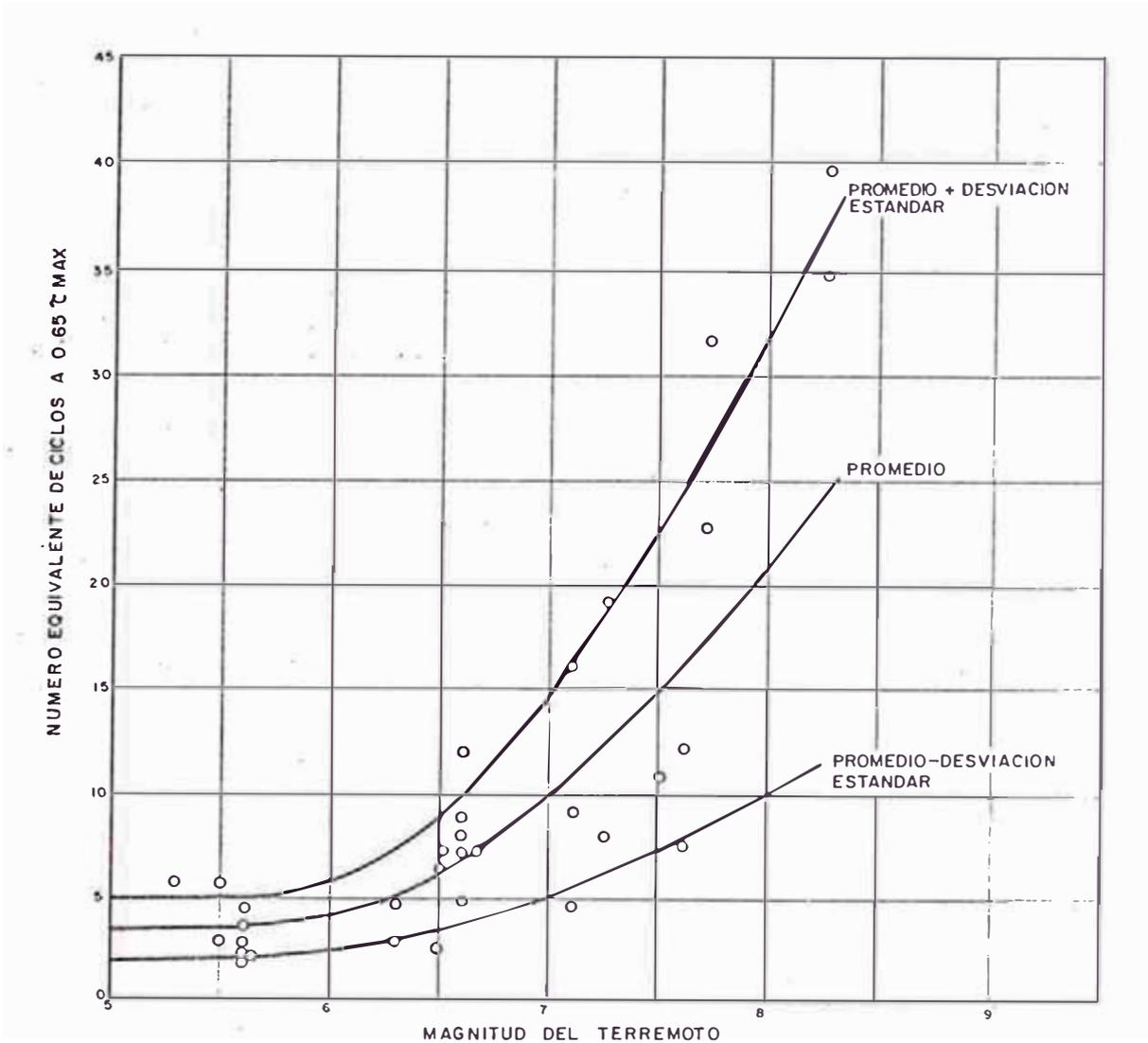


FIG.6-6 NUMERO EQUIVALENTE DE CICLOS CON MAGNITUD

(Seed, Idriss, Makdisi y Bonerjee, 1975)

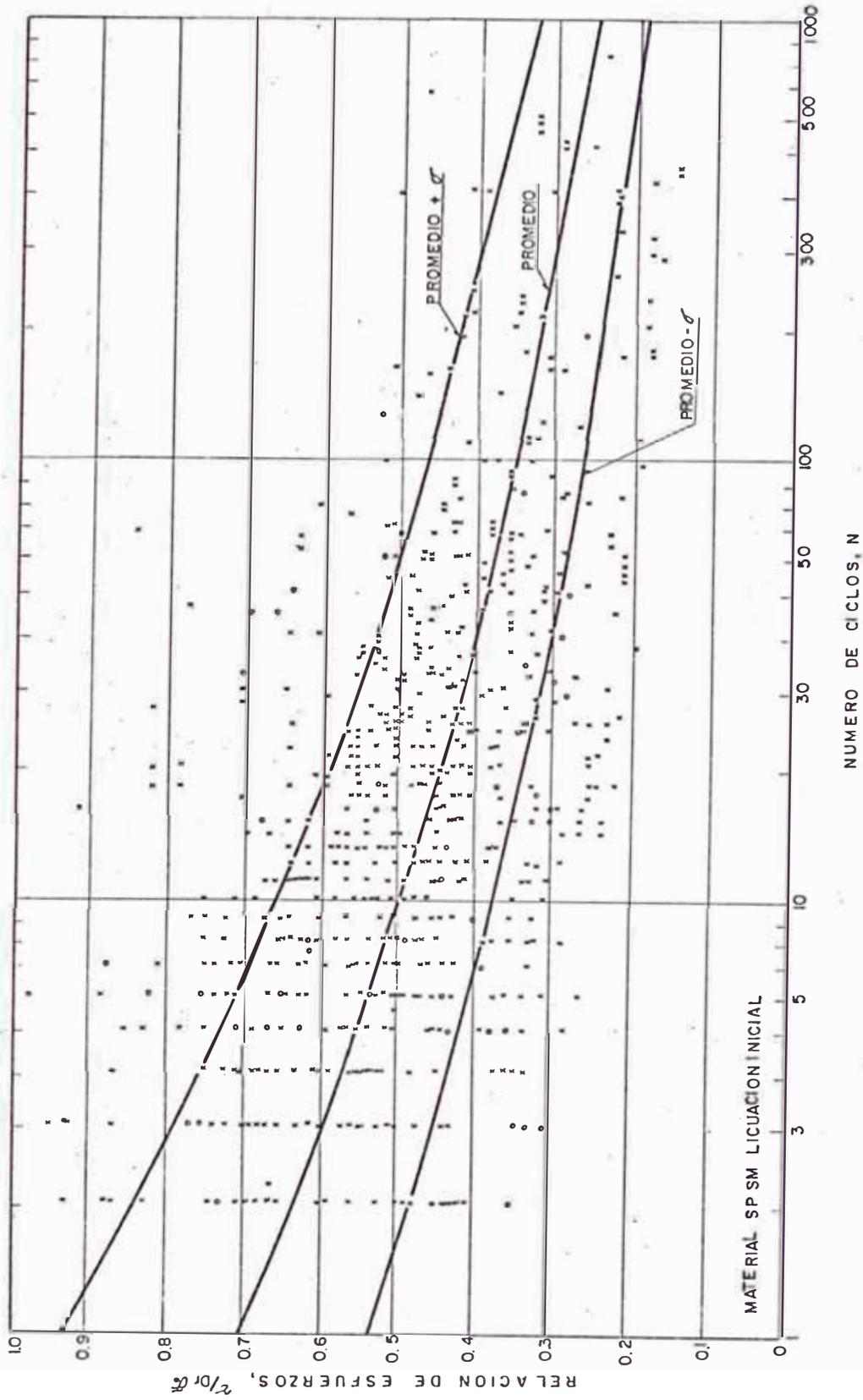


FIG. 6-7 RELACION DE ESFUERZOS PARA LA LICUACION INICIAL (Ferrillo y Forrest, 1977)

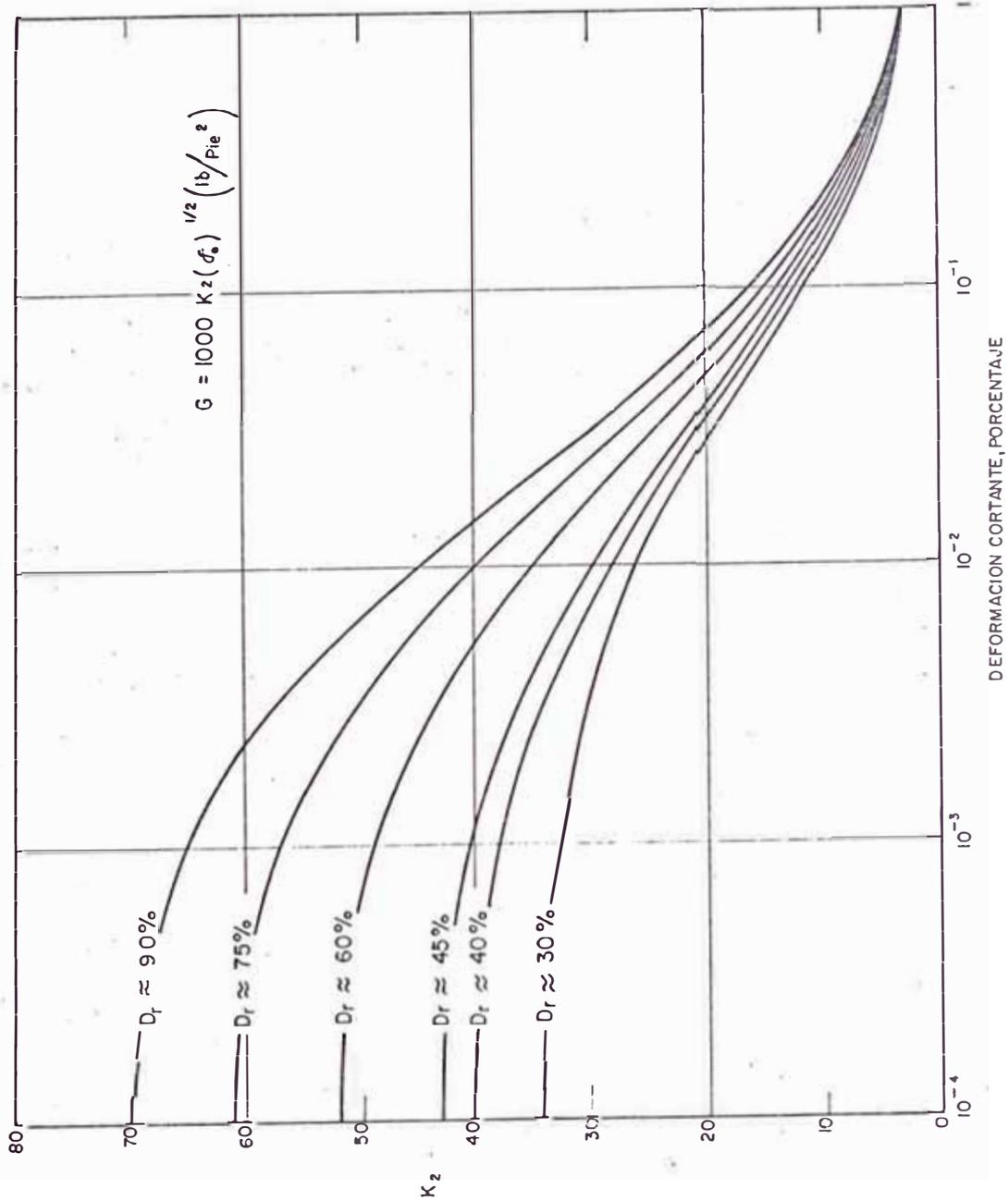


FIG. 6 -8 MODULOS CORTANTES PARA ARENAS (Seed e Idriss, 1970)

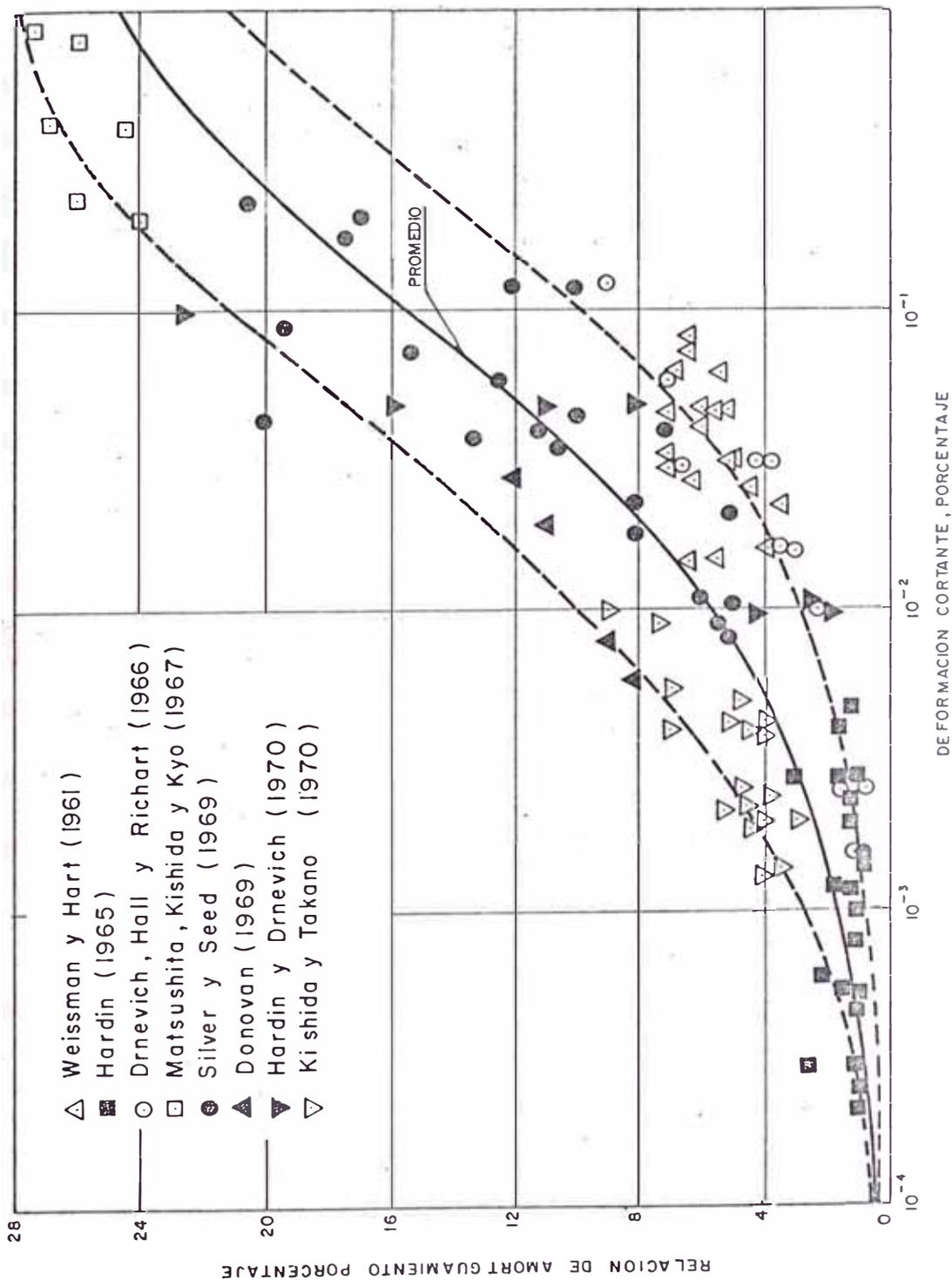
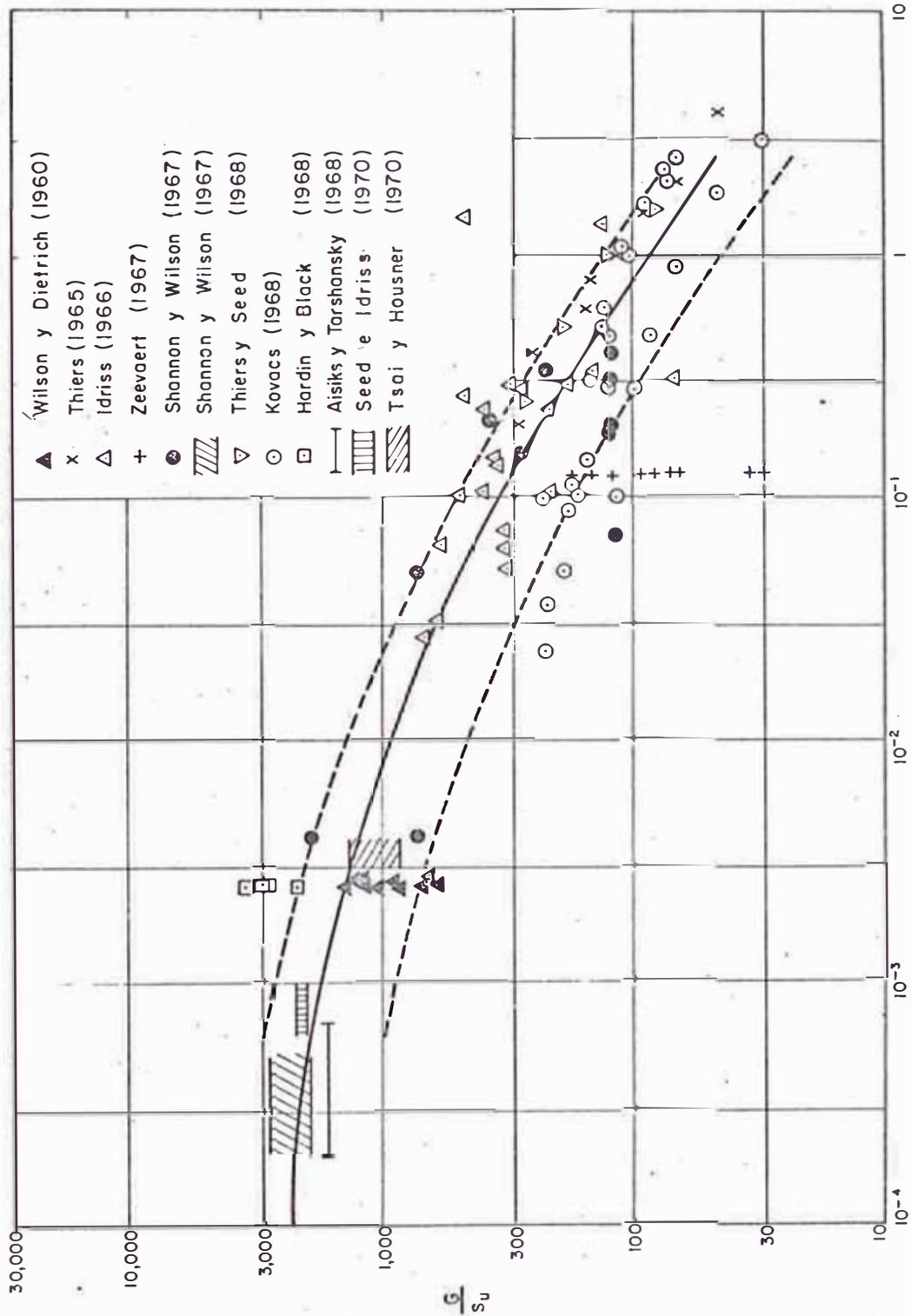


FIG. 6-9 RELACIONES DE AMORTIGUAMIENTO PARA ARENAS (Seed e Idriss, 1970)



DEFORMACION CORTANTE, PORCENTAJE

FIG. 6-10 MODULOS CORTANTES IN-SITU PARA ARCILLAS SATURADAS (Seed e Idriss, 1970)

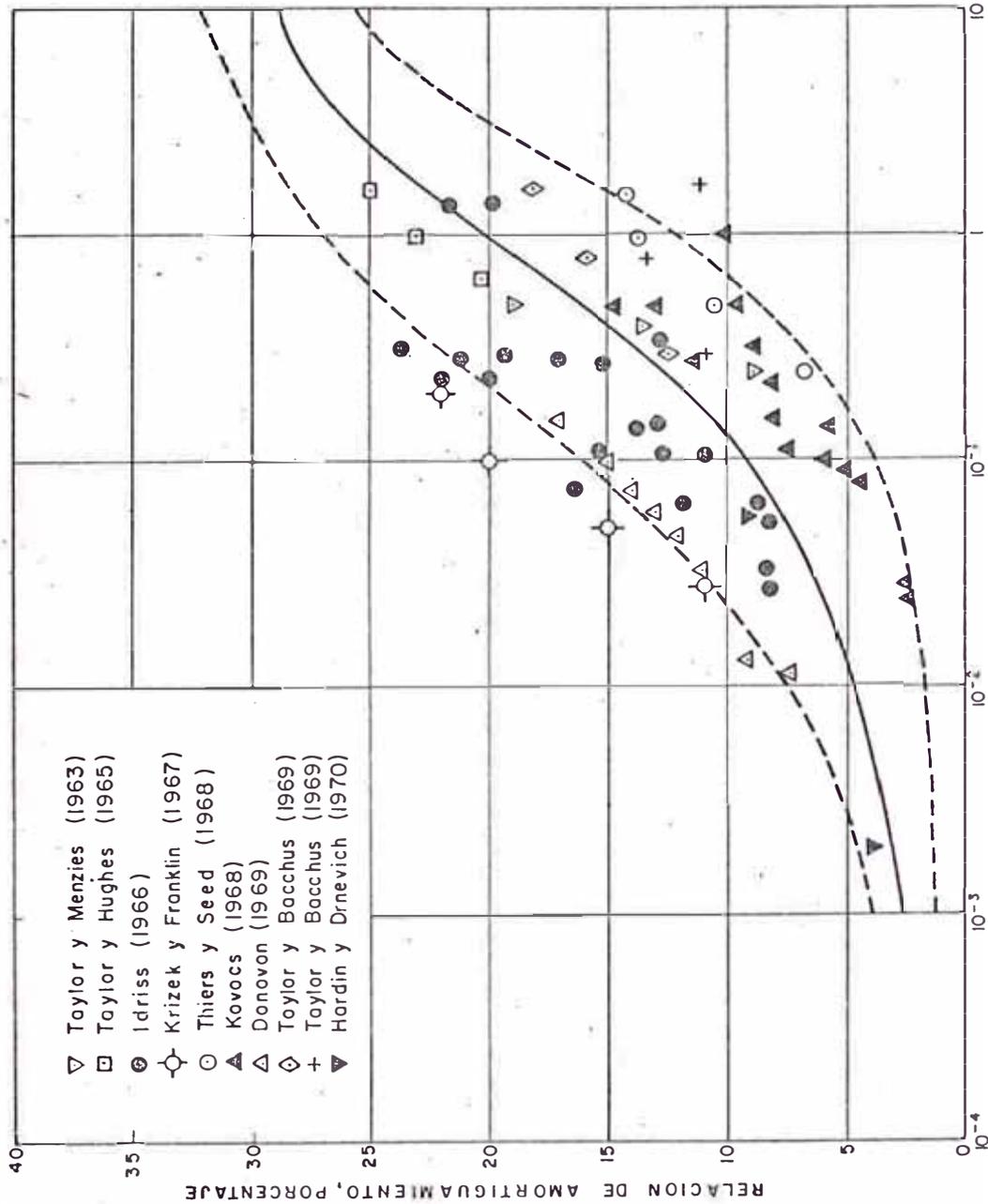
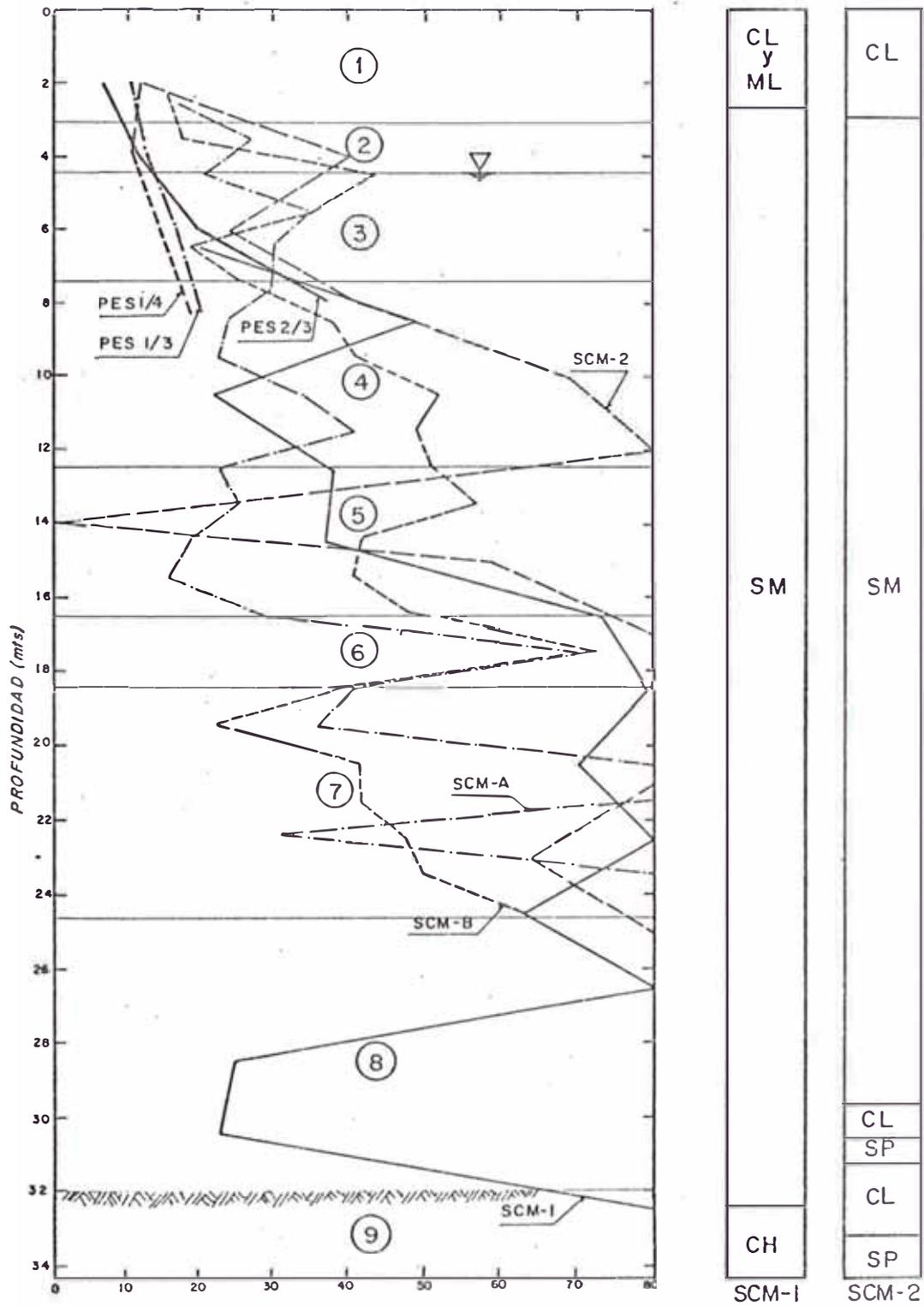


FIG. 6-11 RELACIONES DE AMORTIGUAMIENTO PARA ARCILLAS SATURADAS (Seed e Idriss, 1970)

FIG. 6-12 PENETRACION ESTANDAR ZONA EN ESTUDIO



PENETRACION ESTANDAR , GOLPES / PIE (Alva Hurtado, 1982)

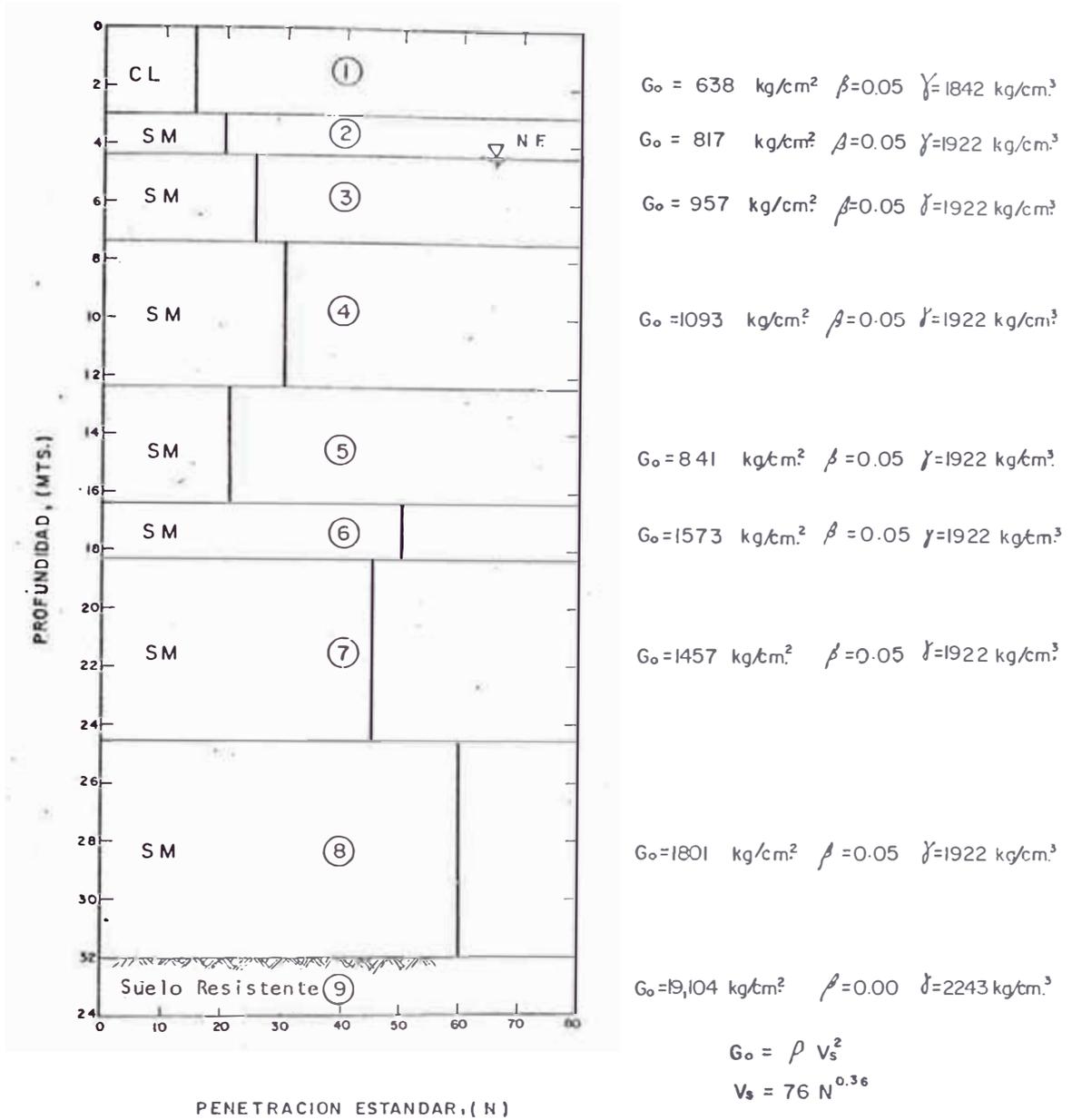


FIG. 6-13 PERFIL DE SUELO CURUMUY Y PARAMETROS INICIALES DE CALCULO

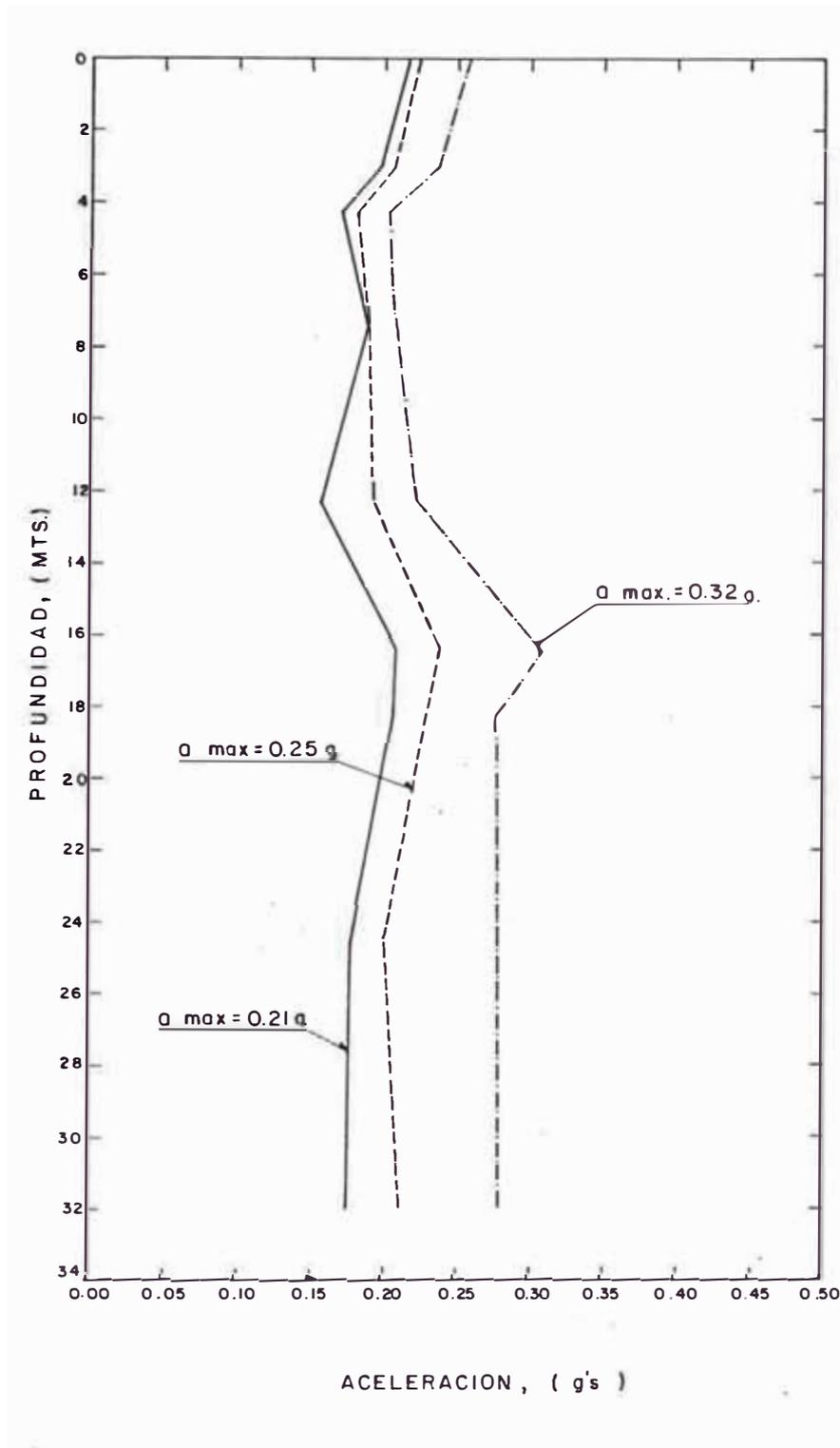


FIG. 6-14 VARIACION DE MAXIMAS ACELERACIONES CON PROFUNDIDAD  
SISMO 17-10-66 COMPONENTE N O B E

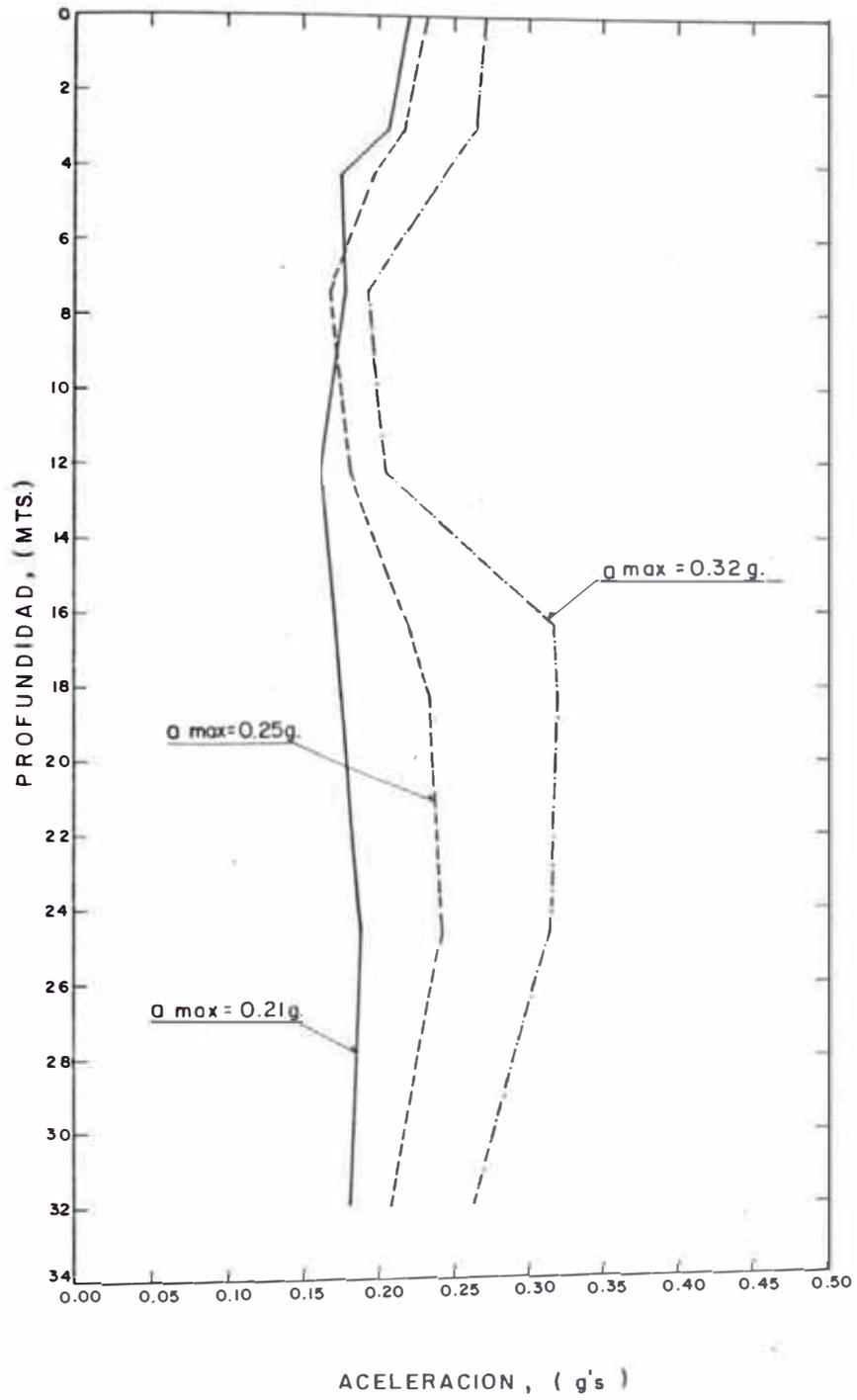


FIG. 6-15 VARIACION DE MAXIMAS ACELERACIONES CON PROFUNDIDAD SISMO 31-05-70 COMPONENTE L

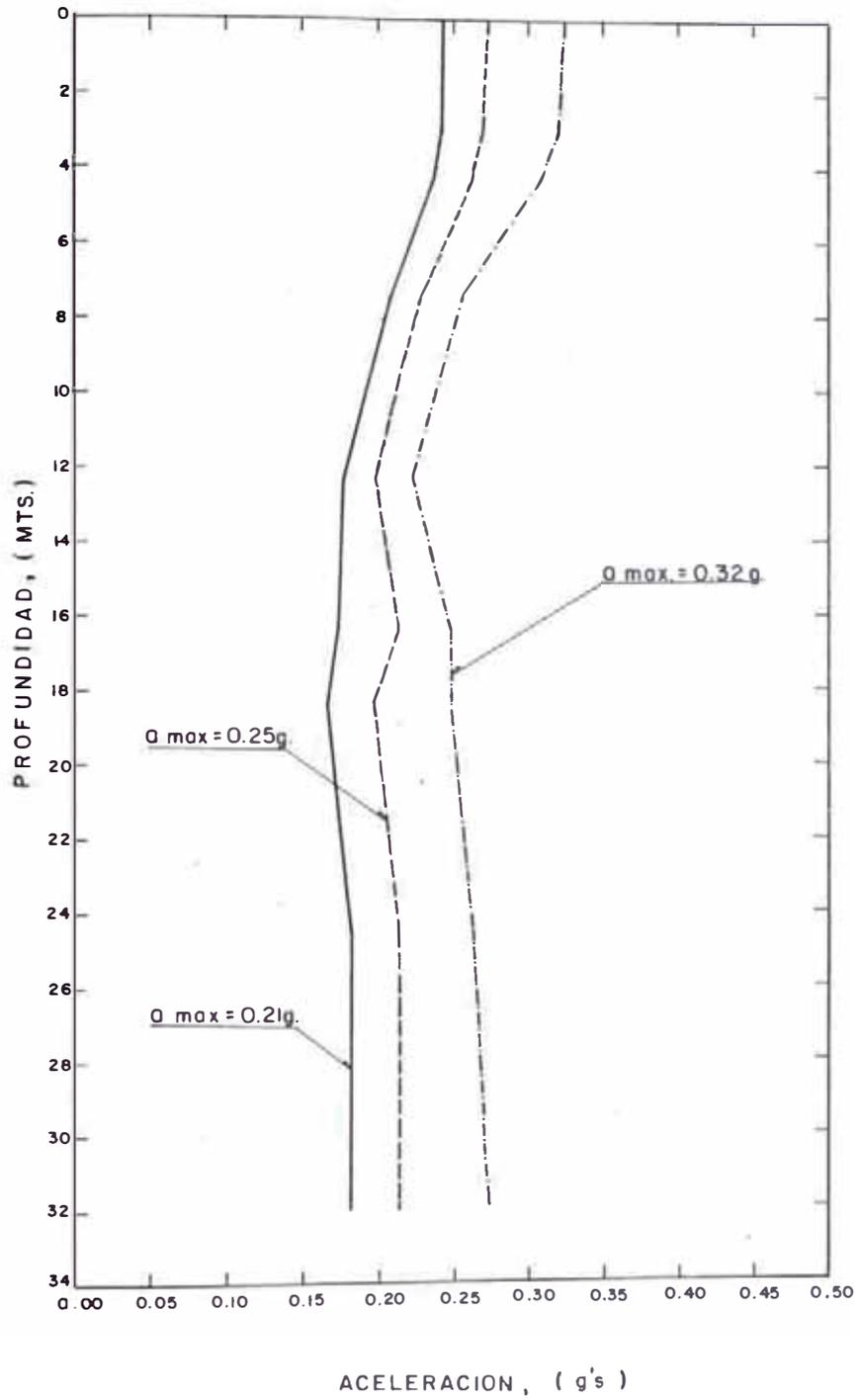


FIG. 6-16 VARIACION DE MAXIMAS ACELERACIONES CON PROFUNDIDAD  
SISMO 03-10-74 COMPONENTE N82 W

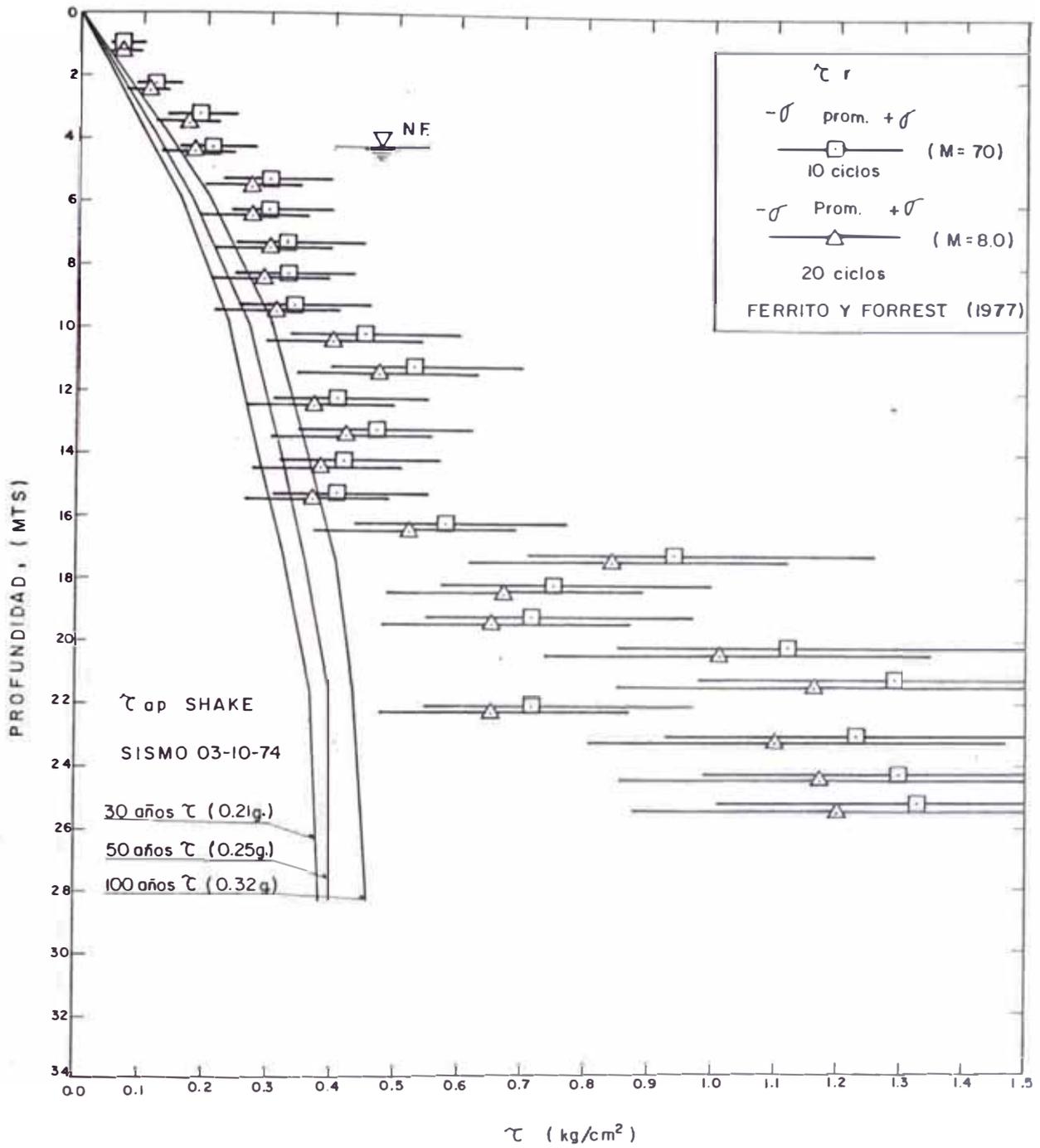
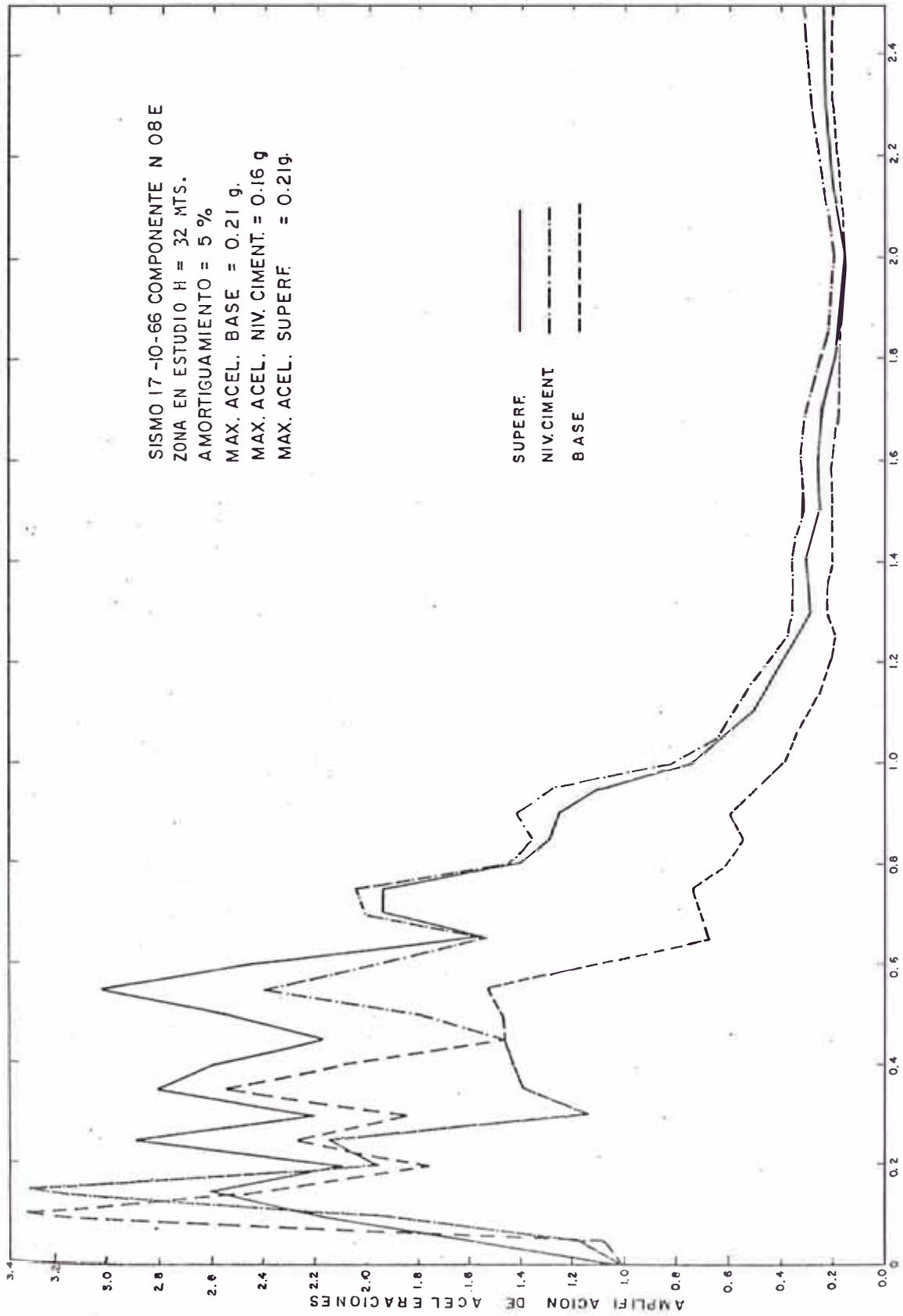


FIG. 6-17 ANÁLISIS DE LICUACIÓN



PERIODO, (SEGS)

FIG. 6-18 ESPECTROS NORMALIZADOS DE ACCELERACIONES,  $a_{max.} = 0.21 g$ .

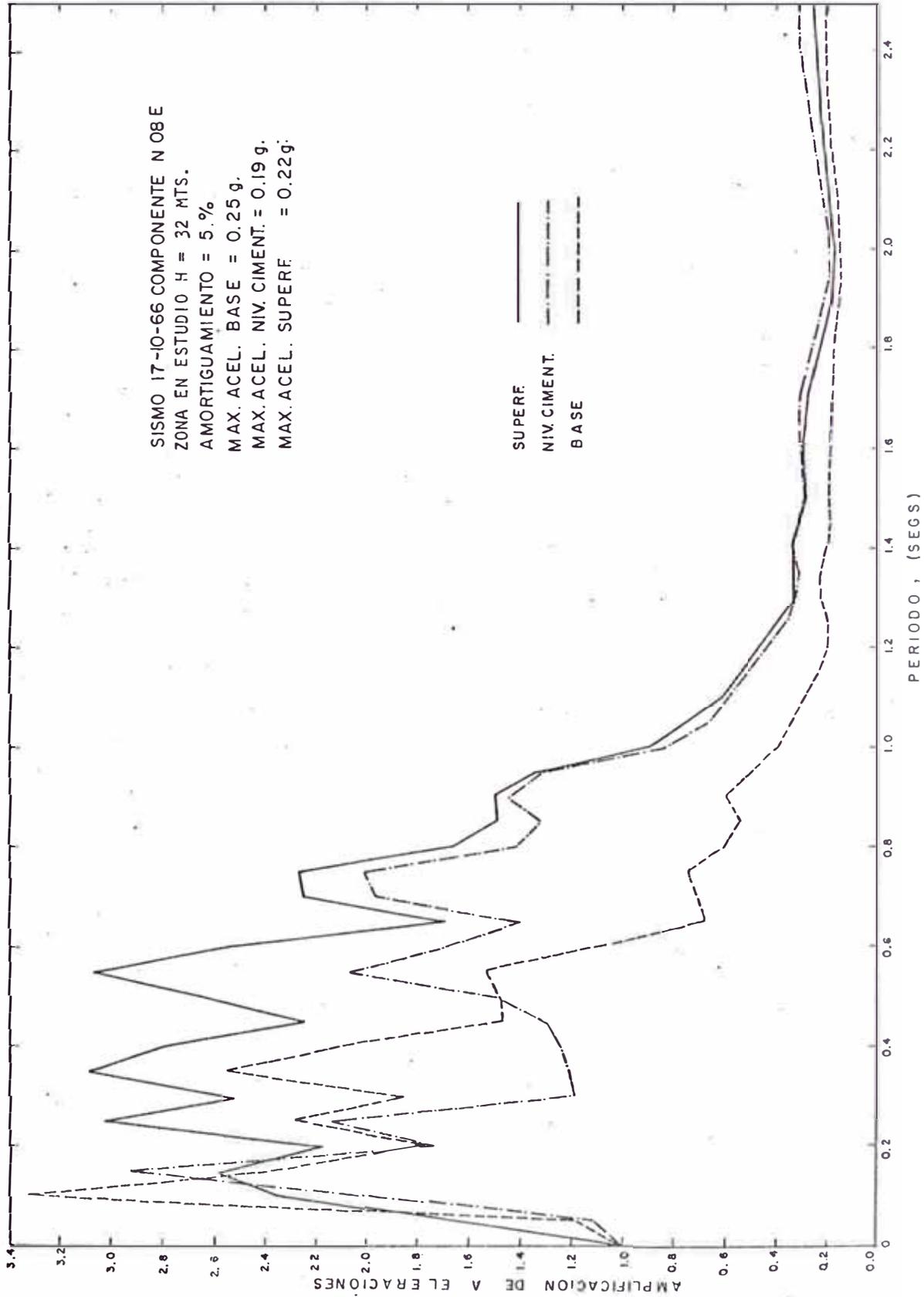


FIG. 6-19 ESPECTROS NORMALIZADOS DE ACELERACIONES,  $\sigma_{max} = 0.25 g$

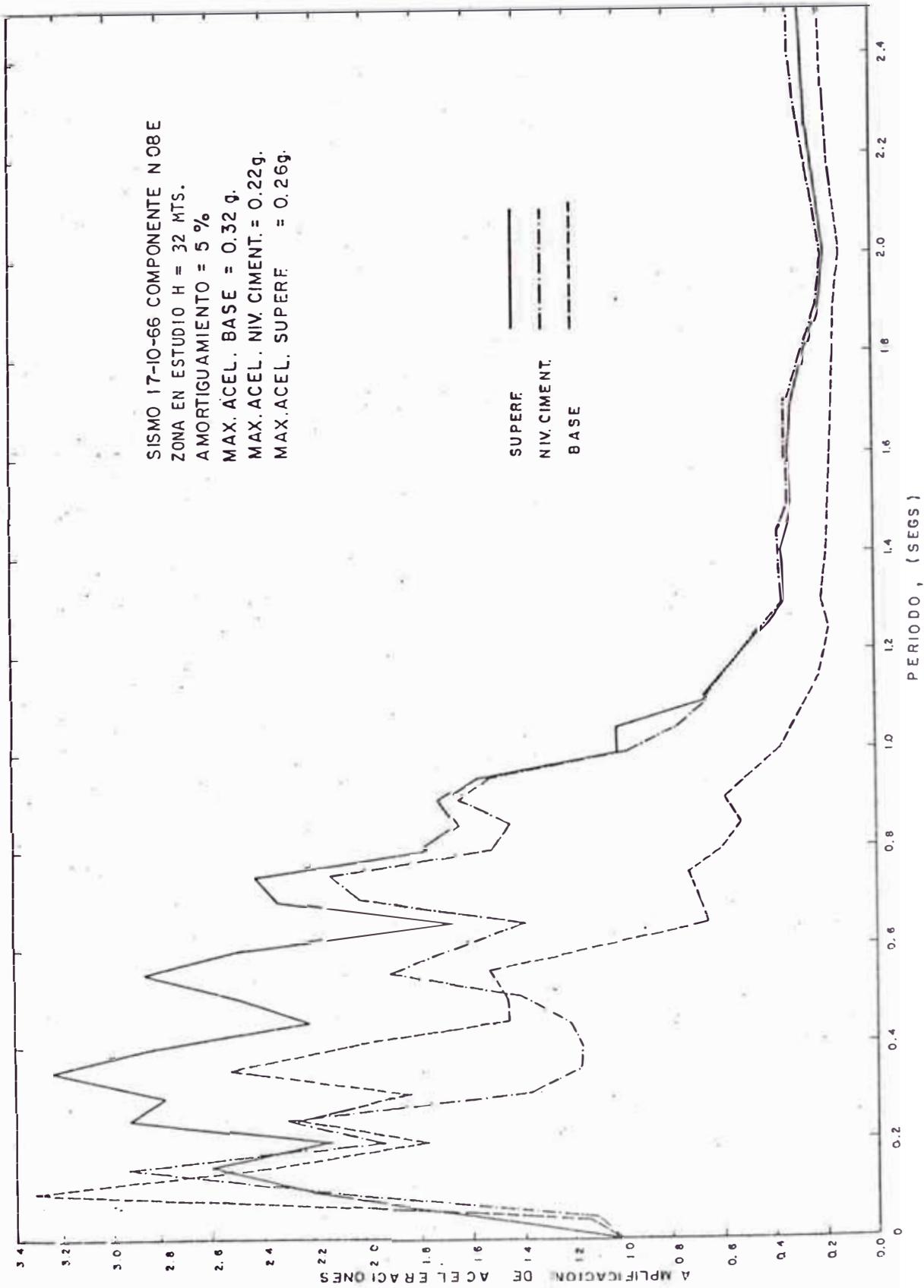


FIG. 6-20 ESPECTROS NORMALIZADOS DE ACCELERACIONES,  $a_{max} = 0.32g$ .

SISMO 31-5-70 COMPONENTE L  
ZONA EN ESTUDIO H = 32. MTS.  
AMORTIGUAMIENTO = 5 %  
MAX. ACEL. BASE = 0.21 g.  
MAX. ACEL. NIV. CIMENT. = 0.16 g.  
MAX. ACEL. SUPERF. = 0.22 g.

SUPERF. ———  
NIV. CIMENT. - - -  
BASE - - -

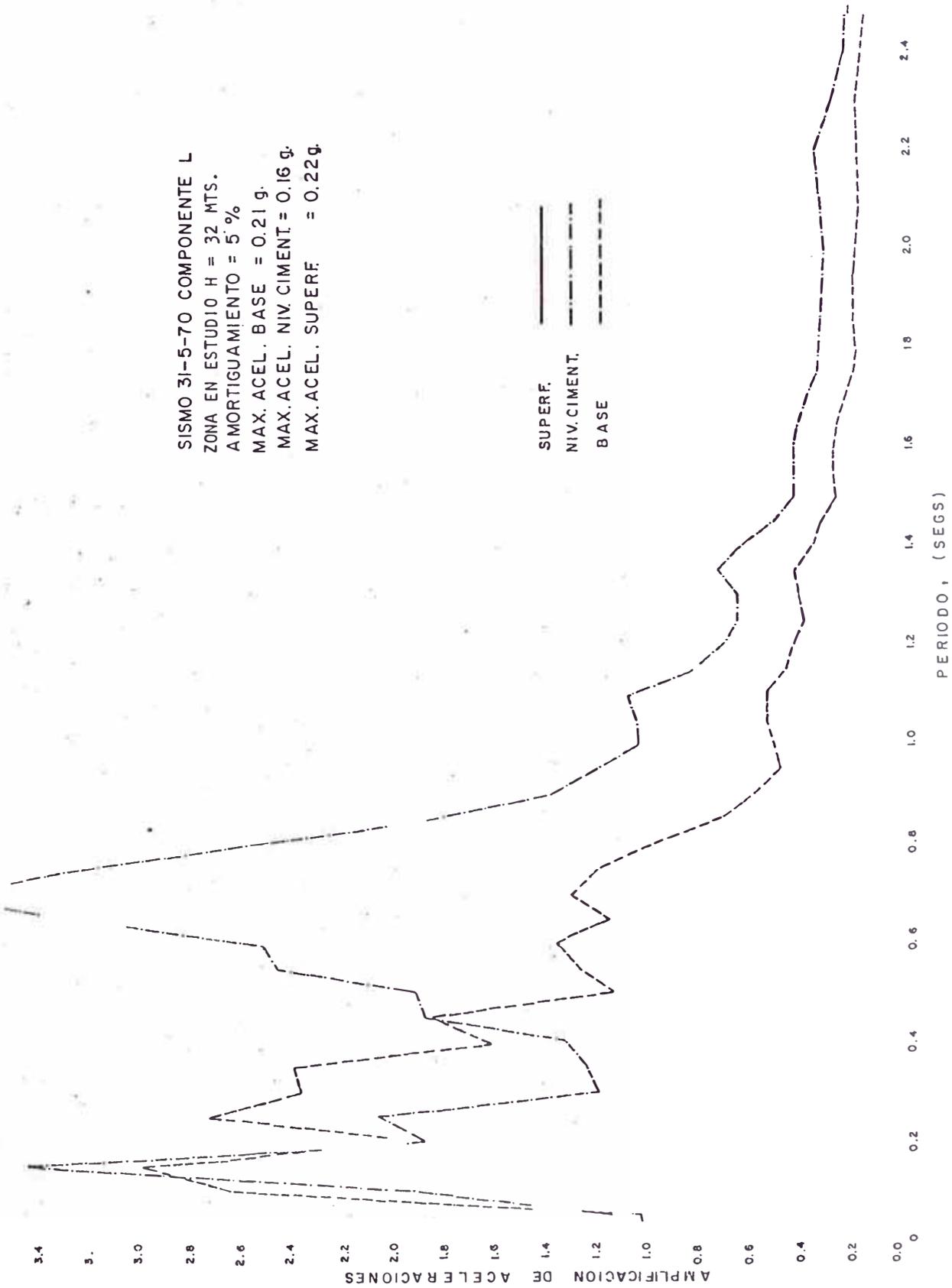


FIG. 6-21 ESPECTROS NORMALIZADOS DE ACCELERACIONES, a max.=0.21 g.

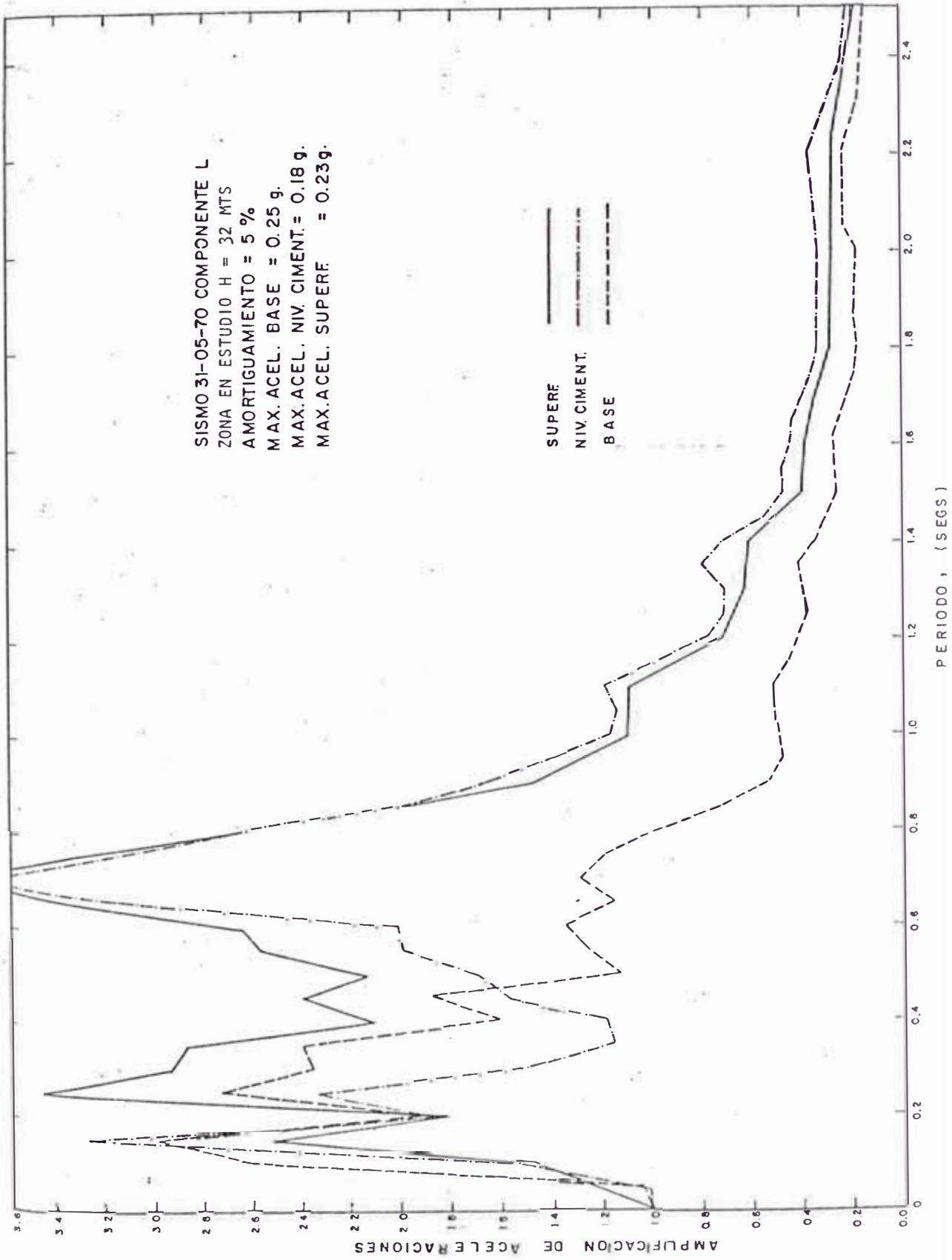


FIG. 6-22 ESPECTROS NORMALIZADOS DE ACCELERACIONES,  $\sigma$  max.=0.25 g.

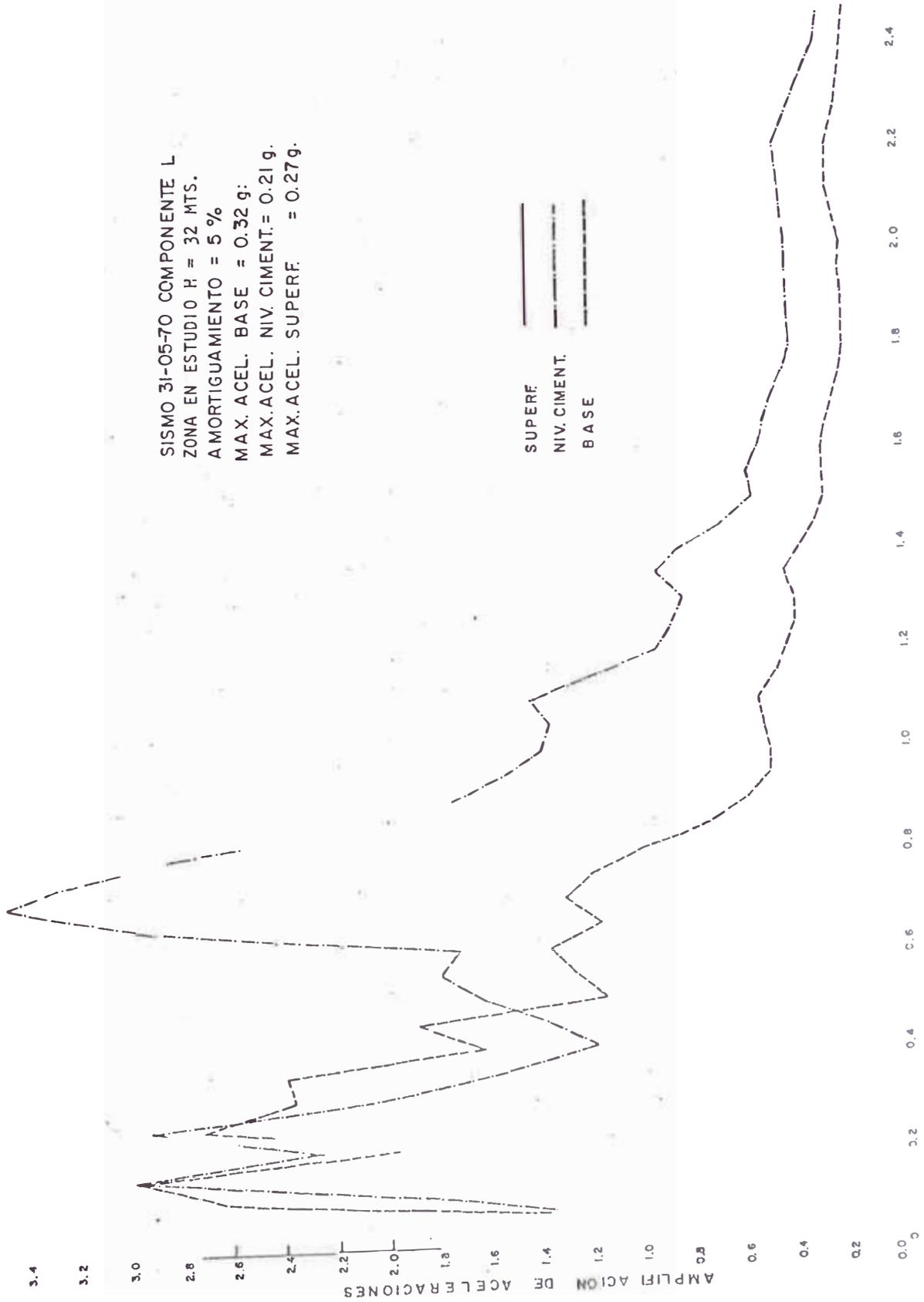


FIG. 6-23 ESPECTROS NORMALIZADOS DE ACCELERACIONES,  $\alpha$  max. = 0.32 g.

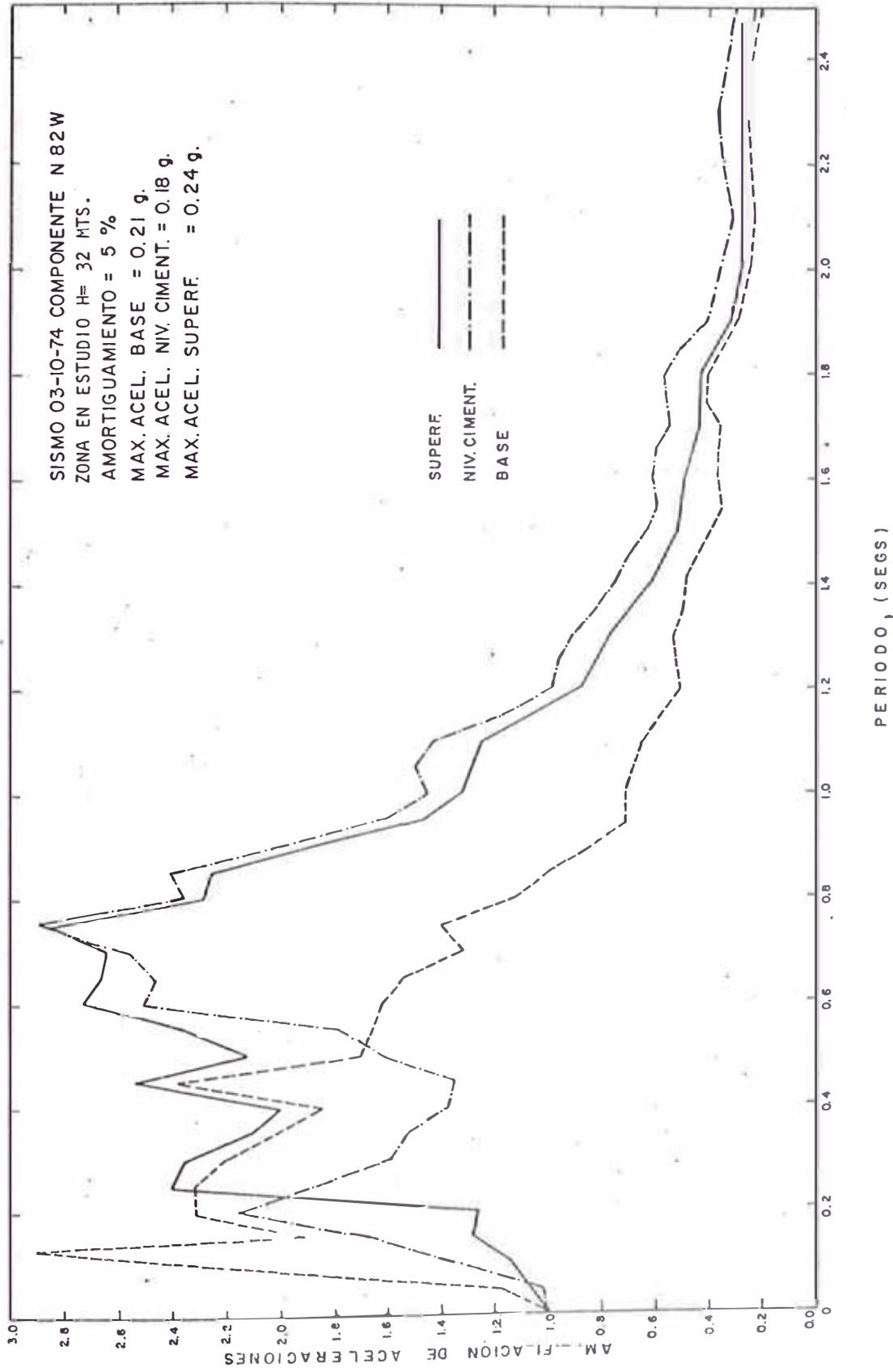


FIG. 6-24 ESPECTROS NORMALIZADOS DE ACELERACIONES,  $a_{max.} = 0.21 g$ .

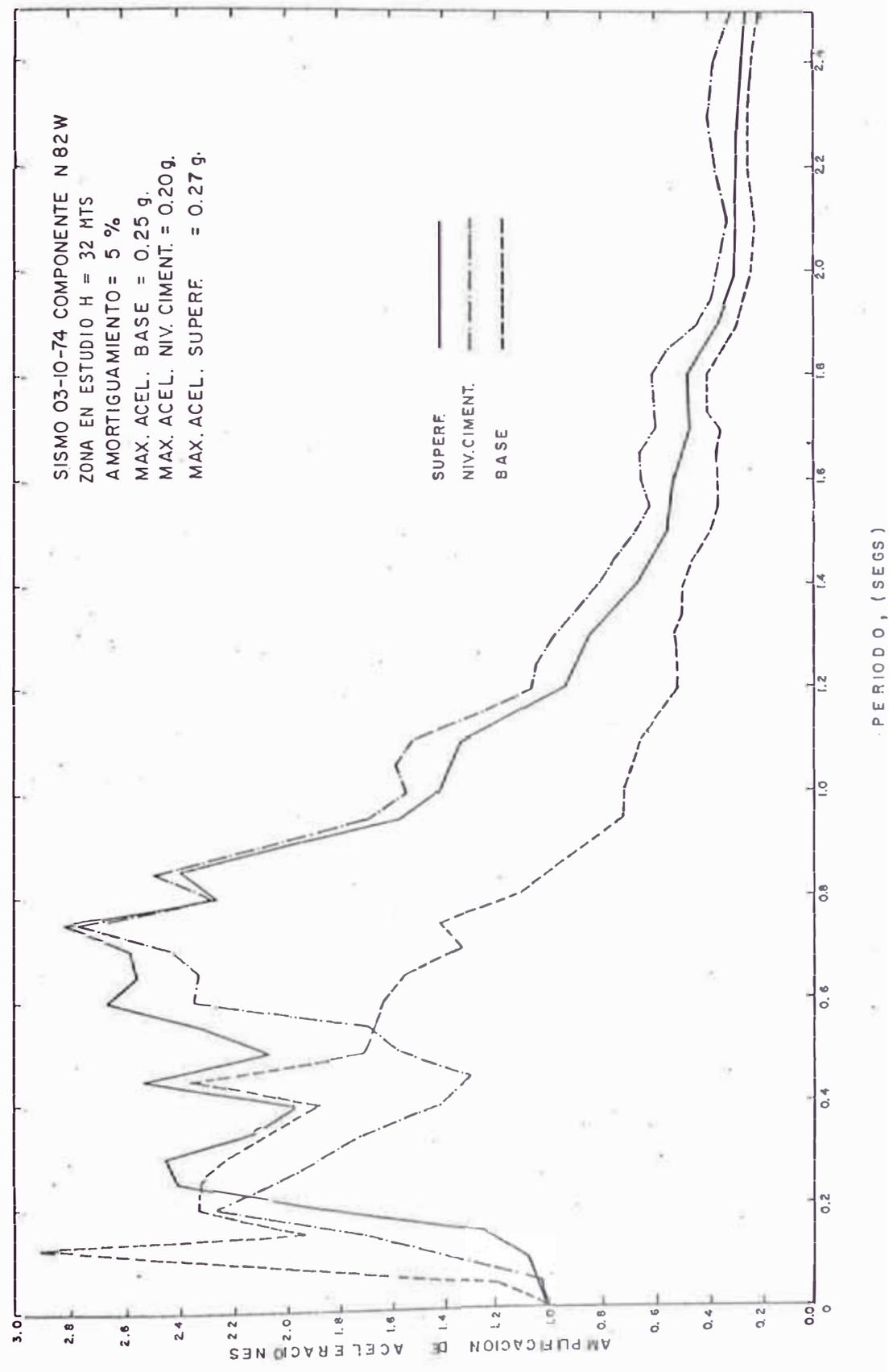


FIG. 6-25 ESPECTROS NORMALIZADOS DE ACCELERACIONES,  $a_{max} = 0.25$  g.

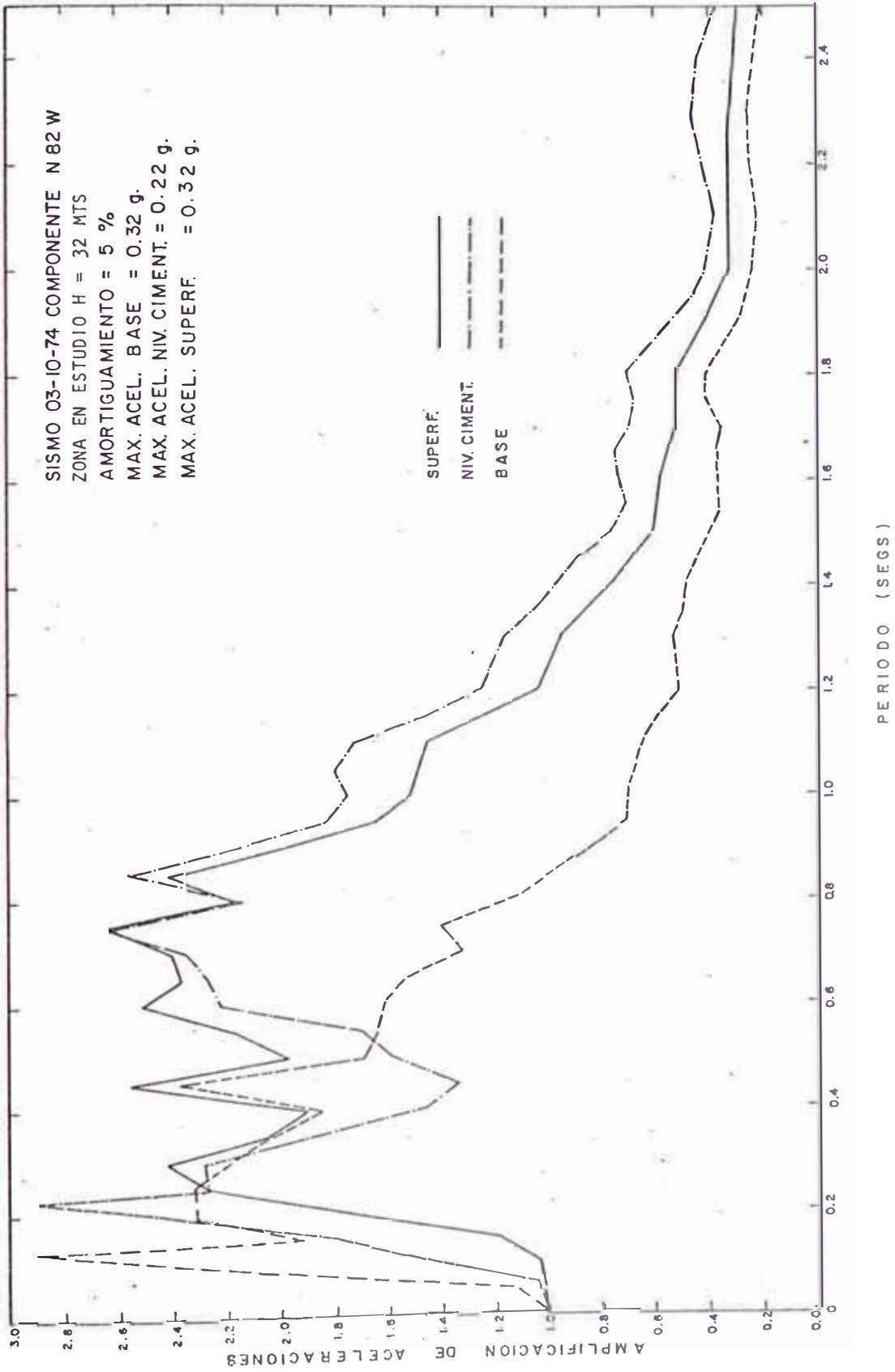


FIG. 6-26 ESPECTROS NORMALIZADOS DE ACCELERACIONES,  $a_{max} = 0.32 g$ .

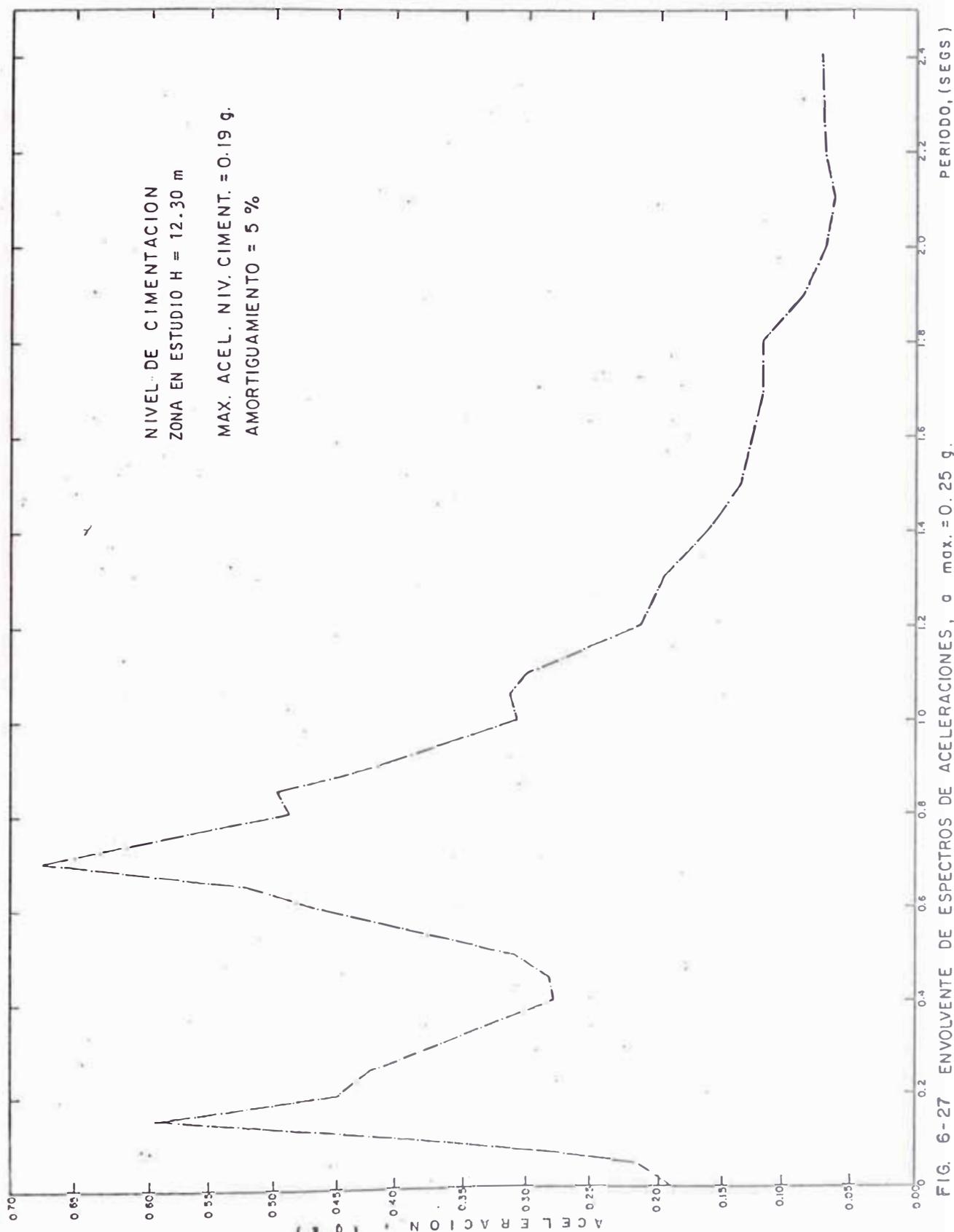
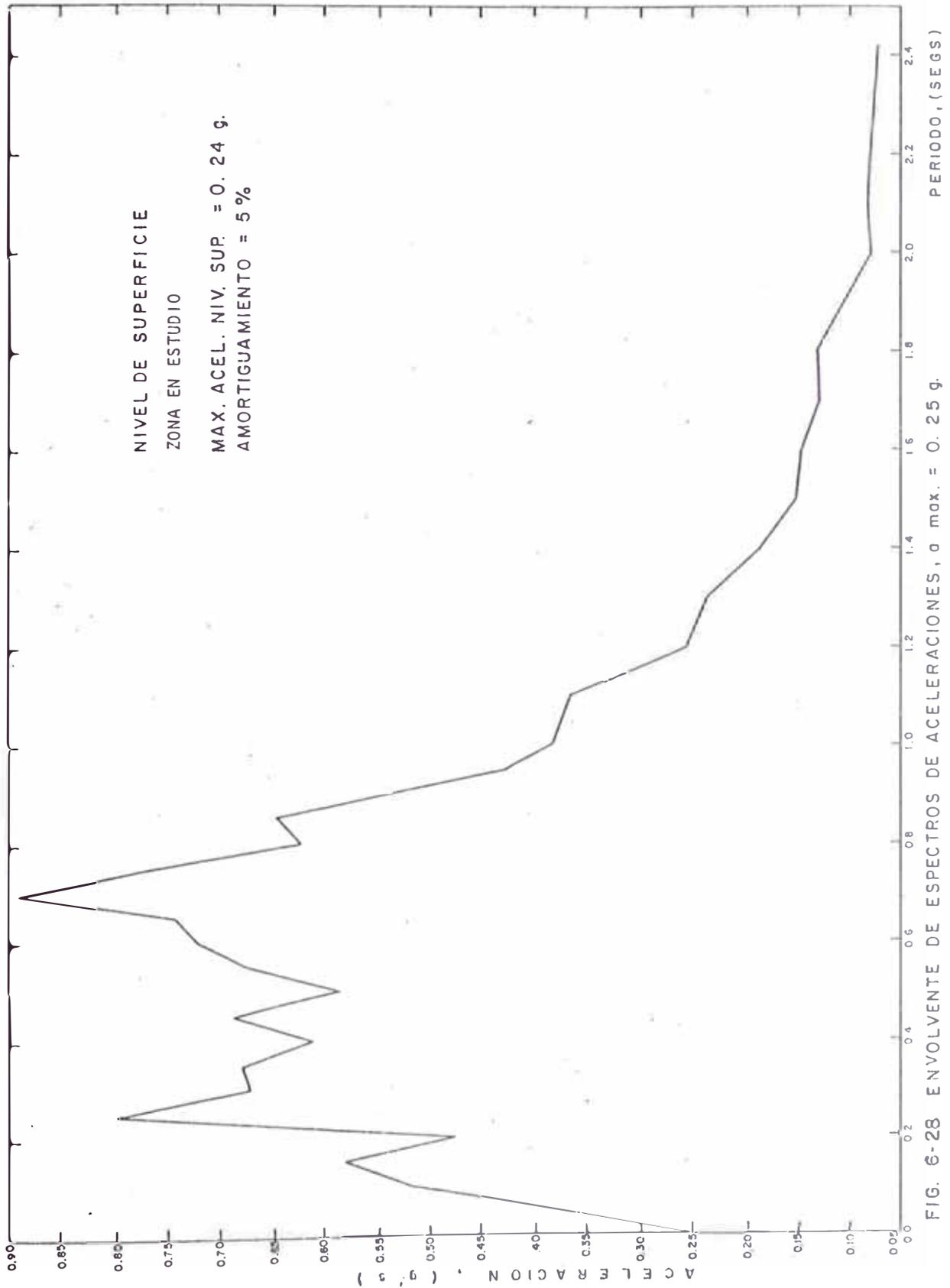


FIG. 6-27 ENVOLVENTE DE ESPECTROS DE ACELERACIONES, a max. = 0.25 g.



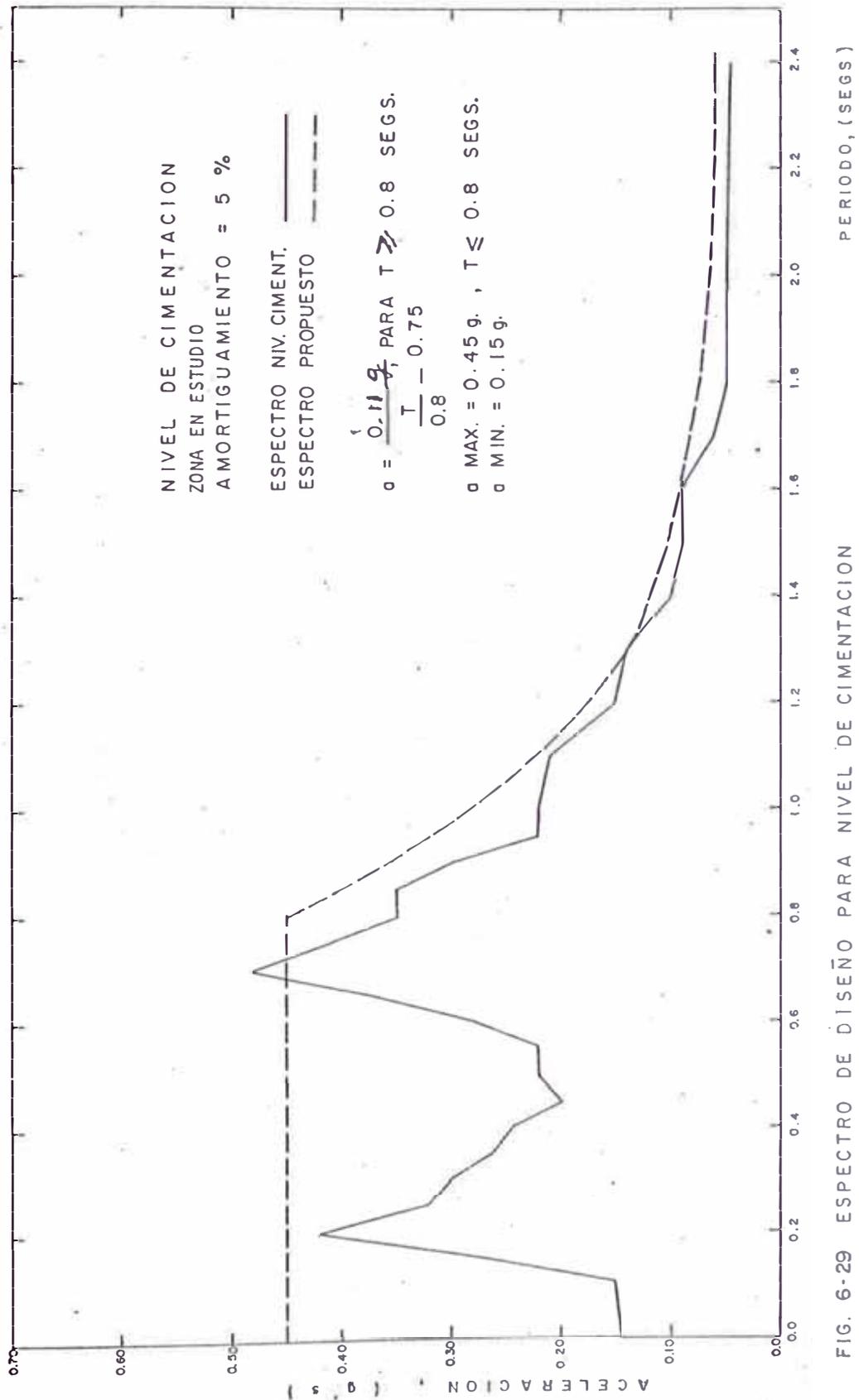


FIG. 6-29 ESPECTRO DE DISEÑO PARA NIVEL DE CIMENTACION

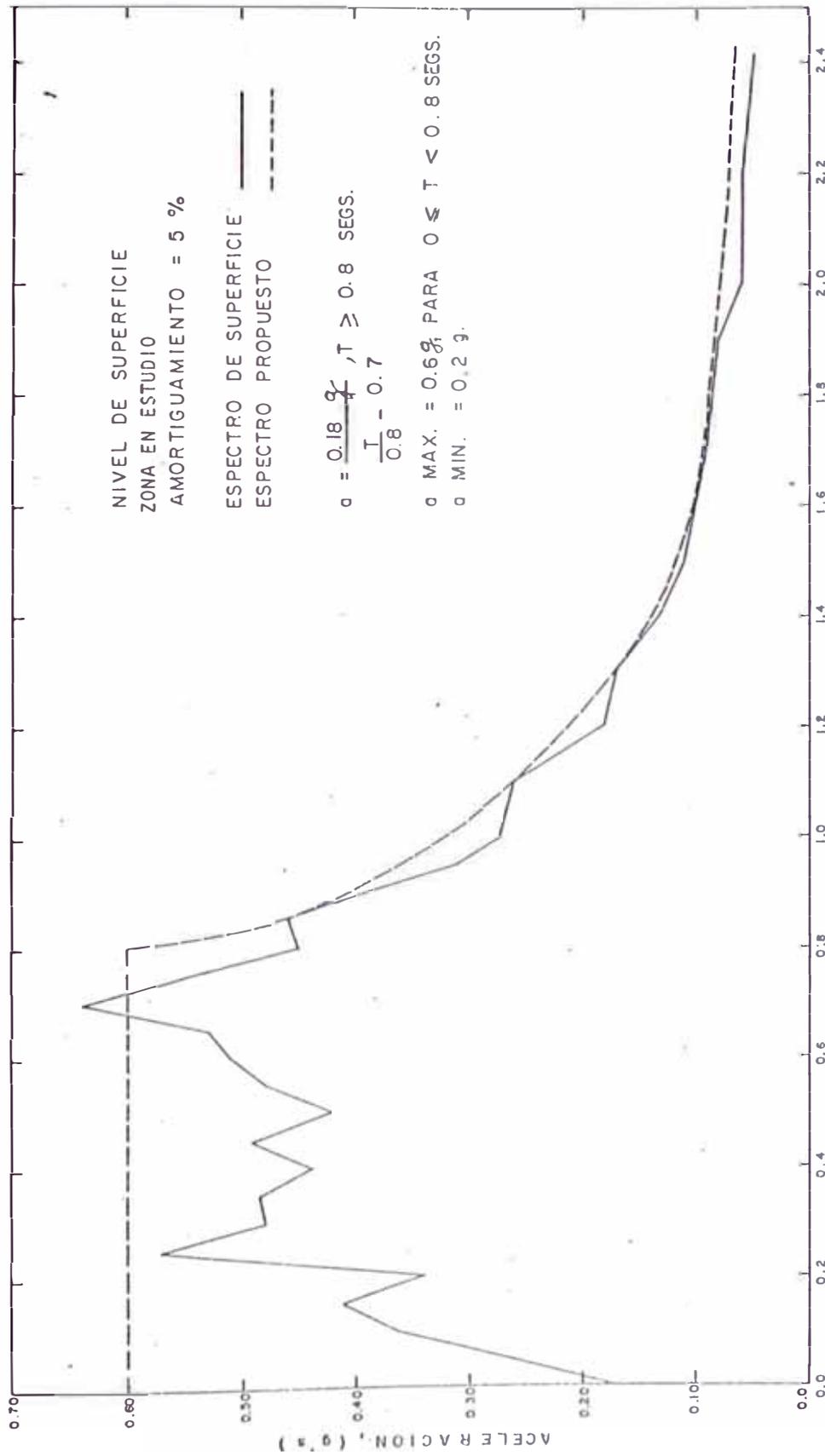


FIG. 6-30 ESPECTRO DE DISEÑO PARA NIVEL DE SUPERFICIE

PERIODO, (SEGS)

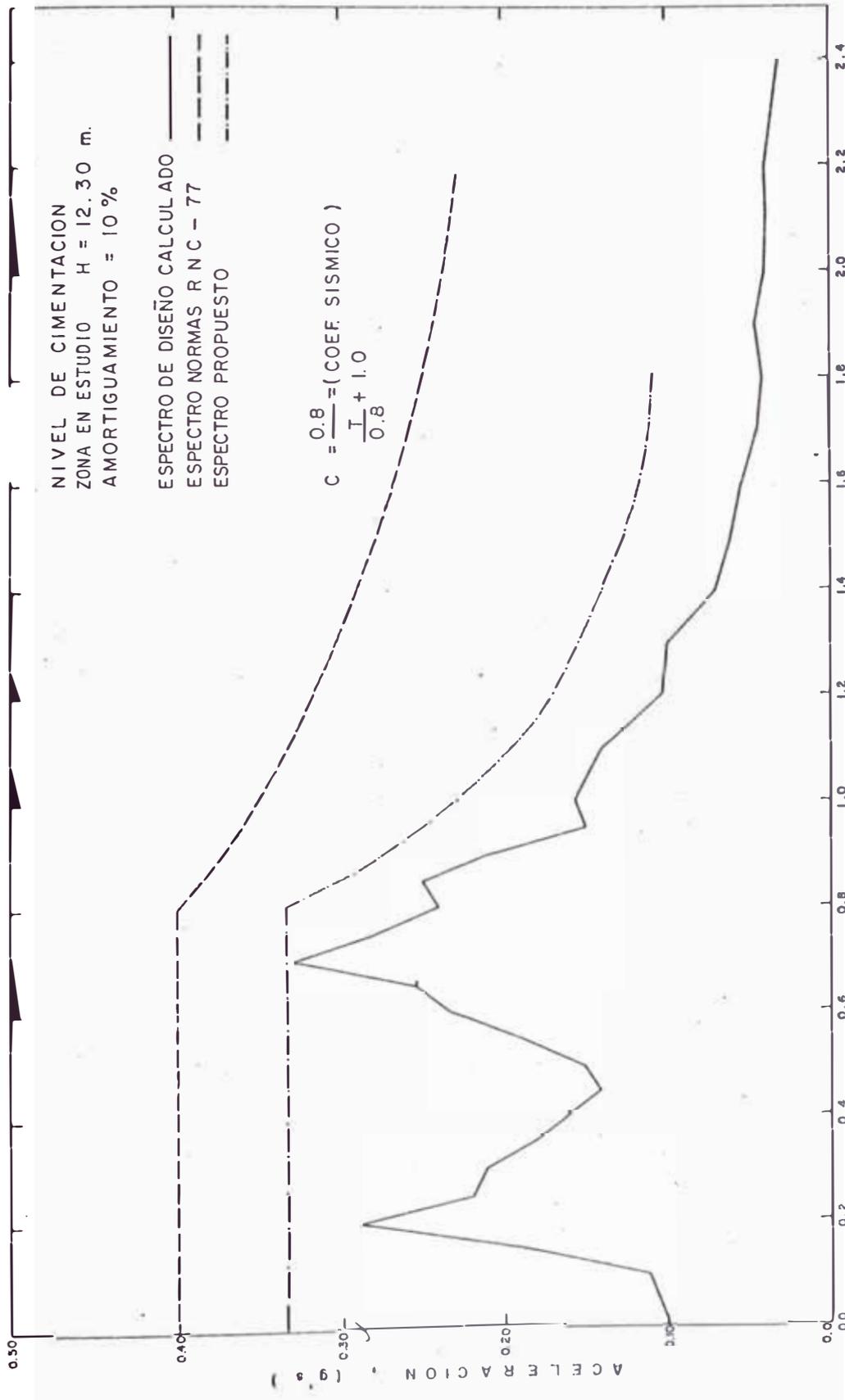


FIG. 6-31 ESPECTRO DE DISEÑO Y DE LAS NORMAS VIGENTES

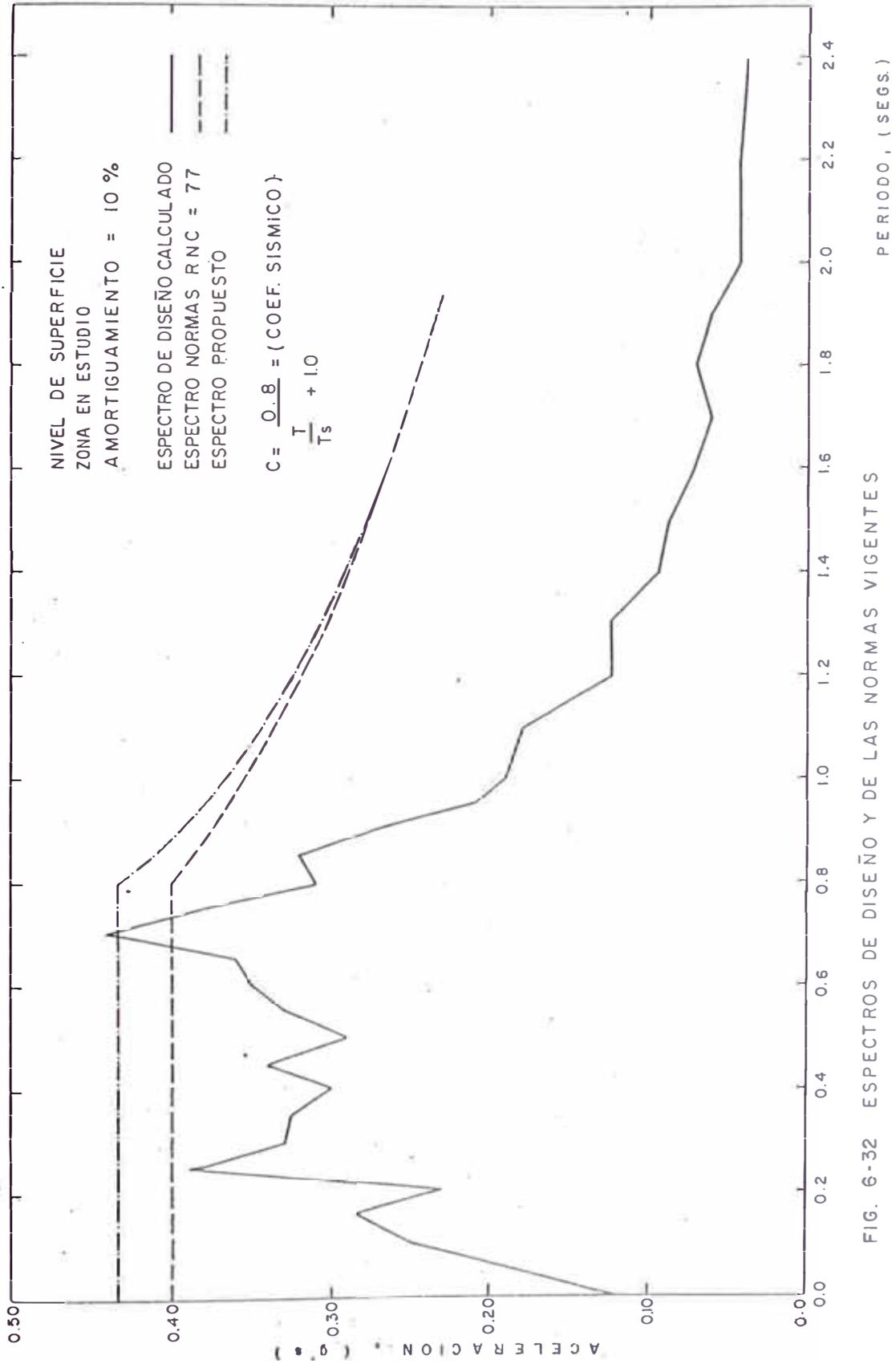


FIG. 6-32 ESPECTROS DE DISEÑO Y DE LAS NORMAS VIGENTES

## C A P I T U L O VII

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo ha documentado de manera detallada los pasos a seguir para la evaluación del peligro sísmico y la realización de los estudios de sitio y microzonificación sísmica de una obra civil.

La revisión de estudios previos de riesgo sísmico efectuados por diversos autores ha presentado resultados diferentes para una misma zona en algunos casos considerablemente, como consecuencia de la utilización de diferentes fuentes de información y debido al incremento de la información instrumental con el tiempo.

Los resultados de aceleraciones obtenidos por el Dr. Huaco han ido incrementado progresivamente de bido a las diferentes fuentes sismogénicas y dife

rentes ecuaciones de atenuación planteadas aún siguiendo los mismos procedimientos probabilísticos. Sin embargo, los valores obtenidos por el Dr. Ocola son aún mayores para la misma zona en estudio debido a niveles de confianza mayores y diferentes zonas sismogénicas y recurrencias. Los estudios de sismicidad realizado por otros autores que plantean ecuaciones de recurrencia similares a los de Gutenberg y Richter obtiene magnitudes diferentes para períodos de retorno iguales para una misma área, por lo que se considera necesario depurar y actualizar nuestros catálogos y tratar de uniformizar y confeccionar un catálogo único, con la cual haría posible obtener resultados más confiables.

El mapa de distribución de intensidades máximas - presenta líneas de contorno de isosistas para los sismos peruanos del presente siglo y valores máximos para los sismos históricos. Se recomienda en el futuro incorporar al mapa presentado, la distribución de intensidades de sismos históricos. - Actualmente algunos investigadores están preparando un catálogo de intensidades sísmicas históricas que proporcionará la información necesaria. - Existe adecuada información de intensidades sísmicas en las zonas de la Costa, Sierra y Selva Alta del Perú. Dicha información es escasa en la zona de la Selva Baja. Además de la alta sismicidad de la Costa del Perú, se aprecia actividad sísmica en la denominada Zona Sub-Andina localizada en la Selva Alta.

Existe semejanza entre el mapa de distribución de intensidades presentado y el mapa de Zonificación Sísmica del Perú de las Normas de Diseño Sismo-Re

sistente en vigencia. La zona 3 (sismicidad baja) coincide con la zona de intensidades menores de IV. La zona 2 (sismicidad media) se asemeja a la zona de intensidad V, aún cuando existen diferencias en los departamentos de Huancavelica, Ayacucho, Cusco y Puno. El mapa presentado indica en dichas zonas una mayor sismicidad. La zona 1 (sismicidad alta) está representada en el presente mapa por zonas de intensidad mayores que VI. De acuerdo a los valores de intensidad presentados, la zona 1 podría subdividirse.

En base al mapa de distribución de intensidades - presentado, se recomienda modificar el mapa de Zonificación Sísmica del Perú de las Normas de Diseño Sismo-Resistente vigentes.

Se recomienda continuar con la toma sistemática de datos de intensidades sísmicas en todo el Perú y la investigación de intensidades de sismos históricos para ser incorporados al mapa de distribución de máximas intensidades sísmicas propuesto.

De acuerdo a la teoría de la tectónica de placas, la zona sísmica superficial de Sub-América es un borde continuo y a lo largo de la zona de subducción ha ocurrido sismos destructores, en esta región la actividad sísmica está distribuída más o menos uniformemente. Los efectos debido a la distribución de esfuerzos de la comprensión de placas originan esta alta actividad sísmica, la distribución de la actividad sísmica no solo está circunscrita a la zona de la fosa Perú-Chile. También tiene una amplia distribución en la parte central de los Andes y en las zonas Sub-Andinas.

Se considera necesario un control más preciso de la actividad sísmica mediante un control de tiempo uniforme de las estaciones lo que nos permitiría corregir algunas discrepancias en la determinación de las coordenadas focales, y en consecuencia delinear mejor las zonas activas que se están detectando.

Se debe analizar cuidadosamente la actividad sísmica macroregional, especialmente la información no instrumental correspondiente al período 1500 - 1906, complementando con la información de la actividad sísmica del período 1906-1981 e incluyendo la distribución de mapas isosistas correspondientes a los grandes terremotos que han ocurrido en nuestro país. Se considera necesario un estudio particular de los terremotos de 1966, 1970 y 1974.

La evaluación del peligro sísmico presenta cierta incertidumbre esto es, en la determinación de las máximas aceleraciones probables de diseño por el uso de diferentes catálogos y diferentes escalas de magnitud. Las incertidumbres más insignificativas son aquellas asociadas a la definición de fuentes sismogénicas (continentales, litorales) - producto de la insuficiente información geológica y simológica que permita identificar zonas sísmicamente activas, incluyendo fallas como fuentes lineales.

Otras incertidumbres son debido a la definición de atenuaciones de aceleración e intensidades. Los datos de atenuaciones de aceleraciones son escasos en el Perú, habiéndose tan solo registrado terremotos en acelerógrafos en Lima.

Se considera necesario complementar los estudios de zonificación sísmica con estudios de microzonificación sísmica no sólo de los lugares donde se realiza un proyecto de ingeniería, sino también de las principales ciudades y lugares donde se localizan infraestructuras a la que se deben diseñar adecuadamente para evitar daños importantes ante un sismo destructor, estudiando la influencia de las características locales. Asimismo una investigación más amplia de los parámetros que describen la actividad sísmica y en correlación tanto macroregional como microregional con los parámetros que describen al movimiento del suelo.

Para realizar un estudio de sitio y microzonificación sísmica no se cuenta con registros sísmicos de aceleraciones en el Perú para lugares fuera de Lima, y lo recomendable es utilizar sismos registrados en Lima escalados a valores de aceleración máxima de los resultados de un estudio de peligro sísmico que debe realizarse previamente.

Se debe comparar siempre métodos simplificados y analíticos existentes, para verificar fenómenos de ocurrencia de licuación de suelos y amplificación sísmica y obtener espectros de respuestas normalizados a varios niveles de profundidad los que podrían ser utilizados en el diseño antisísmico.

Finalmente se recomienda realizar estudios de licuación de suelos y amplificación sísmica para diferentes puntos de una ciudad a fin de obtener factores de amplificación y envolvente de espectros para comparar con el espectro básico de las

normas de diseño sismo-resistente, esta comparación es en favor de una mayor concordancia entre los espectros obtenidos de registros y los obtenidos teóricamente.

## REFERENCIAS

- Algermissen, S.T. and Perkins, D.M. (1972), "A Technique for seismic zoning: General consideration and parameters", Proceedings International Conference on Microzonation Seattle, Washington, November.
- Algermissen, S.T. and Perkins, D.M. (1976), "A Probabilistic Estimate of maximum Acceleration in Rock in the contiguous United States", open-File report 76-416, United States Department of the Interior, Geological Survey.
- Alva, J.E. y Chang, C.S. (1978), "Características de los terremotos peruanos en Lima y Alrededores" III Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Lima-Perú.
- Alva, J. E. (1981), "Bibliografía sobre los terremotos peruanos: Aspectos Ingenieriles", Boletín del Comité de Ingeniería Antisísmica de la UNI, Boletín No. 1, Lima, Perú.
- Alva, J.E. (1982), "Estudio del Potencial de Licuación de Suelo de Cimentación de las Obras del Proyecto Central Hidroeléctrica Curumuy. Estudio Definitivo", Informe presentado a la Gerencia de Estudios de ELECTROPERU.
- Alva, J.E. y Orihuela, P. (1982), "Estudio de Licuación y Amplificación Sísmica en Chimbote, Perú", IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Chiclayo, Perú.
- Alva, J.E., Torres, R. y Guzmán, V. (1983), "Mapa de distribución de intensidades máximas del Perú", Informe de la Universidad Nacional de Ingeniería al Centro Regional de Sismología para América del Sur, Lima, Perú.
- Arrigoni, H. (1928), Mapa aparecido en el diario El Comercio el 18 de Mayo de 1928 por H. Arrigoni, Cartógrafo de la Sociedad Geográfica de Lima.
- ASCOSESA (1981), "Investigaciones Geoeléctricas en los Proyectos de Aprovechamientos Hidroeléctricos de Pochos y Curumuy. Reporte por aguas subterráneas Consultoría y Servicios de Ingeniería Eléctrica - INIE, ELECTROPERU, Setiembre, Lima, Perú.
- Barazangi, M. and Isacks, B.L. (1979), "Subduction of the Nazca plate beneath Peru: Evidence from the spatial distribution of earthquakes", Geophysical journal, Royal Astronomical Society, Vol.57, Pp.537-555.

- Berrocal, J., Deza, E. y Shikiya, J. (1975), "Estudio de Sismicidad para el proyecto de derivación del Río Mantaro a Lima", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.
- Berrocal, J. (1976), "Aspectos de la Sismicidad Sudamericana durante el año 1974", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.
- Brady, A.G. and Pérez, V. (1977), "Strong-motion earthquake accelerograms, digitization and analysis, Records from Lima, Perú: 1951 to 1974", open file Report No. 77-587, U.S. Geological Survey.
- Caldas, F. (1974), "Sismicidad del Proyecto Jequetepeque Zaña", Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Carmona, K. (1979), "Riesgo Sísmico en Huarangal, Departamento de Lima, Perú", Informe Preliminar, Universidad de San Juan, Argentina.
- Casaverde, L. y Vargas, J. (1980), "Zonificación sísmica del Perú", II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente, Organización de Estados Americanos y Pontificia Universidad Católica del Perú, - Lima, Perú.
- Casaverde, L. y Vargas, J. (1982), "Mapa de distribución probabilística de intensidades del Perú", IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Chiclayo, Perú.
- Cloud, W. K. and Pérez, V. (1971), "Unusual Accelerograms recorded at Lima, Perú", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, No.3, Pp.633-640, June
- Cooley, J. W. and Tukey, J.W. (1965), "An Algorithm - for the Machine calculation of complex, fourier series" Mathematics of computation, Vol. 19, No.90, Pp.297 - 301.
- Cornell, C.A., (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis" Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No.5, Pp. 503-1606.
- Cornell, C.A., (1971), "Probabilistic Analysis of Damage of Structures under seismic loads", in Dynamic Waves in Civil Engineering edited by Howells D.A. Knight J. P. and Taylor C., Wiley - Interscience. Proceeding of a conference organized by the society for earthquake and civil Engineering dynamics held at university college of swansea on 7-9 July 1970.

- Cornell, C.A. (1974), " Seismic Risk analysis program support documents, Cambrige, Massachusetts, 110 p.
- Corporación Hidroeléctrica C. Lotti & Asociados, (1979), "Estudio de Factibilidad del Sistema General de Abastecimiento de Agua Dulce a Bayóvar", Organismo de Desarrollo del Complejo de Bayóvar, ODECOB, Febrero.
- Chávez, J. (1979), "Regionalización Sísmica del Perú", Tesis de Grado Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Deacon, R.J., Couch, R.W. y Repetto, P.C. (1979), "Preliminary tectonic, Seismic a Geologic Considerations for earthquake design for Lima, Perú, VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Lima, Perú.
- Dewey, J. (1972), "Tectónica de Placas ", Selecciones de Scientific American, Deriva Continental y Tectónica de Placas, Editorial Blume, Madrid, España, 1974.
- Deza, E. (1971), "The Pariahuanca earthquakes Huancayo, Perú: July - October 1969", Recent Crustal Movements. Royal Society of Nex Zealand, Bulleting 9, pp. 77-83.
- Deza, E. y Carbonell, L. (1978), "Regionalización Sísmotectónica preliminar del Perú" IV Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.
- Donovan, N.C., (1974), "A stadistical evaluation of - strong motion data including the February 9, 1971, San Fernando earthquake", Word Conference earthquake Engineering. 5th, Rome, 1973, Proc, Vol. 1, Pp 1252-1261.
- ELECTROPERU (1981), "Resultados de Ensayos de Penetracion Standar y ensayos de laboratorio. Proyecto Central Hidroeléctrica Curumuy. Sin autor y sin fecha.
- ELECTROPERU (1982), "Informe sobre evaluación del Potencial de licuación del suelo en la cimentación de casa de máquinas. Central Hidroeléctrica de Curumuy, Estudio Definitivo. O.T. 040.03, División Hidráulica, Gerencia de Estudios, Junio.
- Espejo, G. (1974), "Evaluación de Intensidades y Efectos Geológicos Asociados con el terremoto del 03 de octubre de 1974 en la zona de Pisco-Yauca", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.
- Espinoza, A.F. (1980), "Atenuación en movimientos violentos de aceleraciones y velocidades y sus aplicaciones al campo de Ingeniería Sismo-resistente", II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sísmica, Organización de Estados Americanos y Pontificia Univesidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Esteva, L. (1970), "Seismic Risk and seismic design decisions, in Hansen, R. J. ed, Seismic design for nuclear power plants", Cambridge Massachusetts Institute of Technology press, Pp. 142-182.

Esteva, L. (1975), "Geology and probability in the Assessment of Seismic Risk", II International Congress of the International Association of Engineering Geology, Brazil, August.

Everden, J. F. (1970), "Study of Regional seismicity and associated problem", Vol. 60. No. 2, Pp. 393-446, Seismol. Soc. America Bull.

Ferrito, J.M. and Forrest, J. B. (1971), "Compilation and analysis of cyclic triaxial test data", Civil Engineering laboratory. U.S. Navy, Report prepared for Federal Highway Administration, RD -77-129- Washington, D.C.

García, M. (1981), "Planificación futura de Lima frente a un sismo severo", Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Gibbs, H. J. and Holtz, W.G. (1975), "Research on determining the density of sands by spoon penetration testing", Proceeding 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London VI, Pp. 35-39.

Giesecke, A., Ocola, L. y Silgado, E. (1980), "El Terremoto de Lima del 03 de octubre de 1974", Informe preparado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur a UNESCO, Contrato SC/RP. 601.013.

Green, D.W. (1979), "Chira-Piura un Proyecto para mejorar la irrigación en el Norte del país", Revista El Ingeniero Civil, Lima, Perú, Pp. 12-20, Setiembre-Octubre.

Gupta, J.M. and Nuttli, O.W. (1975), "Spatial Attenuation of intensities for central U.S. earthquake", Seismological Soc. America Bull. (Submitted to).

Hansen, W. (1968), "Earthquake Activity Near the Tarapoto-Rio Nieva Highway", Woodward Clyde and Associates, Report to ENKAY S.A.

Hattori (1979), "Seismic Risk maps in the World, maximum acceleration and maximum particle velocity (II) Balkan, middle East, southeast Asia, Central América, South América and others", Bulletin of the International Institute of seismology and Earthquake Engineering, Vol. 17, Pp. 33 - 36.

Herrera Cano, J. y Giuliani, H. (1975), "El Terremoto de Lima (Perú) del 03 de octubre de 1974- Espectro de la Componente N 82°W del Acelerograma", Informe preparado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur a UNESCO, Contrato SC/RP 601.013.

Howell, B.F. and Schultz, T.R. (1975), "Attenuation of Modified Mercalli Intensity with distance from the epicenter", Seismology Soc. America Bull., Vol. 65, No.3, Pp 651-665.

Huaco, D., Rodríguez, A. y Rodríguez, L., "Sismicidad de Arequipa", Informe Inédito. Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Huaco, D. (1979), "Peligro Sísmico de la Región de Piura", Informe presentado a ENERGOPROJEKT, Proyecto Chirra-Piura, Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Huaco, D. (1981), "Peligro Sísmico para la Zona del Complejo Hidroenergético y de Irrigación Olmos", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Huaco, D. (1982), "Peligro Sísmico para la Zona del Transvase Mantaro", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Huaco, P., Lescano, W., Bueno, A., Vásquez, M. y Chávez, J. (1974), "Evaluación de Intensidades, Sismo del 03 de octubre de 1974 en la zona de Lima Río Pisco", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

IGP. (1974), "Boletín del Instituto Geofísico del Perú del Sismo del 03 de octubre de 1974", Instituto Geofísico del Perú, 18 de octubre de 1974, Lima, Perú.

INGEMMET (1979), "Estudio geológico de Bayóvar. Volumen I. Geología del Noroeste del Perú", Instituto Geológico Minero Metalúrgico, Julio, Lima, Perú.

INIE (1979), "Estudio Geotécnico preliminar. Análisis de la cimentación Central Hidroeléctrica Curumuy", 066-09/009-79/SD.IC.GG, ELECTROPERU, Instituto de Investigaciones Energéticas y Servicios de Ingeniería Eléctrica, Junio, Lima, Perú.

INIE (1979), "Estudio Geotécnico Complementario. Central Hidroeléctrica Curumuy; Instituto de Investigaciones Energéticas y Servicios de Ingeniería Eléctrica. Sin autor y fecha.

Isacks, B., Oliver, J. and Sykes, L.R. (1968), "Seismology and the new global tectonic" Journal of Geophysical Research, Vol. 73, No. 18, Pp. 5855-5899.

- James, D. E. (1973), "Formación de los Andes", Seleccionaciones de Scientific American, Deriva Continental y - Tectónica de Placas, Editorial Blume, Madrid, España, 1974.
- JICA, (1979), "Report on Poechos and Curumuy Hydro-Power Development Project", Japan International Cooperation Agency, November.
- Kishida, H. (1969), "Characteristics of liquefied sands during the Mina Owari, Tahnankai and Tugin Earthquake", Soil and foundation, Vol. 9, No. 1, Pp. 75-92.
- Kishida, H. (1970), "Characteristics of licuefaction - of level sandy ground during the Tokachiochi Earthquake", Soil an Foundation, Vol. 10, No. 2, Pp. 103-111.
- Kuroiwa, J. y Deza, E. (1968), "Daños Causados en Moyobamba por el Sismo del 19 de junio de 1968", Facultad - de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Lambe, T.W. and Whitman, R.Y. (1969), "Soil Mechanics", John Wiley, New York.
- Martínez, A. (1978), "Potencial de Riesgo Sísmico de Lima", II Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Arequipa, Perú.
- Mc Guire, R.K. (1976), "Fortran Computer program for seismic Risk analysis", Open file repor 76-67, U.S., Geological Survey.
- Merz, H.A. and Cornell, C.A. (1973), "Seismic Risk Analysis based on a cuadratic magnitude-frecuency law", Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 63, - No. pt 1, Pp. 1299-2006.
- Meyerhof, G.G. (1956), "Penetration test and bearing - capacity of cohesion less Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering, American Society of Civil Engineering, Vol. 82, SMI.
- Michelena y Asociados (1972), "Resultados de ensayos - de campo Proyecto Chira-Piura", Lima, Perú.
- Ministerio de Agricultura y Alimentación (1978), "Desarrollo Integral de los Recursos Hídricos de Tacna y Moquegua", Vol. IV, Estudios Básicos Generales. Apéndice 6, Sismología, Oficina de Estudios. Estudio Integral de las cuencas de Tacna y Moquegua, Diciembre.
- Newmark, N.M. and Roseblueth, E. (1971), "Fundamental - of earthquake Engineering".

Ocola, L. (1982), "Mapa Preliminar Intensidades. Máximas (MSK) 1471-1974", Proyecto SISAN, Comunicación Personal.

Ocola, L., Becerra, O., Pardo, F. y Huaco, O. (1977), "Sismicidad, Peligro Sísmico y de Tsunamis en el área de Bayóvar, Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Ocola, L. (1981), "Actividad Sísmica en la zona de Ayacucho y Programa de Estudios", Dirección de Investigación Científica de Geofísica Aplicada, Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Orihuela, P. (1981), "Influencia de las condiciones Locales en el Sismo de Arequipa del 16 de febrero de 1979", Tesis de Grado Programa Académico de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Peck, R.D. and Bazaraa, A. B. (1969), "Discussion on settlement of spread footing on sand", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 25, Pp.905-909.

Roesset, J.M. and Whitman, R.V. (1969), "Theoretical - back ground for Amplification Studies", Reserach Report R.69-15, Massachusetts, Institute of Tecnology, Cambridge, Massachusetts.

Saragoni, R., Crepien, S. y Araya, R. (1981), "Características de movimientos sísmicos fuertes de Chile", Publicación Seis I- 2/81 (164), Universidad de Chile, Santiago, Chile.

Schnabel, B., Lysmer, J. and Seed, H.B. (1972), "SHAKE: A computer program for earthquake response Analysis of Horizontal layered sites", Report EERC72-12, University of California, Berkeley.

Sebrier, M. (1978), "La Tectónica reciente de la zona Bayóvar", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970), "Soil Module and Damping factors for dynamic response Analysis", Report EER C70-10, University of California, Berkeley.

Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971), "Simplified procedure for avaluating Soil licuefaction Potencial", Journal of the Soil and Foundation Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol 97, SM9, Pp.1249 - 1273.

Seed, H.B., Idriss, I.M. Makdisi, F. and Banerjee, N. - (1975), "Represation of irregular Stress time Histories by Equivalent Uniform stress in licuefaction Analysis",

Report EER C75-29, University of California, Berkeley.

Seed, H.B. (1979), "Soil liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for level ground during earthquakes", Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, GT2, Pp.201-255.

Sieberg, A. (1930), "Los Terremotos en el Perú", Capítulo VI, Geología del Perú de G. Steinmann Heidelberg Carl Winster Universitat-Sbuchhan-Lunc, P.406.

Shikiya, J. y Alemán, H. (1974), "Evaluación de Intensidades y Daños producidos por el Sismo del 03 de octubre de 1974 en la zona de San Juan", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.

Silgado, E. (1946), "Datos Sismológicos del Perú", Boletín 3, Instituto Geológico del Perú, Lima, Perú.

Silgado, E. (1947), "Datos Sismológicos del Perú-1946", Boletín 7, Instituto Geológico del Perú, Lima, Perú.

Silgado, E. (1948), "Datos Sismológicos del Perú-1947", Boletín 11, Instituto Geológico del Perú, Lima, Perú.

Silgado, E. (1948), "Datos Sismológicos del Perú-1948", Boletín 13, Instituto Geológico del Perú, Lima, Perú.

Silgado, E. (1951), "The Ancash earthquake of November-10, 1946", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 41, No.2, Pp. 83-99.

Silgado, E. (1952), "Estadística Sísmica del Perú-1946-1950", Datos Sismológicos del Perú, 1949-1950, Boletín No.4, Instituto Nacional de Investigación y Fomento Mineros, Ministerio de Fomento y Obras Públicas, Lima, Perú, Pp. 7-26.

Silgado, E. (1952), "El Sismo del 09 de diciembre de 1950", Datos Sismológicos del Perú, 1949-1950, Boletín No.4, Instituto Nacional de Investigación y Fomento Mineros, Ministerio de Fomento y Obras Públicas, Lima, Perú, Pp. 47-51.

Silgado, E. (1953), "Datos Sismológicos del Perú-1951", Boletín No.8, Instituto Nacional de Investigación y Fomento Mineros, Ministerio de Fomento y Obras Públicas, Lima, Perú.

Silgado, E. (1957), "El Movimiento Sísmico del 12 de diciembre de 1953", Anales del Primer Congreso Nacional de Geología, Sociedad Geológica del Perú, Lima, Perú, Parte II, Tomo 32, Pp. 225-238.

Silgado, E. (1957), "Datos Sismológicos del Perú- 1952-1955", Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Lima, Perú, Tomo XXIX.

Silgado, E. (1969), "Sismicidad de la region occidental de la América del Sur entre las paralelas 2° y 18° Latitud Sur", Primer Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería antisísmica, Lima, Perú, Pp. 33-44.

Silgado, E. y De Las Casas, J. (1971), "Seismological Report Chira-Piura Project", Submitted to ENERGOPRO - JEKT, Lima, Perú.

Silgado, E. (1973), "Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1970)", Geofísica Panamericana, Vol. 2, No.1, Pp. 179-243.

Silgado, E. (1975), "Magnitud, frecuencia, período de retorno de terremotos y Riesgo sísmico en la Costa del Perú, entre 9° a 13.8° de latitud Sur", Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima, Perú, Tomo X CIV, Pp. 20-23.

Silgado, E. (1977), "Datos macrosísmicos de terremotos ocurridos en territorio peruano 1912-1974, Mapas de Isosistas y Apreciaciones", Información inédita, Centro Regional de Sismología para América del Sur, Lima, Perú.

Silgado, E., Fernández Concha, J. y Ericksen, G.E. (1952), "El terremoto del Cusco del 21 de mayo de 1950", Datos sismológicos del Perú 1949-1950, Boletín No. 4, Instituto Nacional de Investigación y Fomento Mineros, Ministerio de Fomento y Obras Públicas, Lima, Perú, Pp. 27-46.

Silgado, E. (1978), "Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974)", Instituto de Geología y Minería, Boletín No. 3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.

Torres, R. (1982), "Revisión de trabajos sobre sismicidad y Riesgo Sísmico realizados en la zona Nor Oeste del Perú", Informe presentado a la Gerencia de Estudios, ELECTROPERU, Lima, Perú.

Torres, R. y Alva, J. E. (1982), "Estudio de Riesgo Sísmico para la Central Hidroeléctrica de Curumuy", Informe presentado a la Gerencia de Estudios de ELECTROPERU, Lima, Perú.

Torres, R. (1983), "Estudio de Sitio, Central Hidroeléctrica de Curumuy", Informe presentado a la Sub Gerencia de Ingeniería de ELECTROPERU, Lima, Perú.

Umlauff, A. F. (1915), "La Región Sísmica de Caravelí", Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima, Tomo XXXI, Segundo Trimestre, Lima, Perú.

Vargas, J. (1979), "Monumentos históricos y Riesgo Sísmico para la zona de Lima", Seminario sobre protección de monumentos de Areas Sísmicas, Antigua Guatemala, Guatemala, C.A.

Vesic, A.S. (1973), "Analysis of ultimate loads of shallow foundation", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineers, MS1, Pp.45-73, January.

Whitman, R.V. (1971), "Resistance of soil to liquefaction and Settlement", Soil and Foundation, Vol. 2, M-4, Pp. 52-66.