

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE ANCASH

T E S I S
Para optar el Título Profesional de
INGENIERO CIVIL

EDGAR MIGUEL AREVALO STOPP

Lima - Perú
1984

INDICE

	PP
INTRODUCCION	1
RESUMEN	2
CAPITULO I	ASPECTOS BASICOS
1.1	Generalidades 6
1.2	Objetivos del presente estudio 8
CAPITULO II	REVISION DE ESTUDIOS DE RIESGO SISMICO EXISTENTES
2.1	Introducción 11
2.2	Sismicidad, Peligro Sísmico de Tsu- namis en el área de Bayóvar 13
2.3	Peligro Sísmico de la región de Piura 15
2.4	Riesgo Sísmico del departamento de Lima 18
2.5	Monumentos Históricos y Riesgo Sísmi- co para la zona de Lima 20
2.6	Zonificación Sísmica del Perú 21
2.7	Peligro Sísmico para la zona del Com- plejo Hidroenergético y de Irrigación de Olmos 23
2.8	Peligro Sísmico para la zona del Trans- vase Mantaro 25
2.9	Mapa de Distribución Probabilística - de Intensidades del Perú. 28
2.10	Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de la ciudad de Huaraz 29
2.11	Otros Estudio de Riesgo Sísmico 31

2.12	Conclusiones	32
CAPITULO III	REVISION DE LOS CATALOGOS SISMICOS	
3.1	Introducción	107
3.2	Información Básica de los Catálogos Sísmicos	109
3.3	Fuentes Internacionales de Localización de Sismos	111
3.4	Catálogo Sísmico de la NOAA	116
3.5	Revisión del Catálogo de la NOAA	119
3.6	Observaciones encontradas en la Revisión	127
3.7	Catálogo de Hipocentros Peruanos ECOSIS-UNI 1984	128
3.8	Conclusiones	130
CAPITULO IV	RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE ANCASH SIN CONSIDERAR LA INFLUENCIA DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA	
4.1	Introducción	132
4.2	Fundamentos del Riesgo Sísmico	134
4.3	Revisión de la Información Sismotectónica del departamento de Ancash	139
4.4	Fuente de Datos	144
4.5	Evaluación de las Fuentes Sismogénicas	146
4.6	Análisis Estadístico de Recurrencia Sísmica	148

4.7	Leyes de Atenuación	154
4.8	Evaluación del Riesgo Sísmico	156
4.9	Conclusiones	158

CAPITULO V ESTUDIO DEL POTENCIAL SISMICO DE LA
FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

5.1	Introducción	192
5.2	Generalidades	193
5.3	Tipos de Fallas	195
5.4	Actividad de una Falla	197
5.5	Clasificación de las Fallas según su Actividad	199
5.6	Relaciones para estimar las Magnitu- des Sísmicas Máximas de una Falla	208
5.7	Características Físicas de la Falla de la Cordillera Blanca	215
5.8	Investigaciones sobre la Actividad de la Falla de la Cordillera Blanca	216
5.9	Resultado de las Investigaciones Rea- lizadas en la Falla de la Cordillera Blanca	217
5.10	Grados de Actividad de la Falla de la Cordillera Blanca	222
5.11	Cálculo de las Magnitudes Máximas para la Falla de la Cordillera Blanca	224
5.12	Conclusiones	226

CAPITULO VI	INFLUENCIA DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA EN EL RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE ANCASH	
6.1	Introducción	235
6.2	Programa de Cómputo FRISK	236
6.3	Evaluación de la Falla de la Cordillera Blanca como Fuente Sismogénica Lineal	240
6.4	Longitud de Ruptura	242
6.5	Ley de Atenuación	243
6.6	Evaluación del Riesgo Sísmico	244
6.7	Conclusiones	245
CAPITULO VII	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
7.1	Introducción	252
7.2	Conclusiones	252
7.3	Recomendaciones	256
ANEXOS		258
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		279
LISTA DE PLANOS		285

INTRODUCCION

Recientemente se llevó a cabo en la Universidad Nacional de Ingeniería con el patrocinio de la Corporación de Desarrollo de Ancash y el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) el "Estudio de Vulnerabilidad Sísmica de las Ciudades de Huaraz y Chimbote del Departamento de Ancash".

Como parte de dicho estudio se ha evaluado el peligro sísmico de las ciudades de Huaraz y Chimbote, utilizando técnicas probabilísticas especialmente desarrolladas para el efecto. Esta metodología involucra la determinación de fuentes generadoras de sismos, las leyes de recurrencia sísmica que gobiernan a estas fuentes y las leyes de atenuación de la energía sísmica para evaluar las intensidades ó aceleraciones esperadas.

En el presente estudio se ha extendido las localizaciones de la evaluación del peligro sísmico a todo el departamento de Ancash utilizando nuevos parámetros de recurrencia - determinados en base a datos sísmicos revisados y verificados. Para ello, se ha revisado completamente la información contenida en los catálogos sísmicos peruanos existentes, de cuya revisión se ha confeccionado a su vez un catálogo depurado y actualizado. Asimismo, como resultado de los estudios anteriores mencionados se ha concluido que era necesario modelar la falla activa de la Cordillera Blanca, emplazada en el departamento de Ancash, para estudiar sus efectos en los valores esperados obtenidos sin considerar dicha falla.

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa el riesgo sísmico para todo el Departamento de Ancash utilizando el programa de cómputo RISK con los parámetros sísmicos propuestos en el presente estudio, y se comparan los resultados con aquellos obtenidos utilizando los parámetros propuestos por Casaverde y Vargas (1982). Los parámetros de recurrencia propuestos en este estudio son obtenidos en base a los datos de un catálogo de hipocentros revisado y depurado. Asimismo, se pretende modelar la falla de la Cordillera Blanca utilizando diversas metodologías que todavía no han sido utilizadas en el Perú, específicamente el programa de cómputo FRISK.

El desarrollo de todo el estudio ha sido condensado en 7 capítulos, los cuales cubren los objetivos propuestos.

El Capítulo I tiene un carácter introductorio en donde se expone en forma muy general sobre la importancia de los estudios de un riesgo sísmico y su aplicación en el diseño de las estructuras. Asimismo, se presenta los objetivos que se persiguen con el presente trabajo.

En el Capítulo II, se presenta un resumen de los principales estudios sobre riesgo sísmico realizados en el Perú que han utilizado técnicas probabilísticas, específicamente la desarrollada por Cornell (1968) y modificada por McGuire (1976) con su programa de cómputo RISK. De cada uno de estos estudios realizados se ha tratado de presentar la in

formación más relevante como son los parámetros de recurrencia sísmica, las leyes de atenuación utilizadas y los resultados mismos del estudio.

El Capítulo III corresponde a la revisión de los catálogos sísmicos de hipocentros peruanos existentes, específicamente el elaborado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), de los Estados Unidos, catálogo que tiene información hasta 1981. Esta revisión se realizó con la finalidad de verificar la consistencia de sus datos dado que ello constituyeron la fuente de datos para poder desarrollar el estudio de riesgo sísmico; la inquietud de revisar la fuente de datos nace como resultado de la revisión de los estudios realizados anteriormente quienes en sus cálculos incorporan sismos calculados por los mismos autores, pero que no han sido incorporados en ningún catálogo. Basados en esta revisión se elaboró en la Universidad Nacional de Ingeniería un catálogo depurado y actualizado hasta 1982, denominándosele "Catálogo de Hipocentros Peruanos ECOSIS-UNI, 1984".

En el Capítulo IV, siguiendo la metodología propuesta por Cornell se evalúa probabilísticamente el peligro sísmico de todo el Departamento de Ancash en base a las fuentes sismogénicas y ley de atenuación propuestas por Casaverde y Vargas. Se utiliza el programa de cómputo RISK para determinar las aceleraciones esperadas para varios períodos de retorno. Los cálculos para determinar el riesgo sísmico se realizaron utilizando los parámetros sísmicos propuestos en este estu -

dio utilizando como fuente de datos el catálogo NOAA corregido, y se compara con los resultados obtenidos utilizando los parámetros de Casaverde y Vargas (1982). Adicionalmente se utiliza el catálogo ECOSIS-UNI, 1984, para calcular los parámetros de recurrencia, pero dada la similitud de los resultados (comparando con los obtenidos del catálogo NOAA corregido), no se ha presentado dichos resultados.

El Capítulo V se basa en el estudio realizado por la compañía consultora Woodward-Clyde (1984) para ELECTROPERU sobre la actividad sísmica de la falla de la Cordillera Blanca. Se presenta además los resultados obtenidos en dicho estudio, las cuales sirvieron para modelar dicha falla como una fuente sismogénica lineal.

En el Capítulo VI se modela la falla de la Cordillera Blanca como una fuente sismogénica lineal y se evalúa el riesgo sísmico debido a dicha fuente, utilizando el programa de cómputo FRISK. Se compara su efecto con los estudios anteriores.

Finalmente en el Capítulo VII se presentan las conclusiones finales para el presente estudio, así como algunas recomendaciones para trabajos similares o complementarios.

CAPITULO I

ASPECTOS BASICOS

1.1 GENERALIDADES

1.2 OBJETIVOS DEL PRESENTE ESTUDIO

1.1 GENERALIDADES

Las rocas, debido al esfuerzo tectónico se deforman y acumulan energía potencial; si la deformación sobrepasa el límite de la resistencia de las rocas, éstas se fracturan.

Tal proceso instantáneo de liberación de energía constituye un sismo; la liberación de la energía acumulada es mediante radiación de ondas y deformación permanente; las ondas al llegar a la superficie en la zona epicentral produce oscilaciones y deformaciones transitorias que causan en algunos casos, destrucción o daños en las estructuras.

Los sismos constituyen los fenómenos naturales más destructivos que traen consigo grandes pérdidas de vidas humanas y materiales, repercutiendo en la economía de los lugares afectados; por lo tanto una de las mayores preocupaciones de las sociedades asentadas en zonas propensas a la ocurrencia de sismos es la predicción de futuros sismos devastadores, para de esta forma buscar un diseño de las estructuras tal que se les provea de seguridad contra estos sismos, evitando pérdidas humanas y materiales.

Una forma de diagnosticar el probable comportamiento sísmico de un lugar es mediante la evaluación del riesgo sísmico en términos probabilísticos. Un estudio de riesgo sísmico está orientado hacia la estimación probable de que suceda un evento sísmico en el futuro con cierta intensidad y en un lapso determinado; esta intensidad puede ser representada por la aceleración, velocidad, desplazamiento, intensidad (MM), o cualquier otro parámetro del suelo.

Estas técnicas probabilísticas involucran la delineación de fuentes generadoras de sismos, las cuales están gobernadas por sus parámetros de recurrencia sísmica, e involucran fundamentalmente la utilización de las leyes de atenuación de la energía sísmica, lo cual constituyen la incertidumbre principal en los estudios de esta naturaleza.

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. Se debe indicar sin embargo, que estos resultados no consideran la influencia de las condiciones locales del suelo, ni los efectos de la interacción suelo-estructura ; asimismo excluye las implicancias sociales y económicas asociadas a los problemas de diseño.

El método probabilístico para evaluar el riesgo sísmico de un lugar ha sido desarrollado por Cornell (1968), y para su evaluación numérica, el más utilizado por los investigadores es el programa de cómputo RISK implementado por McGuire (1976); este mismo autor ha implementado el programa de cómputo FRISK (1978) para el caso de fallas geológicas generadoras de sismos.

Los resultados de un estudio de riesgo sísmico son generalmente traducidos a mapas de riesgo sísmico, que expresan la probabilidad de que una intensidad dada sea excedida en un lugar determinado dentro de un período de tiempo (típicamente 50 ó 100 años). Estos mapas de riesgo

sísmico son fundamentales para los diseñadores de las estructuras, ya que los valores obtenidos son encaminados hacia la obtención de datos utilizables para el cálculo de los parámetros sísmo-resistente de las estructuras civiles de cierta envergadura a emplazarse en la zona en estudio, y cuyos fracasos podrían causar pérdidas cuantiosas (reactores nucleares, presas, etc).

Estos mapas pueden ser utilizados también para determinar la zonificación sísmica de un país y de esta manera traducirlas a normas para la construcción.

En nuestro país, por ser una zona altamente sísmica, el estudio de la actividad sísmica y la estimación de la intensidad máxima probable es de gran importancia económico-social ya que siendo el nuestro un país en vías de desarrollo, un solo terremoto podría dislocar por completo nuestra 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.

Estas técnicas probabilísticas para la estimación del riesgo sísmico han venido siendo utilizados últimamente en el Perú por diversos investigadores en proyectos de importancia, obteniéndose en algunos casos, resultados diversos para una misma zona; ésto debido básicamente a las diferentes leyes de atenuación utilizadas por dichos autores. Los estudios más recientes han sido orientados hacia la confección de mapas de zonificación sísmica para

todo el país, los cuales representan a su vez los estudios más completos de riesgo sísmico realizados en el Perú.

1.2 OBJETIVOS DEL PRESENTE ESTUDIO

El presente estudio cubre básicamente los siguientes objetivos

Revisar la información proporcionada por los catálogos sísmicos peruanos existentes, las cuales constituyen la base para elaborar cualquier estudio de sismicidad. Esta revisión derivará en la elaboración de un nuevo catálogo depurado y actualizado con datos más recientes.

En base a este nuevo catálogo, plantear nuevos parámetros de recurrencia sísmica para las fuentes propuestas por Casaverde y Vargas.

Modelar la falla activa de la Cordillera Blanca y ver su efecto en el riesgo sísmico del departamento de Ancash

CAPITULO II

REVISION DE ESTUDIOS DE RIESGO SISMICO EXISTENTES

- 2.1 INTRODUCCION
- 2.2 SISMICIDAD, PELIGRO SISMICO Y DE TSUNAMIS EN EL AREA DE BAYOVAR
- 2.3 PELIGRO SISMICO DE LA REGION DE PIURA
- 2.4 RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE LIMA
- 2.5 MONUMENTOS HISTORICOS Y RIESGO SISMICO PARA LA ZONA DE LIMA
- 2.6 ZONIFICACION SISMICA DEL PERU
- 2.7 PELIGRO SISMICO PARA LA ZONA DEL COMPLEJO HIDROENERGETICO Y DE IRRIGACION DE OLMOS
- 2.8 PELIGRO SISMICO PARA LA ZONA DEL TRANSVASE MANTARO
- 2.9 MAPA DE DISTRIBUCION PROBABILISTICA DE INTENSIDADES DEL PERU
- 2.10 ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE LA CIUDAD DE HUARAZ
- 2.11 OTROS ESTUDIOS DE RIESGO SISMICO
- 2.12 CONCLUSIONES

2.1 INTRODUCCION

Diferentes investigadores en el Perú han realizado estudios de Sismicidad y Riesgo ó Peligro Sísmico para diversos proyectos de ingeniería de importancia, con la finalidad de establecer los parámetros sismo-resistente apropiados para el diseño de las obras del proyecto.

En los últimos años, dichos estudios han utilizado técnicas probabilísticas para estimar la probabilidad de ocurrencia de un movimiento sísmico de una intensidad prefijada ó mayor, asociada a períodos de retorno.

El presente capítulo tiene por objetivo presentar un resumen de los principales estudios sobre riesgo sísmico realizados en el Perú y que han utilizado técnicas probabilísticas. Todos estos estudios han seguido el modelo probabilístico desarrollado por Cornell (1968), complementado con el programa de cómputo RISK implementado por McGuire (1976), para evaluar numéricamente las máximas intensidades probables de ocurrencia.

Dada la metodología utilizada, todos los autores han estructurado sus estudios siguiendo la siguiente secuencia:

- 1.- delimitación de las fuentes sismogénicas ó generadoras de sismos
- 2.- análisis estadístico de cada fuente sismogénica
- 3.- determinación de las leyes de atenuación de
gía sísmica más adecuada para la zona de estudio
- 4.- evaluación del riesgo sísmico de los lugares de
interés utilizando el programa de cómputo RISK

Todos los estudios revisados presentan en su primera parte una exposición breve sobre aspectos tectónicos y en gran parte una descripción histórica de los sismos ocurridos en la zona de estudio basados principalmente en los trabajos de intensidades sísmicas realizados por E. Silgado y en catálogos sísmicos de hipocentros como los del Instituto Geofísico del Perú y el de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de los Estados Unidos.

La revisión de los aspectos tectónicos y de los sismos ocurridos en la zona de estudio conllevan a la delineación de las fuentes sismogénicas propuestas por los autores.

Sobre el análisis estadístico realizado, los autores plantean ecuaciones de recurrencia sísmica como la propuesta por Gutenberg y Richter (1958), cuya forma es:

$$\log N = a - b.M$$

donde:

N número de sismos de magnitud M ó mayor por unidad de tiempo

a,b parámetros que definen la sismicidad de la región

Todas las leyes de atenuación propuestas en los estudios referidos han sido determinadas con los pocos registros existentes en el Perú, la mayoría de ellos tomadas en Lima. Todos los estudios utilizan leyes de atenuación en función de la aceleración, sin embargo existen estudios cuyos autores han utilizado también leyes de atenuación en función de otros parámetros como: la velocidad, el desplazamiento

y la intensidad sísmica.

El riesgo sísmico es evaluado numéricamente por el programa de cómputo RISK cuyos resultados pueden ser ya sea valores de aceleración como también valores de velocidad ó desplazamiento ó intensidad en la escala Mecalli Modificada, etc. dependiendo de la ley de atenuación utilizada.

De cada uno de los estudios revisados se presenta la información más importante como : los parámetros de recurrencia, utilizados , las leyes de atenuación utilizadas y los resultados del estudio.

2.2 SISMICIDAD, PELIGRO SISMICO Y DE TSUNAMIS EN EL AREA DE BAYOVAR (Ocola et al,1977)

El objetivo principal de este estudio fue la estimación en forma probabilística del peligro sísmico del área del Complejo de Bayóvar. Para ello se utilizó la metodología desarrollado por Cornell (1968) y modificada por McGuire (1976) en su programa de cómputo RISK.

El estudio cubrió el área comprendida entre los paralelos 3°N y 14°S con los meridianos 78°W y 82°W. La Figura 2.2.1 muestra el área de estudio y también la zona de interés (Bayóvar).

Para el análisis del peligro sísmico se preparó un catálogo local con datos provenientes de los catálogos de hipocentros del NEIS y del ISC, complementados con información del catálogo del BCIS, de Gutenberg-Richter (1954), e información existente en los archivos del Instituto Geofísico -

del Perú. Dicho catálogo local comprendió sismos desde 1900 a 1976 pero con datos instrumentales a partir de Marzo de 1924. A muchos sismos ocurridos antes de 1960 que no tenían profundidad focal se les asignó convencionalmente - la profundidad de 33 Kms. El mismo problema se presentaba para las magnitudes mb (período 1924-1963), por lo que se les asignó una magnitud de 5.0 mb.

Se definieron cuatro fuentes sismogénicas para el área de estudio: Esmeralda-Buenaventura, Paita-Bucaramanga, Ica-Paita y la Zona Subandina, las que se presentan en la Figura 2.2.2.

Del análisis de la integridad del catálogo sísmico preparado, los autores calcularon los parámetros de recurrencia sísmica para cada fuente sismogénica. Esta información de la recurrencia fue completa para magnitudes iguales ó mayores que 4.5 mb para un período de 74 años. La información anterior se presenta en la Tabla N°2.2.1. En la Figura 2.2.3 se muestra la frecuencia sísmica de las cuatro fuentes, donde tres de ellas tienen la misma frecuencia con valor medio de la pendiente de 1.6 y la fuente Esmeralda-Bucaramanga con valor 0.76. Con estos valores los autores determinaron los niveles de eventos por año para cada una de las fuentes. Sin embargo, el informe no presenta las ecuaciones de recurrencia de las fuentes sismogénicas.

En este estudio los autores derivaron ecuaciones de atenuación en términos de la aceleración, una para el hemisferio norte y otra para el hemisferio sur. La existencia de dos ecuaciones se debe a que la diferencia entre la severidad

de los sacudimientos de eventos provenientes del hemisferio norte con respecto a los sacudimientos provenientes del hemisferio sur, es bien marcada:

$$a = 11.12 \times 10^{0.404Ms} (R^2 + h^2)^{-1} \dots\dots\dots (HN)$$

$$a = 0.536 \times 10^{0.50Ms} (R^2 + h^2)^{-1} \dots\dots\dots (HS)$$

Para el análisis del peligro sísmico los autores derivaron una ley de atenuación en función de la intensidad (MM), determinada con datos macrosísmicos del área de Bayóvar y zonas vecinas:

$$I = 6.55 + 2.38Mb - 2.89 \ln (R^2 + h^2)^{1/2}$$

Finalmente, los autores evaluaron el peligro sísmico para varios lugares de interés, cuyos resultados presentaban los niveles de probabilidad R(I) para los cuales en el transcurso de cualquier año; la intensidad del sacudimiento del suelo en el sitio, será igual ó excederá el nivel designado(I). Los resultados son mostrados en la figuras 2.2.4, 2.2.5 y 2.2.6.

Basados en estos resultados los autores confeccionaron para la zona en estudio mapas de intensidades máximas para un nivel de excedencia anual del 20% (figura 2.2.7) y para un nivel de excedencia anual del 2% (figura 2.2.8). Estas probabilidades corresponden a períodos de retorno de 5 y 50 años respectivamente.

2.3 PELIGRO SISMICO DE LA REGION DE PIURA (Huaco, 1979)

Este informe presenta la determinación probabilística del peligro sísmico de todo el departamento de Piura, mediante

mapas de isoaceleraciones para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

El peligro sísmico fue evaluado siguiendo la metodología - de Cornell (1968) y utilizando el programa de cómputo RISK implementado por McGuire (1976). La metodología involucra la delineación de fuentes sismogénicas, leyes de recurrencia y leyes de atenuación sísmica.

Para ello el autor determina cuatro fuentes sismogénicas - que se presentan en la Figura 2.3.1. La fuente 1 esta caracterizada principalmente por sismos superficiales que ocurren a lo largo de la costa entre Bayóvar y Guayaquil. La fuente 2 está constituida por la actividad sísmica intermedia que ocurre entre el Ecuador y la frontera Perú-Ecuador, cuyos sismos se caracterizan por ocurrir a una profundidad intermedia. La fuente 3, situada en la amazonía, está formada por sismos superficiales e intermedias. La fuente 4 se extiende paralela a la costa desde el departamento de Lambayeque hasta la ciudad de Chimbote.

Una vez delineadas las fuentes sismogénicas, el autor realizó el análisis de recurrencia de cada una de ellas utilizando sólo los eventos con $M_b \geq 4.0$. También presenta una conversión de magnitudes M_s a M_b , para utilizar los sismos anteriores a 1960. Esta relación está graficada en la Figura 2.3.2 y viene dada por la expresión:

$$M_b = 3.05 + 0.43M_s$$

Las relaciones de recurrencia de cada fuente fueron determinadas por el autor utilizando dos rangos: $4.0 \leq m_b \leq 7.0$ y $4.5 \leq m_b \leq 6.75$, pero los utilizados en el programa RISK fue

ron los calculados con el último rango. Las rectas de recurrencia son mostradas en la Figura 2.3.3 y sus ecuaciones son las siguientes:

$$\text{Rango : } 4.5 \leq mb \leq 6.75$$

Fuente 1	log N = 7.81	1.15mb
Fuente 2	log N = 7.35	1.08mb
Fuente 3	log N = 7.01	1.01mb
Fuente 4	log N = 7.77	1.15mb

Como resultado de estas relaciones determinadas, se deducieron los valores de Beta y Tasa, utilizados en el programa RISK, donde:

$$\beta = b \cdot \ln 10$$

$$V = \text{razón de recurrencia por año}$$

cuyos valores son

Fuente 1	$\beta = 2.648,$	$V = 5.60$
Fuente 2	$\beta = 2.487,$	$V = 4.01$
Fuente 3	$\beta = 2.464,$	$V = 2.03$
Fuente 4	$\beta = 2.650,$	$V = 5.11$

El informe en referencia no presentó información sobre las profundidades focales asignadas a cada fuente, ni los valores de la magnitud inferior y magnitud superior utilizadas.

La ley de atenuación utilizada ha sido la propuesta por el autor en función de la magnitud y la distancia con datos obtenidos en el Perú basados en 23 registros de aceleraciones, la mayoría de ellos en Lima.

La ecuación obtenida y presentada en el estudio para el

proyecto viene dada por la expresión:

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

donde:

a	aceleración en cm/seg^2
R	distancia en Kms
mb	magnitud basada en ondas de cuerpo

Finalmente, utilizando el programa RISK el autor evaluó las aceleraciones esperadas en todo el departamento de Piura para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Con estos resultados el autor confeccionó los mapas de isoaceleraciones para cada período de retorno (Figuras 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6 y 2.3.7). También se evaluó el peligro sísmico para lugares específicos: Piura-Catacaos y Sullana cuyos resultados de riesgo anual son graficados en la Figura 2.3.8. Se considera que el período de retorno es la inversa del peligro ó riesgo anual.

2.4 RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE LIMA (Casaverde, - 1979)

Utilizando la metodología de Cornell (1968) y el programa RISK de McGuire (1976), el autor evaluó el riesgo sísmico del departamento de Lima, en función de las máximas aceleraciones esperadas.

El área de influencia considerada en el estudio estuvo comprendida entre las coordenadas 8° a 17° de latitud sur y 71° a 81° de longitud oeste (Figura 2.4.1).

Casaverde estableció cinco fuentes sismogénicas (Figura 2.4.2) aplicables al departamento de Lima, y el análisis de re-

currencia determinó las siguientes ecuaciones:

Fuente 1	log N = 2.833	0.358M
Fuente 2	log N = 2.963	0.345M
Fuente 3	log N = 1.989	0.289M
Fuente 4	log N = 2.736	0.379M
Fuente 5	log N = 1.413	0.204M

En la Figura 2.4.3 se presentan estas rectas ajustadas por los mínimos cuadrados. Estas ecuaciones corresponden a un período de 51 años (1925-1975) habiéndose eliminado las réplicas. Los datos fueron tomados del catálogo de hipocentros del Instituto Geofísico del Perú.

La ley de atenuación utilizada en el estudio en referencia se basó en 17 registros de aceleraciones todos ellos tomados en Lima. En la Figura 2.4.4 se muestra la curva cuya expresión es:

$$\ln a = 0.82M - 2.91 - 1.00 \ln (R + 25)$$

donde:

a aceleración máxima expresado en % de la gravedad

M magnitud

R distancia epicentral en Kms

Los resultados de este estudio se resumen en dos mapas de aceleraciones: uno para aceleraciones con un 80% de probabilidad de no ser excedidas en 50 años (Figura 2.4.5) y el otro para aceleraciones con un período de retorno medio de 50 años (Figura 2.4.6).

2.5 MONUMENTOS HISTORICOS Y RIESGO SISMICO PARA LA ZONA DE LIMA (Vargas,1979)

Este estudio evaluó el riesgo sísmico de Lima utilizando la misma metodología de trabajos anteriores determinando para ello siete fuentes sismogénicas (Figura 2.5.1). Cuatro de ellas están relacionadas con la zona de Benioff, dos superficiales (profundidad menor que 70 Kms) y dos de mediana profundidad (mayor ó igual que 70 Kms). Esta división de la zona de Benioff es debida a la existencia de la cordillera oceánica de Nazca (perpendicular a la costa), alrededor de la cual cambian las pendientes dominantes en la localización de hipocentros. Dos fuentes más están asociadas a la actividad sísmica regional (Andina) y una última a la falla de Huaytapallana.

A partir de los datos del catálogo sísmico del Instituto Geofísico del Perú se obtuvieron las leyes de recurrencia de las seis fuentes cuyos gráficos se muestran en la Figura 2.5.2. La recurrencia de la fuente siete se supuso que era el promedio de las anteriores.

En la Tabla N° 2.5.1 se presentan los parámetros de recurrencia calculados y los utilizados en el Programa RISK.

Las leyes de atenuación fueron calibradas en base a las señales de terremotos procesadas por Brady y Pérez(1977).

Las figuras 2.5.3, 2.5.4 y 2.5.5 muestran las leyes de atenuación para aceleraciones, velocidades y desplazamientos. Las leyes de atenuación de aceleraciones, velocidad y desplazamientos, son las siguientes:

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

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

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

donde:

a aceleración en cm/seg^2

v velocidad en cm/seg .

d desplazamiento en cm .

M_s magnitud expresada en ondas de superficie

R distancia hipocentral en Kms .

Los resultados del análisis del riesgo sísmico para la ciudad de Lima se presentan en la Figuras 2.5.6 , 2.5.7 y 2.5.8 para aceleraciones, velocidades y desplazamientos máximos respectivamente.

2.6 ZONIFICACION SISMICA DEL PERU(Casaverde y Vargas,1980)

Este informe presentó la zonificación sísmica del Perú, basada en métodos probabilísticos. Se presentaron mapas de distribución de aceleraciones máximas en todo el Perú para períodos de retorno de 30, 50 y 100 años. Los autores utilizaron la metodología de Cornell (1968), modificado por McGuire con su programa de cómputo RISK (1976).

Con los datos sísmicos instrumentales provenientes del catálogo del Instituto Geofísico del Perú, los datos sísmicos históricos provenientes de los trabajos realizados principalmente por Silgado, además de información geotécnica

ca y geofísica, definición de fallas, estudios de los desarrollos neotectónicos, etc. realizados por diversos investigadores, se establecieron veintisiete fuentes sismogénicas cubriendo toda la zona del Perú y áreas vecinas con influencia en el Perú.

Estas fuentes sismogénicas fueron seleccionadas por los autores de tal forma que representan los procesos tectónicos que continúan trabajando en el Perú. Las características particulares de cada fuente están indicadas en el trabajo revisado.

Las Figuras 2.6.1 y 2.6.2 muestran las veintisiete fuentes sismogénicas establecidas en este estudio. Las coordenadas geográficas y las profundidades focales asignadas en cada Fuente se indican en la Tabla 2.6.1.

Una vez delineadas estas fuentes los autores procedieron a efectuar el análisis estadístico de los datos de cada una de las fuentes, calculándose sus parámetros de recurrencia sísmica (Tabla N° 2.6.2). En la Figuras 2.6.3, 2.6.4, 2.6.5 y 2.6.6 se muestran las rectas determinadas por los autores de cada fuente. Con estos valores dedujeron los parámetros utilizados en el programa RISK, y que aparecen en la Tabla N° 2.6.3.

En esta tabla se indica también las profundidades asignada a cada fuente así como también las magnitudes inferior y superior.

Las leyes de atenuación utilizadas fueron las mismas que las presentadas por Vargas (1979). Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 2.6.7, 2.6.8 y 2.6.9 que

corresponden a mapas de aceleraciones máximas esperadas en suelo firme para tres períodos de retorno (30, 50, y 100 años).

Un estudio complementario al anterior es el presentado por Casaverde y Vargas (1982), en donde presentan mapas de velocidades máximas y desplazamientos máximos esperados para los mismos períodos de retorno.

2.7 PELIGRO SISMICO PARA LA ZONA DEL COMPLEJO HIDROENERGETICO Y DE IRRIGACION DE OLMOS (Huaco,1981)

Este informe presentó la determinación probabilística del peligro sísmico para diversas zonas del Proyecto Olmos.

El informe presentó curvas de riesgo anual versus aceleración sísmica. Se utilizó el método Cornell (1968) y el Programa RISK.

Se identificaron seis Fuentes Sismogénicas (Figura 2.7.1) cuyas características más importantes fueron:

La fuente 1 abarcó casi toda la actividad sísmica de la zona cuyos epicentros están próximos a la fosa oceánica Perú-Chile. Su característica dominante es que la profundidad focal es superficial. A esta fuente se incorporan la mayoría de sismos destructores.

La fuente 2 presentó la actividad sísmica que ocurre entre la fosa y la costa, frente a la zona del Proyecto a profundidades focales entre 30 y 70 Kms. Lo importante de esta zona es que se conoce el mecanismo de fractura de muchos sismos que podrían estar asociados a la falla Illescas, constituyendo la fuente de mayor peligro po

tencial para el proyecto Osmos.

La fuente 3 abarcó el extremo noroeste de la zona y es la que mayor actividad sísmica ha presentado tanto en el período histórico como en el instrumental.

La fuente 4 representó la actividad sísmica que ocurre en el continente a una profundidad focal menor de 30 Kms.

La fuente 5 fue la más extensa e incluye toda la actividad sísmica que ocurre en el continente a una profundidad focal mayor de 70 Kms.

La fuente 6 representó a una fuente muy local.

Las coordenadas geográficas de las fuentes utilizadas se presentan en la tabla 2.7.1.

El análisis estadístico de recurrencia sísmica de cada fuente fue determinado por el autor por las siguientes ecuaciones:

Fuente 1	$\log N = 2.203 - 0.484M$
Fuente 2	$\log N = 2.673 - 0.611M$
Fuente 3	$\log N = 1.166 - 0.321M$
Fuente 4	$\log N = 1.870 - 0.493M$
Fuente 5	$\log N = 2.473 - 0.550M$
Fuente 6	$\log N = 0.606 - 0.197M$

La Figura 2.7.2 presenta la representación de estas ecuaciones. El autor utilizó la relación de transformación de mb a Ms determinada para este proyecto como:

$$m_b = 3.3 + 0.42 M_s$$

Los parámetros utilizados en el programa RISK por el autor se presenta en la Tabla N°2.7.2.

Utilizando las aceleraciones registradas en el Perú desde 1952, el autor determinó una ecuación de atenuación de aceleraciones aplicable a este proyecto, siendo su expresión:

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

donde:

a = Aceleración en cm/seg^2

M_s = Magnitud en función de ondas superficiales

R = Distancia epicentral en Kms.

Finalmente, el autor evaluó el peligro sísmico del Proyecto obteniendo las máximas aceleraciones para varios períodos de retorno. Los resultados son mostrados en la Tabla N° 2.7.3 y en la Figura 2.7.3.

2.8 PELIGRO SISMICO PARA LA ZONA DEL TRANSVASE MANTARO (Huaco, 1982)

El estudio consideró como la zona de influencia para el sitio de emplazamiento, el área comprendida entre las coordenadas 8° a 15° de latitud sur y 73° a 80° de longitud oeste. Siguiendo la misma metodología utilizada en otros proyectos, se identificaron seis fuentes sismogénicas (Figura 2.8.1) siendo sus características más importantes:

La fuente 1 abarcó casi toda la actividad sísmica cuyos epicentros están cercanos a la fosa oceánica Perú-Chile,

su profundidad focal varía de la superficie hasta los 33 Kms.

Para identificar la fuente 2 se consideró la actividad sísmica que ocurre entre la fosa y los contrafuertes andinos, a una profundidad focal entre 30 y 70 Kms. Los sismos están asociados al proceso de subducción de la placa de Nazca con la continental.

En la fuente 3 estuvieron los sismos cuya profundidad focal está comprendida entre los 70 y 150 Kms.

Todos los sismos que ocurren entre los 150 y 300 Kms. fueron tomados en la fuente 4. Los efectos en superficie no son tan severos por la distancia, pero se caracterizan por un gran área de sacudimiento.

Los sismos que ocurren dentro de la placa y específicamente en los Andes y cuya profundidad va de la superficie hasta los 33 Kms. estuvieron agrupados en la fuente 5.

Similarmente a la fuente 5, todos los sismos que ocurren en el continente a una profundidad focal entre 33 y 70 Kms. estuvieron considerados en la fuente 6.

Las coordenadas geográficas de estas fuentes se indican en la Tabla N° 2.8.1.

El autor utilizó en este trabajo la relación de transformación de mb a Ms determinada en el estudio del Proyecto de Olmos: (Huaco, 1981)

$$mb = 3.3 + 0.42Ms$$

La recurrencia sísmica de cada fuente cuyas gráficas se indican en la Figura 2.8.2 fueron determinadas por el autor mediante las siguientes relaciones:

Fuente 1	.....	log N = 2.5	- 0.514s
Fuente 2	.....	log N = 3.03	0.63Ms
Fuente 3	.....	log N = 3.61	0.70Ms
Fuente 4	.....	log N = 2.40	0.64Ms
Fuente 5	.....	log N = 2.92	0.66Ms
Fuente 6	.....	log N = 1.34	0.43Ms

Los parámetros utilizados por el autor en el programa RISK se indican en la Tabla N°2.8.2

El autor propuso una nueva ecuación de atenuación, basado en las aceleraciones de 28 sismos registrados en el Perú desde 1952.

La expresión de atenuación de aceleraciones utilizada fue:

$$a = 4359 e^{0.41Ms} (R + 40)^{-1.2}$$

Con los parámetros que aparecen en la Tabla 2.8.2 y la ley de atenuación propuesta se evaluó el peligro sísmico para varios lugares de interés calculándose las máximas aceleraciones para varios períodos de retorno. Los resultados son mostrados en la Tabla N° 2.8.3. Con estos resultados se confeccionaron los gráficos de peligro anual (inversa del período de retorno) versus aceleración, que están indicados en la Figura 2.8.3.

2.9 MAPA DE DISTRIBUCION PROBABILISTICA DE INTENSIDADES DEL PERU (Casaverde y Vargas,1982)

En este trabajo se evaluó probabilísticamente el riesgo sísmico para todo el Perú en función de la intensidad sísmica (MMI), utilizando un catálogo más actualizado con datos hasta 1980.

La metodología empleada es la misma que la utilizada en otros estudios ya realizados por los autores, utilizando además las mismas fuentes sismogénicas establecidas en Casaverde y Vargas (1980).

Con el catálogo de hipocentros actualizado del Instituto Geofísico del Perú hasta 1980, se calcularon nuevos parámetros de recurrencia (Tabla N° 2.9.1) para las veintisiete fuentes sismogénicas. Las Figs. 2.9.1, 2.9.2, 2.9.3 y 2.9.4 presentan las curvas de recurrencia obtenidas. La Tabla N° 2.9.2 muestra los parámetros deducidos para el programa RISK.

En el informe se evaluó el riesgo sísmico en términos de la intensidad (MMI) y para ello los autores presentaron una ecuación de atenuación de la intensidad sísmica determinada con los datos existentes. Su expresión es:

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

La Fig. 2.9.5 muestra el gráfico de esta ecuación propuesta considerando varios niveles de magnitud M_s .

Con los parámetros de la tabla N° 2.9.2 y la ecuación de atenuación de la intensidad se evaluó el riesgo sísmico u

tilizando el programa RISK.

En la Figs. 2.9.6, 2.9.7 y 2.9.8 se presentan los mapas de distribución de intensidades (MMI) máximas esperadas para períodos de retorno de 30, 50 y 100 años.

2.10 ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE LA CIUDAD DE HUARAZ (Ordóñez, 1984)

Se evaluó el peligro sísmico de la ciudad de Huaraz utilizando técnicas probabilísticas, específicamente la desarrollada por Cornell (1968), modificado por McGuire (1976).

Para ello se seleccionaron doce fuentes sismogénicas con influencia en el Departamento de Ancash. Las fuentes sismogénicas utilizadas son las mismas que las determinadas por Casaverde y Vargas en 1980 en su estudio de Zonificación Sísmica

Para el análisis de recurrencia sísmica el autor utilizó los datos del catálogo sísmico de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de los Estados Unidos, que tiene información de hipocentros desde 1900 hasta 1981. Sin embargo, el autor sólo consideró los sismos que ocurrieron a partir de 1963, ya que la mayoría de los sismos anteriores en dicho catálogo no contienen información sobre la magnitud mb ni tampoco sobre su profundidad focal.

Para cada una de las fuentes, a excepción de las fuentes 9 y 19, el autor realizó la distribución de la frecuencia sísmica acumulativa (número de sismos de magnitud igual o mayor a mb) cuyos gráficos fueron ajustados a rectas por el

método de los mínimos cuadrados. Estas rectas son la de forma:

$$\log N = a - bM \quad (\text{Richter, 1958})$$

donde: N es el número de sismos de magnitud mb igual ó mayor ocurridos en cierto período de años y a, b son parámetros que dependen de la región.

Las Figuras 2.10.1 y 2.10.2 muestran las rectas obtenidas y en la Tabla N° 2.10.1 se indican los parámetros calculados.

Con los datos del catálogo de la NOAA, el autor realizó una distribución de las profundidades focales para los sismos de cada fuente, a fin de determinar las profundidades representativas de cada una de ellas.

El autor determinó una relación entre mb y Ms con datos del mismo catálogo obteniéndose la ecuación:

$$M_b = 2.1 + 0.64 M_s$$

La Figura 2.10.3 muestra el gráfico de esta ecuación.

Utilizando los datos de la tabla 2.10.1, la distribución de profundidades focales y la ecuación que relaciona mb con Ms el autor calculó los parámetros de la Tabla N° 2.10.2, que constituyen parte de los datos de entrada del programa RISK.

La ley de atenuación de energía utilizada es la determinada por Vargas (1979) cuya expresión es:

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

Finalmente, se evaluó el riesgo sísmico anual en términos de la aceleración máxima. A manera de comparación se eva--

luó también el riesgo sísmico utilizando los parámetros de Casaverde y Vargas (1982). Ambos resultados son graficados en la Figura 2.10.4.

El estudio analizó también los resultados del riesgo sísmico anual en términos de nivel de confianza, períodos de retorno, tiempo de exposición sísmica etc. presentando para ello curvas de riesgo sísmico para tiempos de exposición de 1, 25 y 100 años (Figura 2.10.5) y de riesgo sísmico con un nivel de confianza del 90% (Figura 2.10.6).

En estos gráficos se presentan también resultados comparativos de riesgo sísmico obtenidos con los parámetros de Casaverde y Vargas (1982).

2.11 OTROS ESTUDIOS DE RIESGO SISMICO

El Dr. Huaco ha realizado también estudios de riesgo sísmico para otros proyectos: Zona de Relave de Chinchán(1980), la Hidroeléctrica de Machupicchu (1982) y el de la Carretera Trujillo-Juanjuí (1982), siguiendo la misma metodología de los estudios presentados en este capítulo.

Asimismo, en la UNI se han realizado también estudios de riesgo sísmico para diferentes proyectos de importancia como los de la Central Hidroeléctrica de Curumuy-Piura (1982), la Represa de Tablachaca (1983) y la autopista Lima-Ricardo Palma (1983), comparando las diferentes metodologías empleadas por diversos autores (Guzmán, 1984).

2.12 CONCLUSIONES

De la revisión de los estudios de riesgo sísmico realizados en el Perú se concluye que los efectuados por Casaverde y Vargas (1980 y 1982) resultan ser los más integrales. Las ventisiete fuentes sismogénicas propuestas en el estudio de Zonificación Sísmica cubren todo el territorio peruano y también las zonas vecinas con influencia sísmica en el Perú. Asimismo se presentan - mapas de isoaceleraciones, isovelocidades e isodesplazamientos esperados en todo el Perú para varios períodos de retorno, actualizados en el trabajo presentado en 1982. También han presentado mapas en función de la intensidad sísmica en la escala de Mercalli Modificada.

Las fuentes sismogénicas propuestas por los diferentes autores han sido modelados sólo como áreas. No se han modelado fuentes lineales para identificar algunas fallas activas.

Se requiere pues de un trabajo exhaustivo para reevaluar las fuentes generadoras de sismos e incluir estas fallas activas con características propias de recurrencia sísmica y tener de esta manera resultados de riesgo sísmico más representativos.

No ha habido un estudio integral, en conjunto, para establecer leyes de atenuación únicas aplicables en el Perú. Para cada estudio se han propuesto atenuaciones, difiriendo entre ellas sustancialmente. Esto se debe

principalmente a que éstas han sido deducidos de los pocos registros existentes en el Perú, siendo la mayoría de ellas tomadas en Lima. Es más, las atenuaciones presentadas en su mayoría son isotrópicas. Se sabe que existe anisotropía causada por la Cordillera de los Andes, por lo que se recomienda incorporar atenuaciones anisotrópicas en trabajos futuros.

En algunos estudios revisados no se ha documentado los parámetros de recurrencia determinados para la región en estudio, presentándose solamente los resultados finales.

La fuente de datos utilizado por los diferentes autores para el análisis estadístico de recurrencia, se basan en la información proporcionada por los catálogos sísmicos, cuya información es incompleta en cuanto hay carencia de magnitudes mb y profundidades focales en la mayoría de los sismos que ocurrieron antes de 1963. Dado ésto, los diferentes autores han considerado sólo los datos a partir de 1963 para efectuar el análisis de recurrencia de las fuentes sismogénicas. Algunos autores han calculado magnitudes mb y profundidades focales para algunos sismos anteriores a 1963 (sólo los sismos con influencia en la zona en estudio) para contar con un período de datos mayor. Lamentablemente esta labor resulta reservada por los mismos autores en cuanto que no se documenta estos cálculos a fin de incorporarlos en los catálogos sísmicos.

No se cuenta pues con un catálogo único de hipocentros de sismos peruanos, que sirva de fuente para realizar diferentes estudios de sismicidad, riesgo sísmico, etc. Asimismo, los catálogos existentes no están actualizados, por cuanto el catálogo con mayor cantidad de datos utilizado en estos estudios revisados, presenta información hasta 1980.

Sobre los resultados obtenidos de los diferentes estudios, podemos concluir que para la zona norte existe concordancia entre ellos, mientras que para las zonas centro y sur existe discrepancia. Esta discordancia en los resultados se debe principalmente a la discrepancia entre las diferentes leyes de atenuación propuestas y en menor grado a la consideraciones tomadas por los autores en el análisis estadístico de los datos para la obtención de los parámetros de recurrencia de las fuentes (valores más conservadores, valores más audaces, etc).

TABLA N° 2.2.1

RECURRENCIA DE EVENTOS POR ZONA SISMOGENICA Y POR AÑO

(Ocola et al, 1977)

Zona Esmeralda - Buenaventura

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

Zona Paita Bucaramanga

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

Zona Ica v Paita

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

Zona Sub - Andina

m_b	n sismo/año	Nc sismo/año	T años incomp.
> 3.75			incomp.
3.75 ⁺ - 4.25	6.7	33.02	"
4.25 ⁺ - 4.75	15.78	26.32	9
4.75 ⁺ - 5.25	8.0	10.54	10
5.25 ⁺ - 5.75	1.93	2.54	15
5.75 ⁺ - 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

Nc 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 N° 2.5.1

PARAMETROS UTILIZADOS EN MONUMENTOS HISTORICOS Y RIESGOS SISMICO PARA LA ZONA

DE LIMA (Vargas, 1979)

ZONA N°	M_{bl}	TASA ANUAL PARA M_{bl}	TASA ANUAL PARA $M_s \geq 5$	TASA OBS. * $M_s \geq 5$	TASA OBS ** $M_s \geq 5$	b calc.	Ms max	Profundidades (Kms)
I	4.7	10.5	1.31	0.31	0.95	0.958	7.6	10 - 50
II	4.7	4.32	0.28	0.27	0.22	1.259	8.6	25
III	4.3	0.95	0.08	0	0.07	0.801	5.1	25
IV	4.4	7.6	0.72	0.50	0.22	0.823	7.0	70
V	4.4	4.75	0.275	0.30	0.15	0.996	6.5	5 - 55
VI	4.1	6.14	0.45	0.23	0.66	0.788	7.3	70 - 110
VII	4.6	1.46	0.15	0.33	0.37	0.94***	5.6	5

* Período 1913 - 1962

** Período 1963 - 1976

*** Fijado igual a promedio de otras zonas

TABLA N° 2.6.1 (a)

UBICACION GEOGRAFICA Y PROFUNDIDADES FOCALES DE LAS FUENTES
SISMOGENICAS(Casaverde y Vargas, 1980)

FUENTE	COORDENADAS	GEOGRAFICAS	PROFUNDIDAD FOCAL
F-1	83.05W 04.35S	81.45W 03.50S	≤ 70 Kms
	80.90W 08.80S	79.25W 08.00S	
F-2	80.50W 08.60S	79.25W 08.00S	≤ 70 Kms
	77.10W 14.90S	76.00W 14.08S	
F-3	77.10W 14.90S	76.00W 14.08S	≤ 70 Kms
	73.70W 17.50S	72.70W 16.40S	
F-4	73.70W 17.50S	72.70W 16.40S	≤ 70 Kms
	71.30W 19.10S	69.90W 18.20S	
F-5	73.00W 16.75S	70.60W 14.10S	> 70 Kms
	70.20W 18.45S	67.20W 16.35S	
F-6	72.70W 16.40S	70.60W 14.10S	≤ 70 Kms
	69.90W 18.20S	67.20W 16.35S	
F-7	76.30W 14.30S	73.80W 12.45S	> 70 Kms
	73.00W 16.75S	71.00W 14.60S	
F-8	76.00W 14.08S	73.80W 12.45S	≤ 70 Kms
	72.70W 16.40S	71.00W 14.60S	
F-9	75.30W 11.40S	74.80W 11.40S	≤ 70 Kms
	75.30W 12.00S	74.80W 12.00S	
F-10	79.65W 08.20S	77.20W 06.80S	> 70 Kms
	76.30W 14.30S	73.80W 12.45S	

TABLA N° 2.6.1 (b)

UBICACION GEOGRAFICA Y PROFUNDIDADES FOCALES DE LAS FUENTES
SISMOGENICAS (Casaverde y Vargas,1980)

FUENTE	COORDENADAS	GEOGRAFICAS	PROFUNDIDAD FOCAL
F-11	79.25W 08.00S	77.20W 06.80S	≤ 70 Kms
	76.00W 14.08S	73.80W 12.45S	
F-12	81.25W 03.90S	79.20W 02.80S	> 70 Kms
	79.25W 08.00S	77.20W 06.80S	
F-13	81.25W 03.90S	79.20W 02.80S	≤ 70 Kms
	79.25W 08.00S	77.20W 06.80S	
F-14	81.25W 03.90S	80.60W 03.55S	≤ 70 Kms
	80.95W 04.55S	80.25W 04.20S	
F-15	82.70W 01.10S	80.60W 00.05S	> 70 Kms
	81.25W 03.90S	79.20W 02.80S	
F-16	82.70W 01.10S	80.60W 00.05S	≤ 70 Kms
	81.25W 03.90S	79.20W 02.80S	
F-17	80.60W 00.05S	76.00W 00.55S	≤ 70 Kms
	77.20W 06.80S	75.80W 05.90S	
F-18	80.60W 00.05S	76.00W 00.55S	> 70 Kms
	77.20W 06.80S	75.80W 05.90S	
F-19	77.50W 05.25S	76.75W 05.25S	≤ 70 Kms
	77.50W 05.85S	76.75W 05.85S	
F-20	77.20W 06.80S	75.80W 05.90S	≤ 70 Kms
	73.80W 12.45S	73.00W 11.90S	

TABLA Nº 2.6.1 (c)

UBICACION GEOGRAFICA Y PROFUNDIDADES FOCALES DE LAS FUENTES
SISMOGENICAS (Casaverde y Vargas, 1980)

FUENTE	COORDENADAS	GEOGRAFICAS	PROFUNDIDAD FOCAL
F-21	77.20W 06.80S	74.50W 05.10S	> 70 Kms
	73.80W 12.45S	73.00W 11.90S	
F-22	72.30W 06.70S	70.40W 06.20S	> 500 Kms
	71.10W 11.35S	69.20W 10.90S	
F-23	71.60W 13.50S	68.50W 12.00S	≤ 70 Kms
	67.20W 16.35S	67.00W 16.00S	
F-24	71.60W 13.50S	68.50W 12.00S	71 a 500 Kms
	67.20W 16.35S	67.00W 16.00S	
F-25	71.60W 13.50S	68.50W 12.00S	> 500 Kms
	67.20W 16.35S	67.00W 16.00S	
F-26	71.00W 18.92S	69.00W 17.60S	≤ 70 Kms
	71.00W 26.00S	69.00W 26.00S	
F-27	71.00W 18.92S	69.00W 17.60S	> 70 Kms
	69.00W 26.00S	65.00W 23.00S	

TABLA N° 2.6.2

PARAMETROS DE RECURRENCIA SISMICA (Casaverde y Vargas, 1980)

Período Sísmico: 1963-1976

FUENTE	M_{bl}	Tasa = $10^a M_{bl} / T$	b_{mb}
F-1	4.3	4.970	0.740
F-2	4.7	10.750	0.970
F-3	4.7	4.320	1.300
F-4	4.2	4.020	0.834
F-5	4.2	9.290	0.814
F-6	4.4	1.097	0.965
F-7	4.4	7.315	0.815
F-8	4.3	1.024	0.870
F-9	4.6	1.460	0.940
F-10	4.2	6.000	0.880
F-11	4.4	3.800	1.180
F-12	4.2	1.610	1.450
F-13	4.2	1.390	0.930
F-14	4.4	6.360	0.980
F-15	4.2	1.244	1.210
F-16	4.4	2.490	1.241
F-17	4.0	7.100	0.790
F-18	4.0	12.580	0.680
F-19	4.3	4.755	0.963
F-20	4.1	3.000	0.810
F-21	4.3	7.900	0.850
F-22	4.6	1.610	0.670
F-23	4.2	0.440	0.814
F-24	4.2	0.440	0.814
F-25	4.2	0.440	0.814
F-26	5.0	4.250	0.905
F-27	5.1	10.000	1.450

TABLA N° 2.6.3

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA RISK

(CASAVERDE Y VARGAS,1980)

FUENTE	MO	MI	BETA	RATE	PROFUNDIDADES(*)
F-1	5.0	7.38	1.0735	0.5000	10 - 50
F-2	5.0	7.60	1.4071	1.2850	10 - 50
F-3	5.0	8.60	1.8858	0.2500	10 - 50
F-4	5.0	7.10	1.2098	0.2500	10 - 50
F-5	5.0	7.50	1.1808	0.6150	70 - 110
F-6	5.0	7.30	1.3999	0.0700	5 - 55
F-7	5.0	7.00	1.1823	0.7040	70 - 110
F-8	5.0	7.40	1.2620	0.0700	5 - 55
F-9	5.0	5.60	1.3636	0.1500	5
F-10	5.0	7.00	1.2766	0.3200	70 - 110
F-11	5.0	7.25	1.7117	0.1300	5 - 55
F-12	5.0	6.50	2.1034	0.0130	70 - 110
F-13	5.0	7.00	1.3491	0.0624	5 - 55
F-14	5.0	7.10	1.4216	0.3900	5
F-15	5.0	6.90	1.7553	0.0220	70 - 110
F-16	5.0	7.80	1.8002	0.0710	5 - 55
F-17	5.0	7.30	1.1460	0.3530	5 - 55
F-18	5.0	7.90	0.9864	0.9500	70 - 110
F-19	5.0	7.50	1.3970	0.2400	5
F-20	5.0	7.30	1.1750	0.1700	5 - 55
F-21	5.0	6.75	1.2330	0.5650	70 - 110
F-22	5.0	7.50	0.9719	0.3200	525 - 660
F-23	5.0	7.10	1.1808	0.0300	5 - 55
F-24	5.0	7.00	1.1808	0.0300	70 - 110
F-25	5.0	7.50	1.1808	0.0300	525 - 660
F-26	5.0	7.75	1.3128	1.1000	10 - 50
F-27	5.0	8.00	2.1034	1.6090	70 - 110

(*) Las profundidades exactas dependen del lugar de interés

TABLA N° 2.7.1

COORDENADAS GEOGRAFICAS DE LAS FUENTES SISMOGENICAS DEL
PROYECTO OLMOS (Huaco, 1981)

FUENTE	COORDENADAS GEOGRAFICAS			
F - 1	82.00W	03.38S	82.00W	05.00S
	81.59W	08.00S	79.95W	08.00S
	80.02W	10.38S	78.60W	10.38S
	79.45W	11.00S	78.27W	11.00S
F - 2	80.85W	06.00S	80.45W	06.00S
	79.95W	08.00S	79.25W	08.00S
	78.27W	11.00S	77.46W	11.00S
F - 3	82.00W	02.00S	79.81W	02.00S
	82.00W	03.38S	79.93W	03.39S
	80.85W	06.00S	80.16W	06.00S
F - 4	78.40W	02.00S	77.08W	02.00S
	78.62W	05.38S	76.95W	05.24S
	77.04W	06.08S	76.00W	06.42S
	77.00W	07.00S	76.00W	07.00S
F - 5	79.45W	02.00S	79.40W	02.00S
	79.45W	04.83S	78.56W	04.58S
	78.89W	04.99S	78.60W	04.99S
	78.78W	05.39S	78.62W	05.38S
	78.69W	06.07S	77.04W	06.08S
	77.71W	07.00S	77.00W	07.00S
	77.00W	07.70S	76.00W	08.00S
F - 6	78.56W	08.60S	77.87W	08.03S
	77.22W	09.51S	76.66W	08.29S

TABLA N° 2.7.2

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA RISK: ZONA DEL COMPLEJO HIDROENERGETICO Y DE

IRRIGACION DE OLMOS (Huaco, 1981)

FUENTE	MAG INF	MAG SUP	β	TASA	PROFUNDIDAD (KM)
F1	4.75	8.25	1.120	0.680	30
F2	4.50	7.75	1.410	0.830	70
F3	4.50	8.00	0.740	0.680	30
F4	4.50	7.75	1.130	0.470	90
F5	4.50	8.25	1.270	0.700	30
F6	4.50	7.25	0.450	0.090	30

TABLA Nº 2.7.3

ACELERACIONES ESPERADAS PARA VARIOS PERIODOS DE RETORNO (cm/seg²): ZONA DEL COMPLEJO
HIDROENERGETICO Y DE IRRIGACION DE OLMOS (Huaco, 1981)

LUGAR ANALIZADO	PERIODOS DE RETORNO (AÑOS)			
	10	50	100	500
PRESA DE OLMOS	152	250	304	448
CENTRAL HIDROELECTRICA 1	149	243	294	429
CENTRAL HIDROELECTRICA 2	147	239	287	418
SALIDA TUNEL TRASANDINO	146	238	286	417
ENTRADA TUNEL TRASANDINO	148	239	287	418
SALIDA DEL TUNEL AL RIO HUANCAMBAMBA -QUEBRADA SHUMAYA	162	265	319	472
ENTRADA DEL DESVIO EN EL RIO MANCHARA	159	260	314	461
DESVIO DEL RIO TABACONAS	166	272	328	487

TABLA N° 2.8.1

COORDENADAS DE LAS FUENTES SISMOGENICAS: ZONA TRANSVASE MANTARO (Huaco, 1982)

FUENTE	1 LONG.W	1 LAT.S	2 LONG.W	2 LAT.S	3 LONG.W	3 LAT.S	4 LONG.W	4 LAT.S	5 LONG.W	5 LAT.S	6 LONG.W	6 LAT.S
F 1	79.40	8.00	80.00	8.00	77.40	12.00	80.00	12.00	75.20	15.00	77.09	15.00
F 2	79.30	8.00	80.00	8.20	75.90	12.80	80.00	9.80	77.50	15.00	76.70	15.00
F3-1	78.30	8.00	79.70	8.40	77.20	8.20	79.60	9.00	-	-	-	-
F3-2	76.90	8.60	79.40	9.20	78.00	9.00	79.20	9.40	-	-	-	-
F3-3	78.00	9.00	79.20	9.40	78.20	9.50	79.10	10.00	-	-	-	-
F3-4	77.20	12.00	77.90	12.70	76.60	12.65	76.10	15.00	-	-	-	-
F3-5	76.60	12.65	76.10	15.00	73.00	15.00	73.40	12.70	-	-	-	-
F3-6	76.70	10.90	73.30	10.00	76.10	9.20	74.50	9.30	-	-	-	-
F3-7	76.10	9.20	74.50	9.30	76.20	8.00	73.80	8.00	-	-	-	-
F 4	73.90	8.00	74.85	8.30	74.70	10.40	76.30	10.50	73.00	13.90	73.60	14.80
F 5	75.15	8.00	76.40	8.20	74.15	11.60	75.80	11.65	73.00	12.80	73.00	14.20
F 6	73.00	8.00	78.15	8.00	73.00	12.00	77.40	9.20	73.00	14.20	73.40	14.15

TABLA N° 2.8.2

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA RISK:ZONA DEL TRANSVASE MANTARO (Huaco, 1982)

FUENTE	MAG Ms INF	MAG Ms SUP	β	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 N° 2.R.3

ACELERACIONES ESPERADAS PARA VARIOS PERIODOS DE RETORNO (CM/SEG²):

ZONA DEL TRANSVASE MANTARO (Huaco, 1992)

LUGAR ANALIZADO	PERIODOS DE RETORNO (AÑOS)				
	10	50	100	500	
11.40 S. 76.33 W	177	264	308	430	
11.41 S. 76.29 W	177	264	309	432	
11.36 S. 76.28 W	178	265	310	433	
11.29 S. 76.16 W	183	273	319	449	
10.92 S. 76.27 W	176	262	308	432	

TABLA N° 2.9.1

PARAMETROS DE RECURRENCIA SISMICA OBTENIDAS POR
CASAVERDE Y VARGAS (1982)

Período Sísmico : 1963-1980

FUENTE	M_{bl}	Tasa= $10^{a_{Mbl}}/T$	b_{mb}
F-1	4.3	4.600	0.712
F-2	4.7	8.394	0.987
F-3	4.7	4.620	1.241
F-4	4.2	3.631	0.820
F-5	4.2	8.854	0.835
F-6	4.4	1.201	0.916
F-7	4.4	6.886	0.880
F-8	4.3	1.281	0.965
F-9	4.6	1.456	0.940
F-10	4.2	5.325	0.760
F-11	4.4	3.417	1.086
F-12	4.2	1.534	1.210
F-13	4.2	1.273	0.762
F-14	4.4	5.070	0.987
F-15	4.2	1.081	1.260
F-16	4.4	2.403	1.200
F-17	4.0	6.275	0.742
F-18	4.0	11.309	0.670
F-19	4.3	3.920	0.940
F-20	4.1	3.001	0.690
F-21	4.3	8.121	0.830
F-22	4.6	1.467	0.610
F-23	4.2	0.434	0.800
F-24	4.2	0.434	0.800
F-25	4.2	0.434	0.800
F-26	5.0	4.775	1.030
F-27	5.1	8.887	1.400

TABLA N° 2.9.2

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA RISK
(CASAVERDE Y VARGAS, 1982)

FUENTE	MO	MI	BETA	RATE	PROFUNDIDADES(*)
F-1	5.0	7.38	1.0328	0.5030	10 - 50
F-2	5.0	7.60	1.4318	0.9690	10 - 50
F-3	5.0	8.60	1.8002	0.3060	10 - 50
F-4	5.0	7.10	1.1895	0.2350	10 - 50
F-5	5.0	7.50	1.2113	0.5450	70 - 110
F-6	5.0	7.30	1.3288	0.0860	5 - 55
F-7	5.0	7.00	1.2766	0.5470	70 - 110
F-8	5.0	7.40	1.3999	0.0638	5 - 55
F-9	5.0	5.60	1.3636	0.1500	5
F-10	5.0	7.00	1.1025	0.4210	70 - 110
F-11	5.0	7.25	1.5754	0.1500	5 - 55
F-12	5.0	6.50	1.7553	0.0270	70 - 110
F-13	5.0	7.00	1.1054	0.1000	5 - 55
F-14	5.0	7.10	1.4318	0.2960	25
F-15	5.0	6.90	1.8278	0.0161	70 - 110
F-16	5.0	7.80	1.7408	0.0760	5 - 55
F-17	5.0	7.30	1.0764	0.3744	5 - 55
F-18	5.0	7.90	0.9719	0.8870	70 - 110
F-19	5.0	7.50	1.3636	0.2110	5
F-20	5.0	7.30	1.0009	0.2557	5 - 55
F-21	5.0	6.75	1.2040	0.6153	70 - 110
F-22	5.0	7.50	0.8849	0.3356	525 - 660
F-23	5.0	7.10	1.1605	0.0300	5 - 55
F-24	5.0	7.00	1.1605	0.0300	70 - 110
F-25	5.0	7.50	1.1605	0.0300	525 - 660
F-26	5.0	7.75	1.4941	1.0022	10 - 50
F-27	5.0	8.00	2.0309	1.5093	70 - 110

(*) Las profundidades exactas dependen del lugar de interés

TABLA N° 2.10.1

PARAMETROS DE RECURRENCIA SISMICA ZONA DE HUARAZ

(PROYECTO ECOSIS-UNI, ORDOÑEZ 1984)

Catálogo utilizado N O A A
Período Sísmico 1963-1981 (T=17.82 años)

FUENTE		Tasa $10^a \text{Mbl} / T$		a	r^2
F-1	4.8	3.350	1.228	7.670	0.99
F-2	5.1	3.590	1.085	7.339	0.99
F-9	4.6	1.460	0.940	4.488	
F-10	4.7	1.580	0.724	4.852	0.91
F-11	4.7	3.440	0.991	6.445	0.99
F-12	4.1	2.380	1.232	6.678	0.96
F-13	4.7	4.080	1.191	7.459	0.97
F-17	4.6	5.330	1.137	7.208	0.97
F-18	4.7	4.800	1.018	6.717	0.98
F-19	4.3	4.755	0.940	4.719	
F-20	4.7	1.350	0.975	5.963	0.99
F-21	4.8	4.150	1.271	7.970	0.99

NOTA.- Los parámetros asignados a las fuentes F-9 y F-19 proceden de Casaverde y Vargas (1982)

TABLA N° 2.10.2

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA RISK
(PROYECTO ECOSIS-UNI, ORDOÑEZ 1984)

FUENTE	MO(Ms)	MI(Ms)	BETA	RATE	PROFUNDIDAD
F-1	5.0	7.38	1.8126	0.8141	30
F-2	5.0	7.60	1.6063	2.1757	25-35-45-55-65
F-9	5.0	6.40	1.3852	0.3210	5
F-10	5.0	6.75	1.0610	0.5806	75-95
F-11	5.0	8.40	1.4589	0.8746	5-25-35
F-12	5.0	6.50	1.8126	0.0790	85
F-13	5.0	7.00	1.7536	0.7867	30
F-17	5.0	7.30	1.6800	0.8531	30
F-18	5.0	7.90	1.5031	1.1768	100
F-19	5.0	7.70	1.3852	0.5460	5
F-20	5.0	6.90	1.4442	0.3504	30
F-21	5.0	6.75	1.8715	0.9611	120

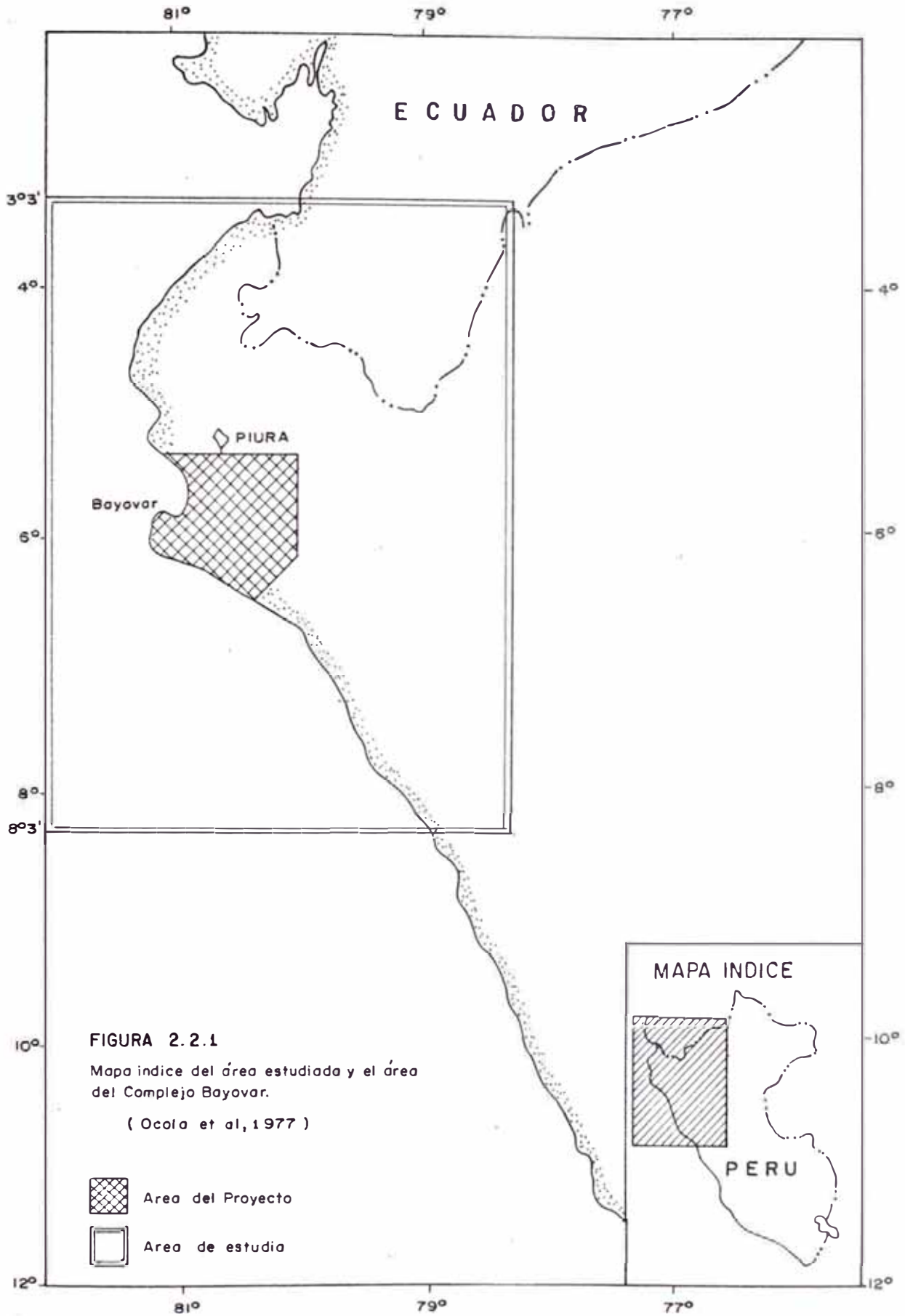

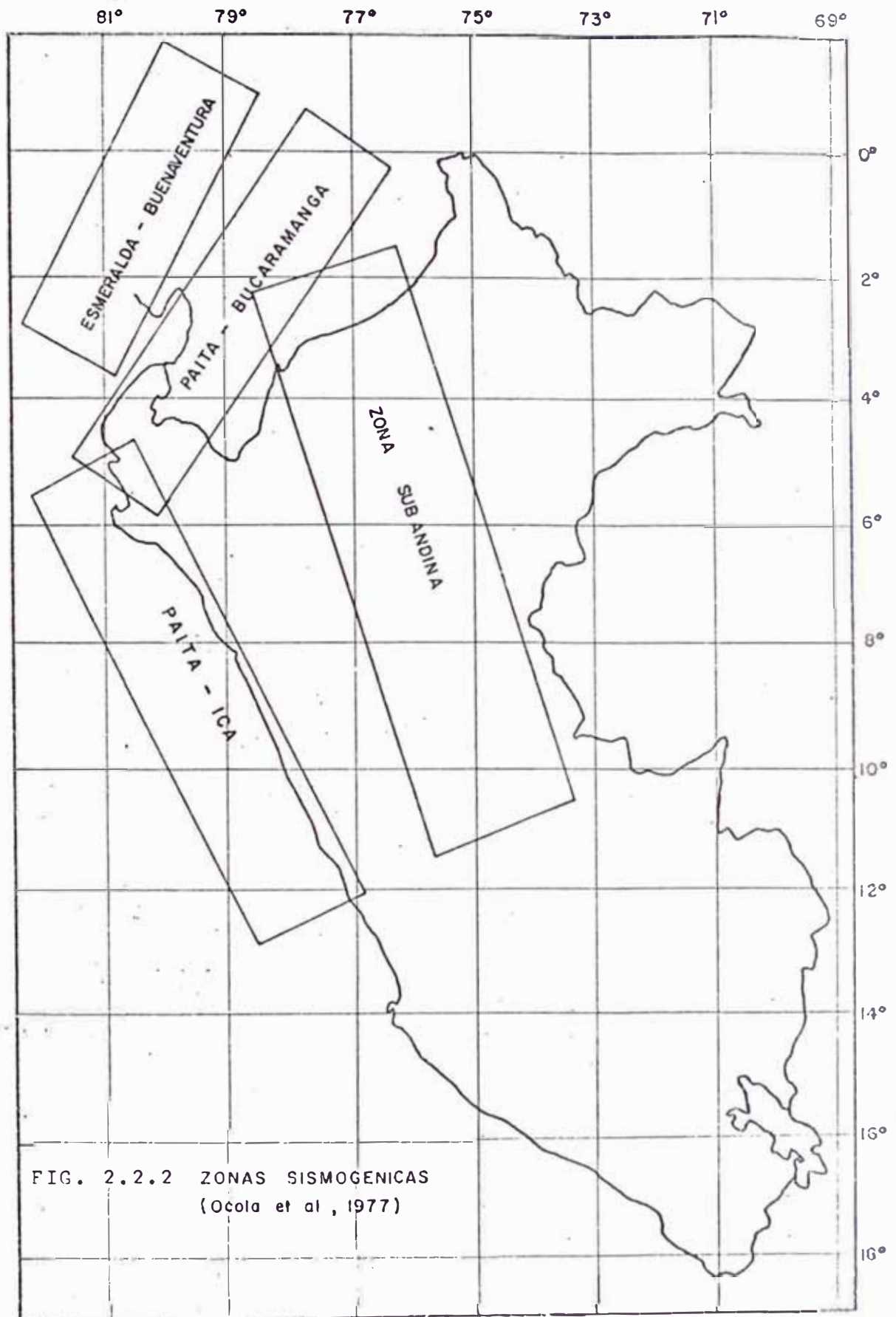


FIGURA 2.2.1
Mapa indice del área estudiada y el área
del Complejo Bayovar.
(Ocola et al, 1977)

 Area del Proyecto
 Area de estudio



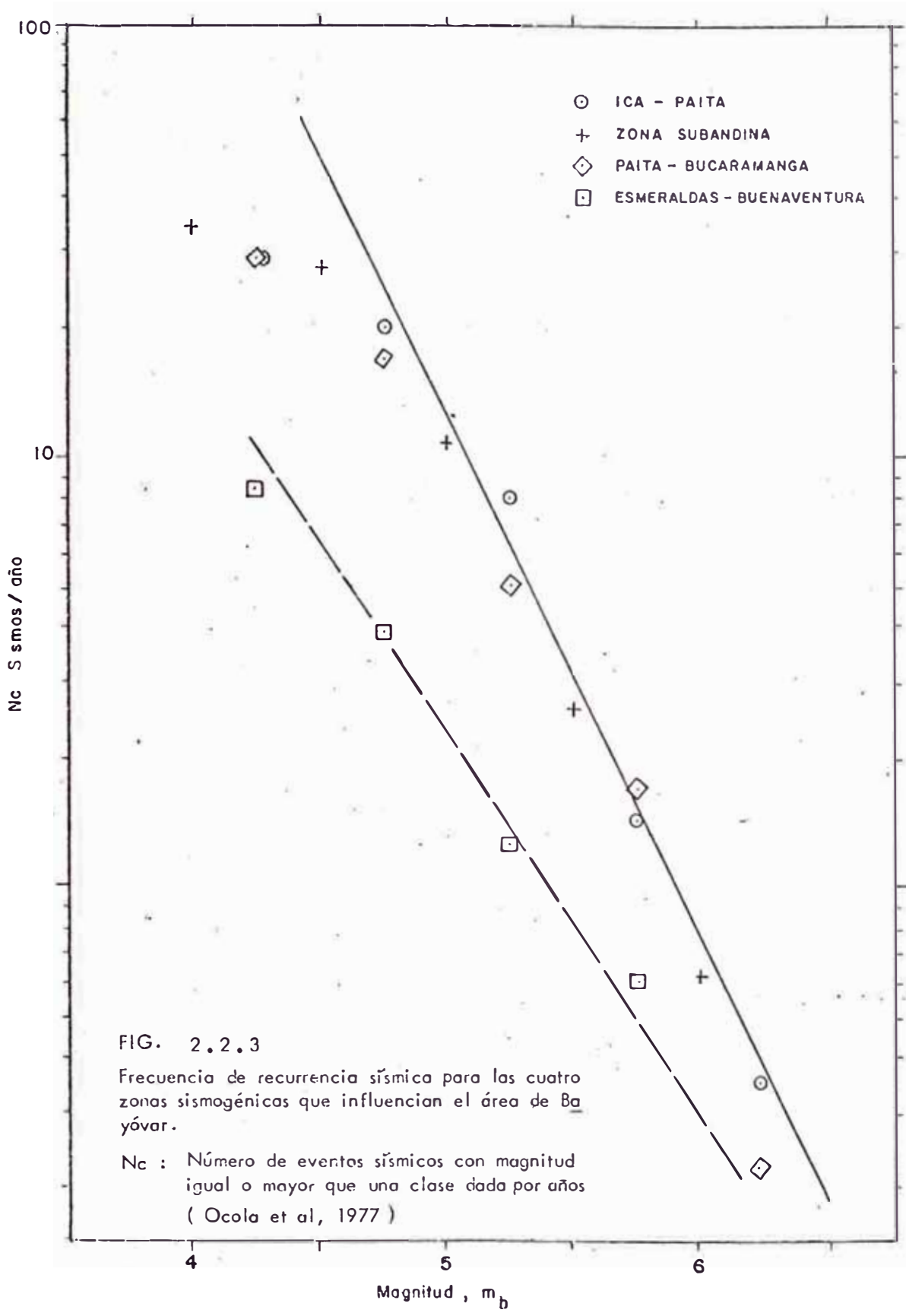
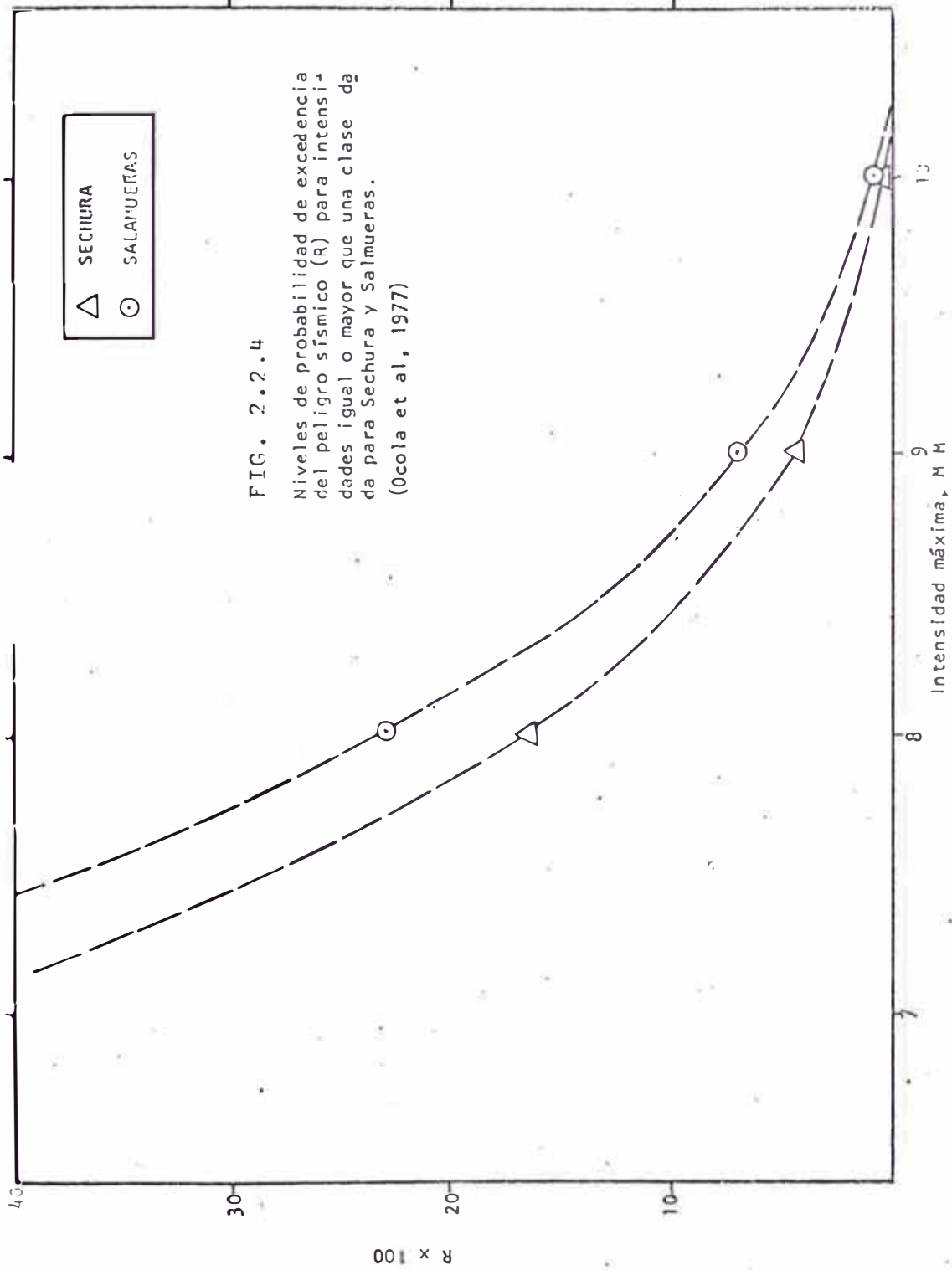
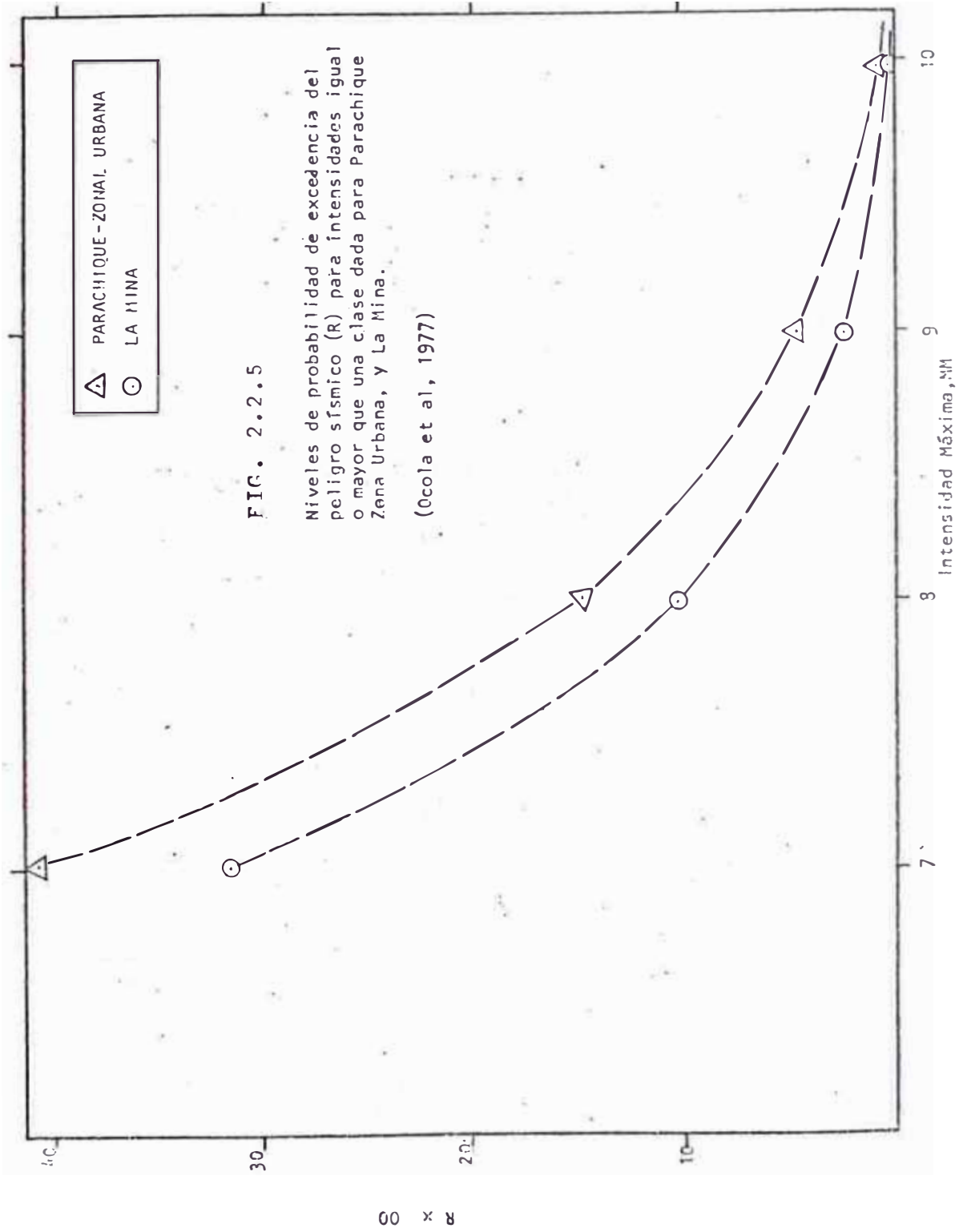


FIG. 2.2.3

Frecuencia de recurrencia sísmica para las cuatro zonas sismogénicas que influyen el área de Ba yóvar.

N_c : Número de eventos sísmicos con magnitud igual o mayor que una clase dada por años (Ocola et al, 1977)





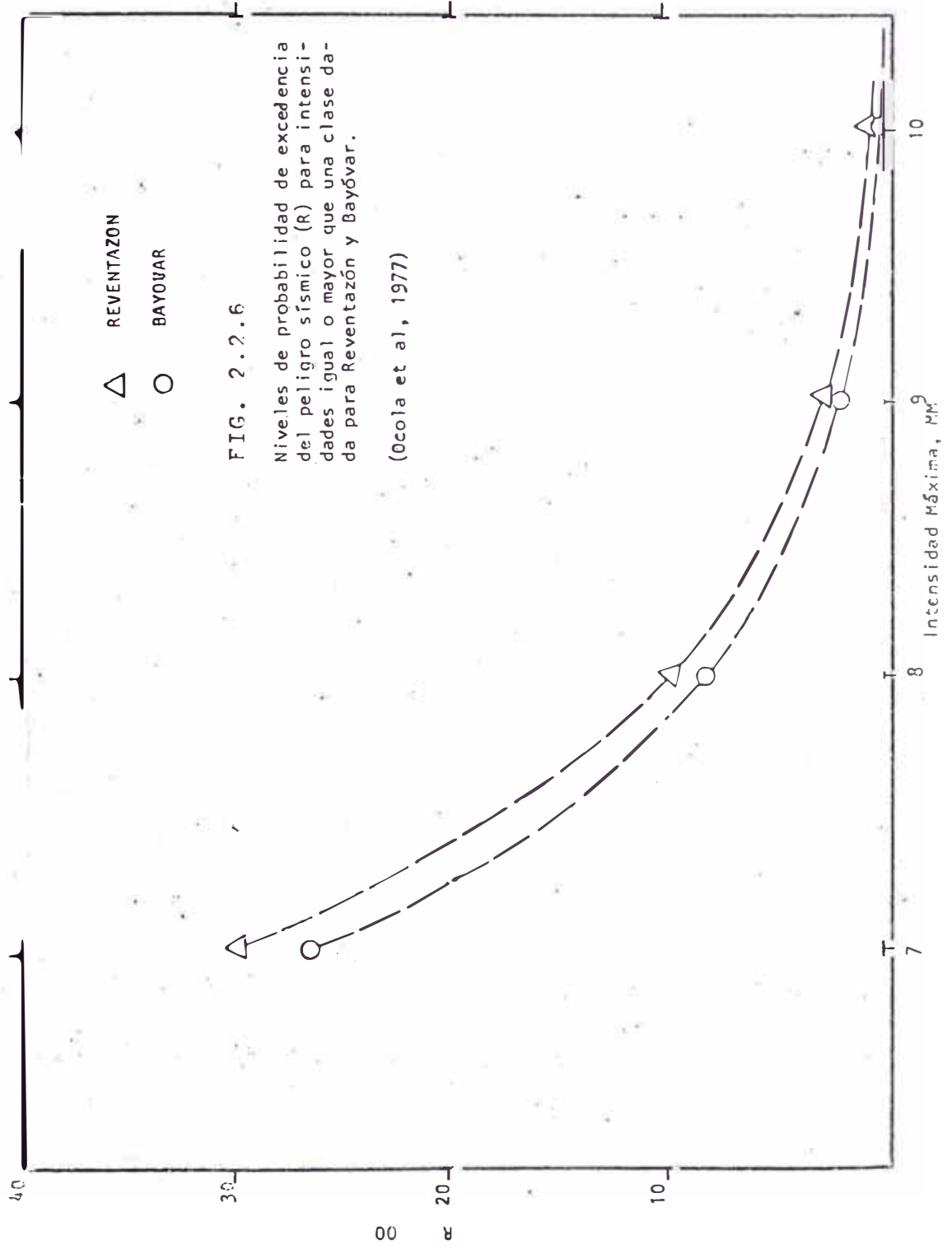


FIG. 2.2.6

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

(Ocola et al, 1977)

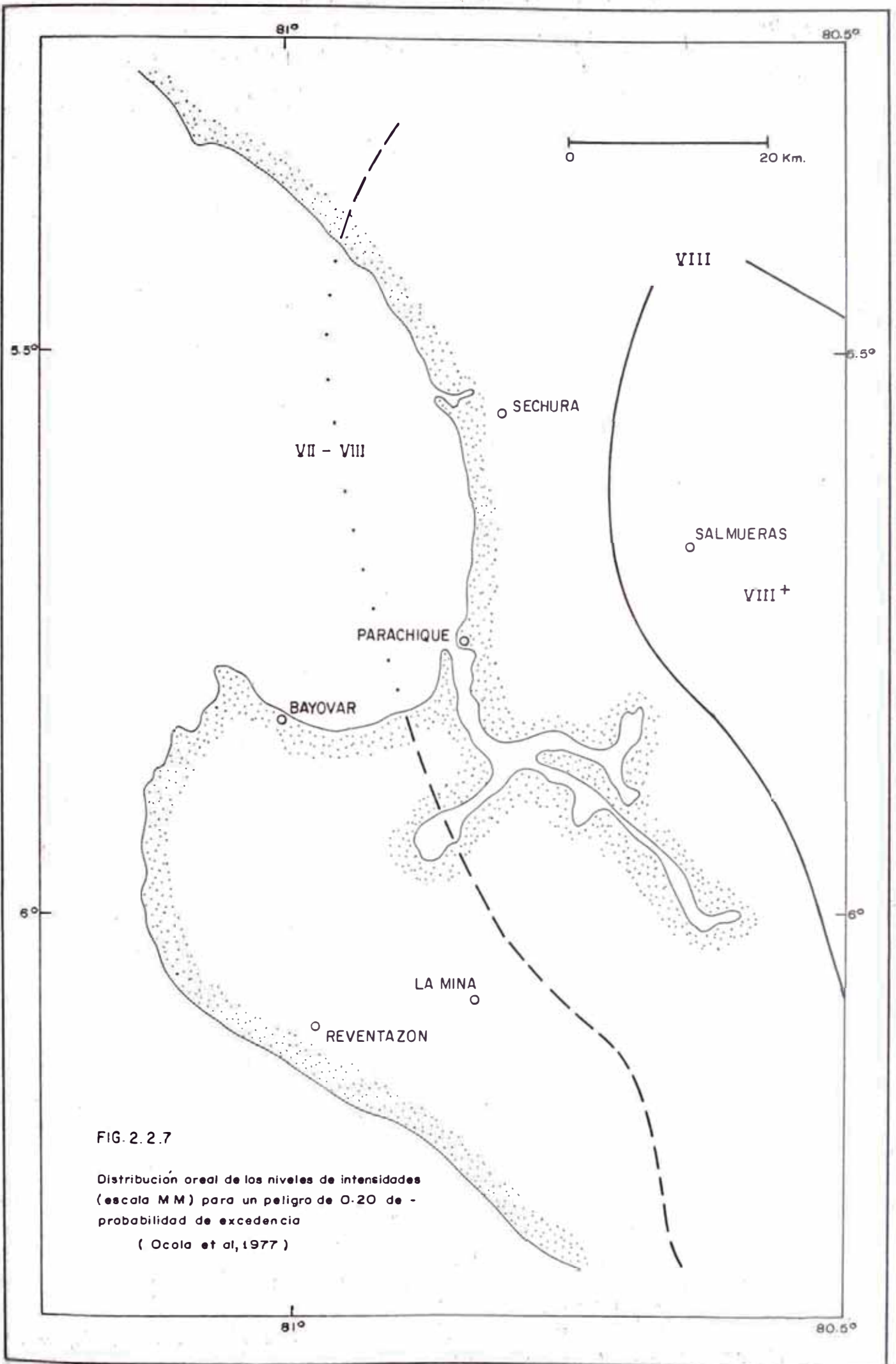


FIG. 2.2.7

Distribución areal de los niveles de intensidades
(escala MM) para un peligro de 0.20 de -
probabilidad de excedencia
(Ocola et al, 1977)

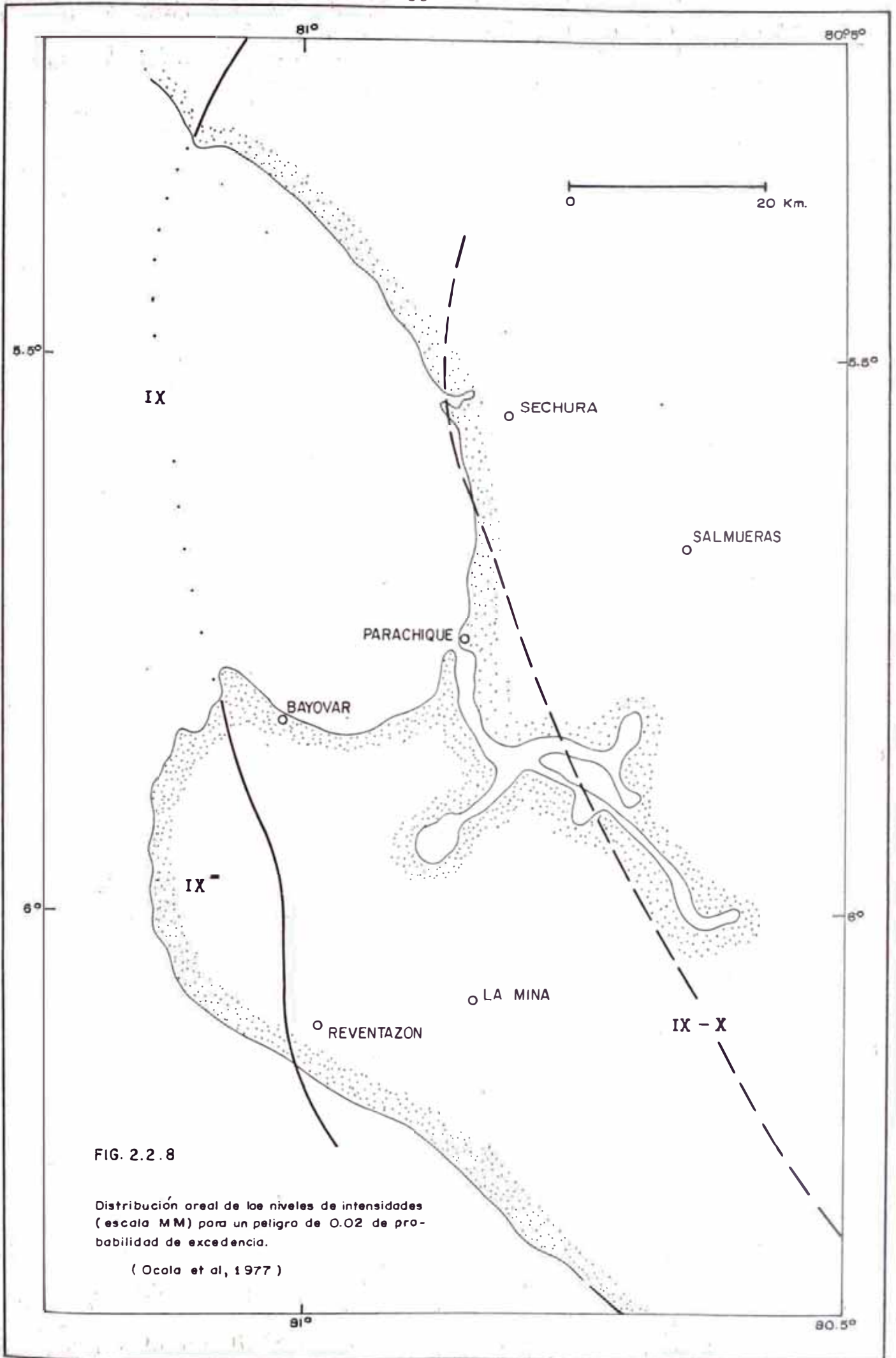


FIG. 2.2.8

Distribución areal de los niveles de intensidades (escala MM) para un peligro de 0.02 de probabilidad de excedencia.

(Ocola et al, 1977)

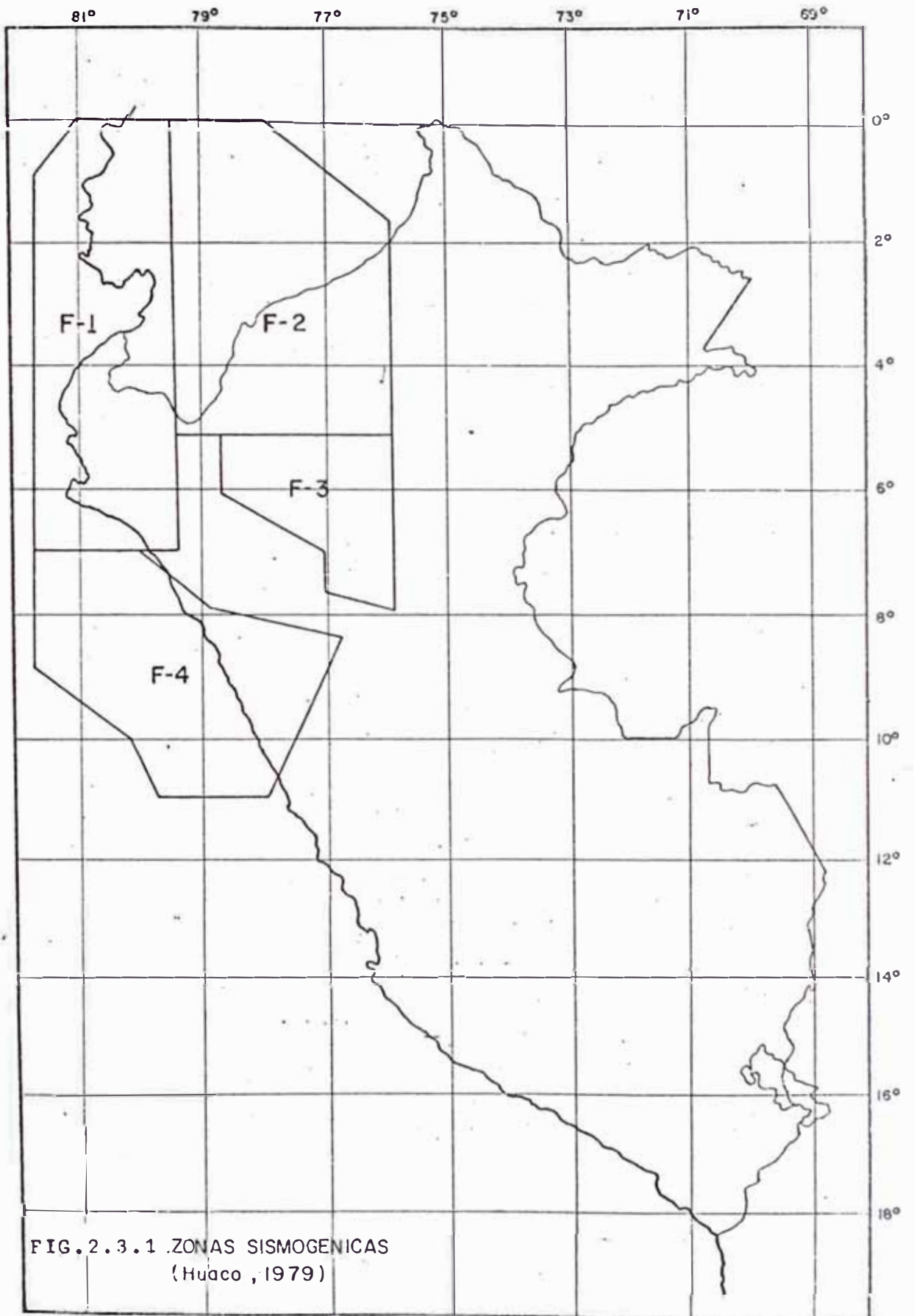


FIG. 2.3.1 ZONAS SISMOGENICAS
(Huaco, 1979)

Fig 2.3.2 - Relacion entre Magnitudes Mb y Ms
(Huaco, 1979)

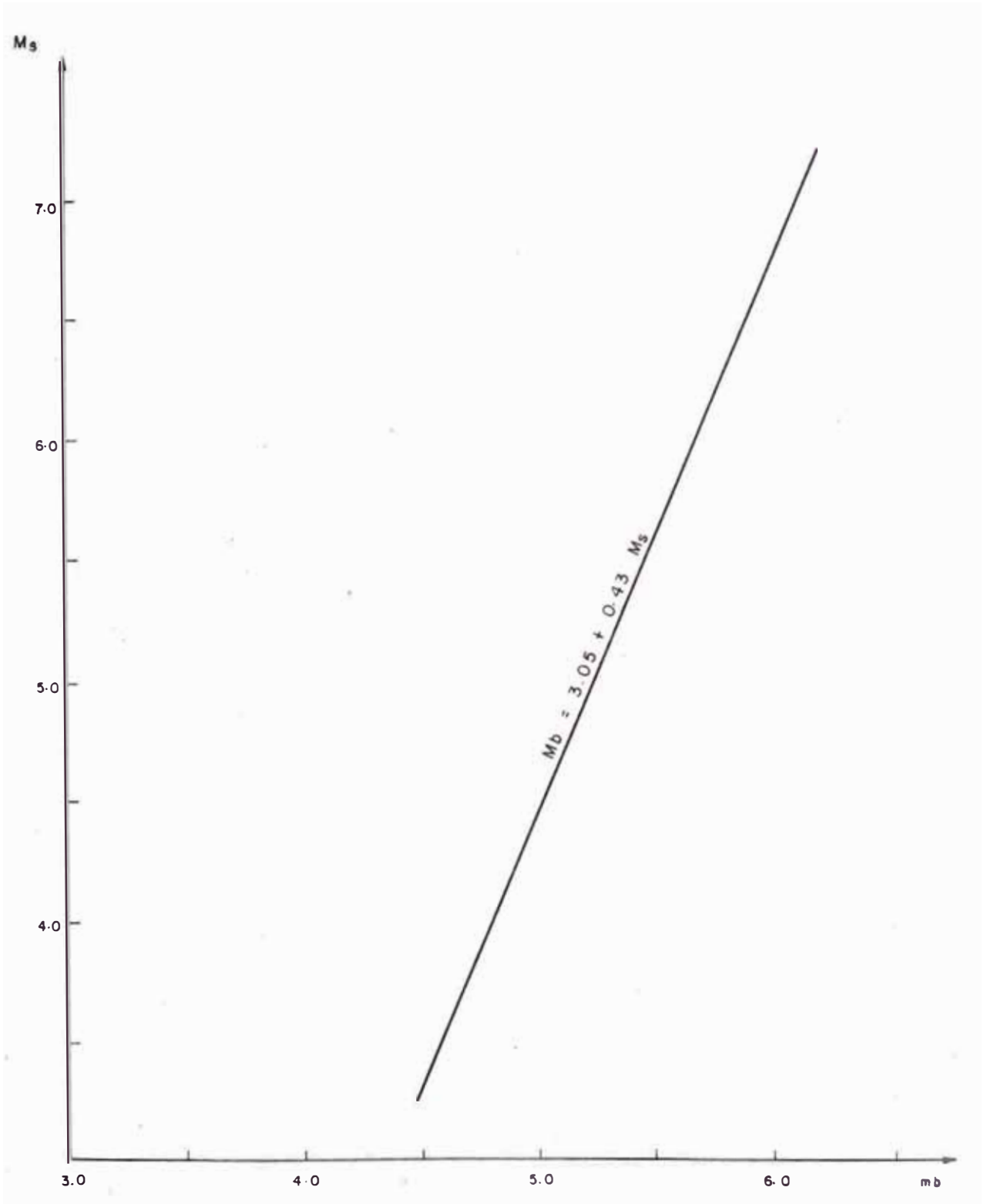
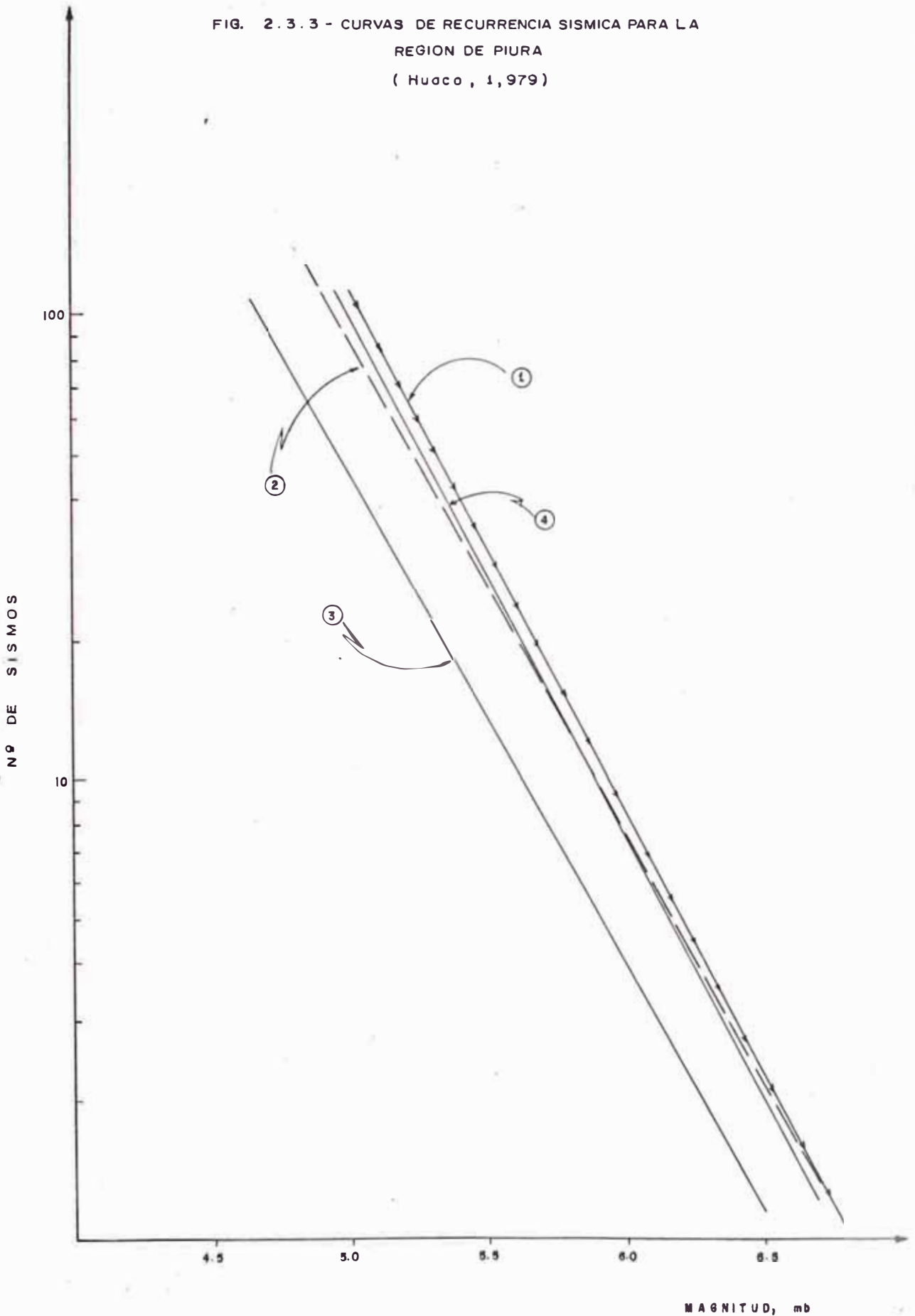


FIG. 2.3.3 - CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA PARA LA REGION DE PIURA (Huaco , 1,979)



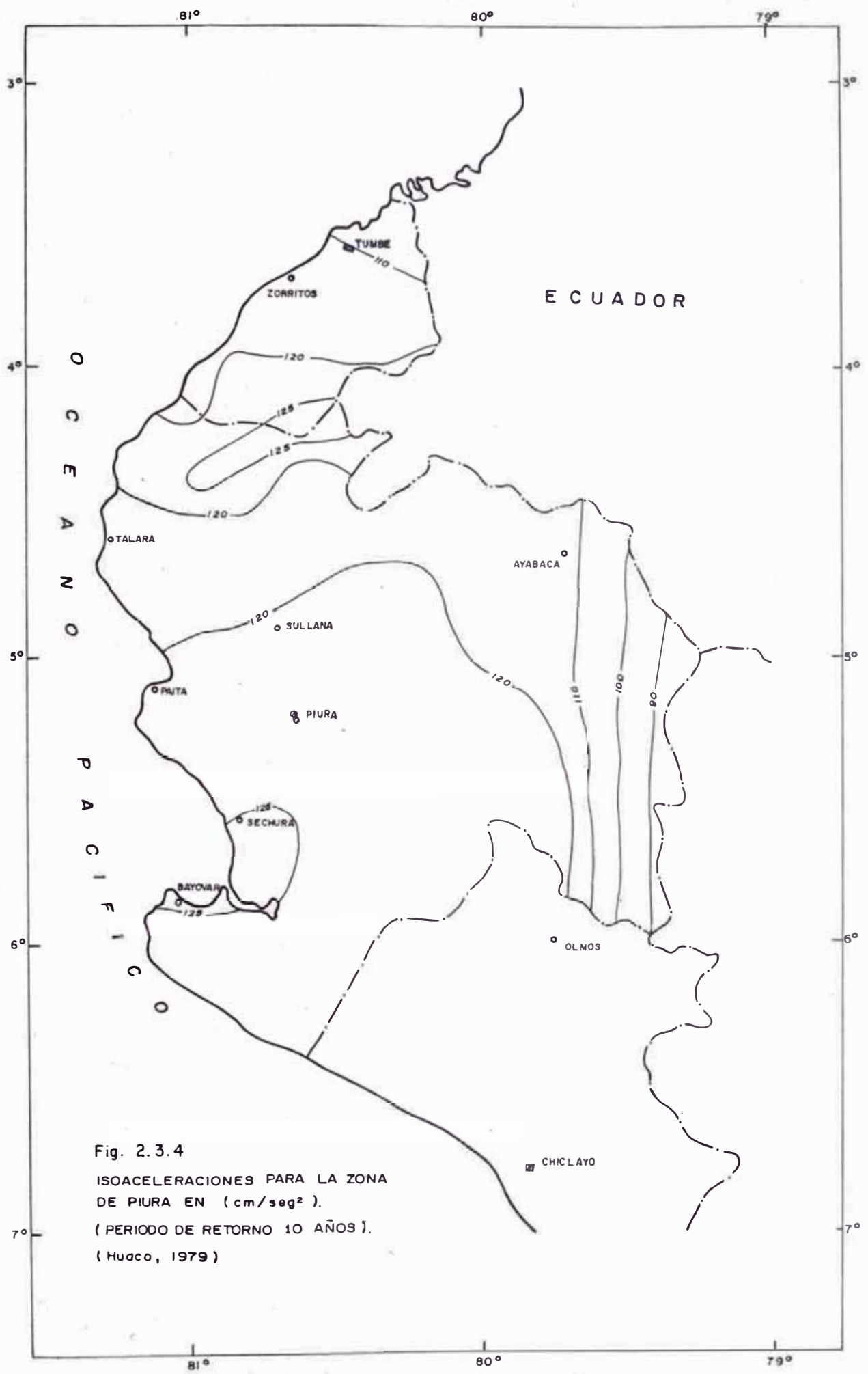
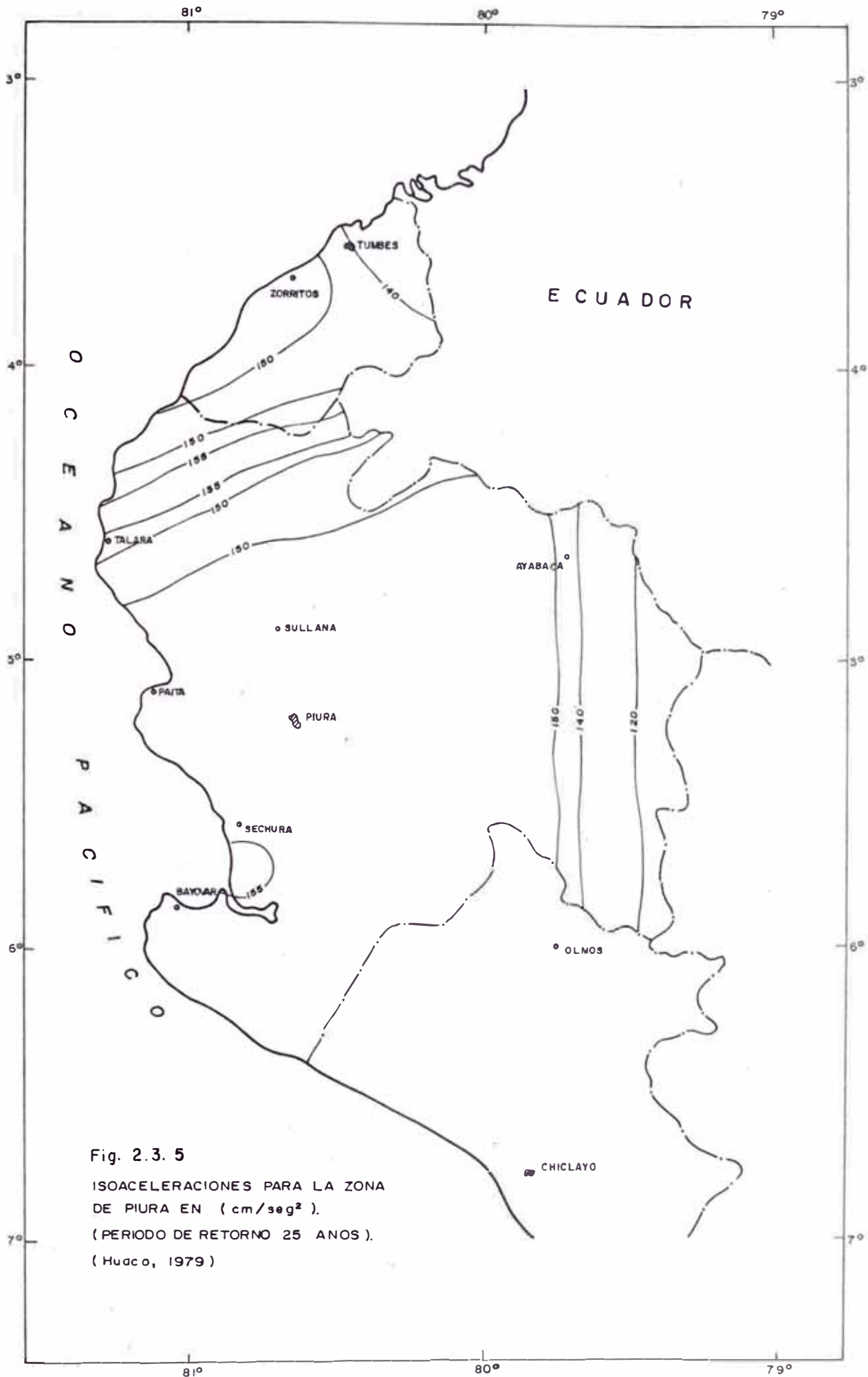


Fig. 2.3.4
ISOACELERACIONES PARA LA ZONA
DE PIURA EN (cm/seg²).
(PERIODO DE RETORNO 10 AÑOS).
(Huaco, 1979)



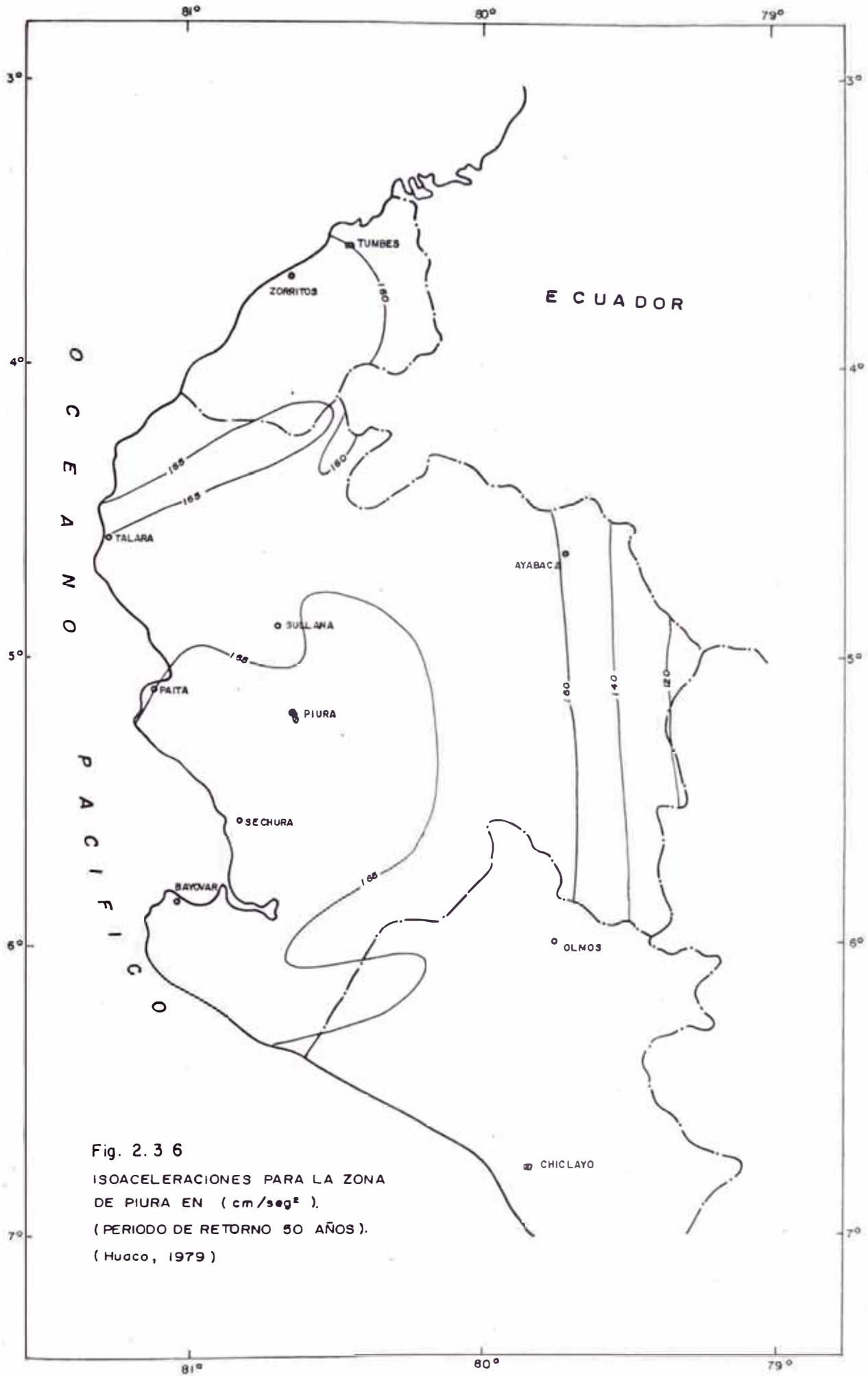


Fig. 2.36
ISOACELERACIONES PARA LA ZONA
DE PIURA EN (cm/sec^2).
(PERIODO DE RETORNO 50 AÑOS).
(Huaco, 1979)

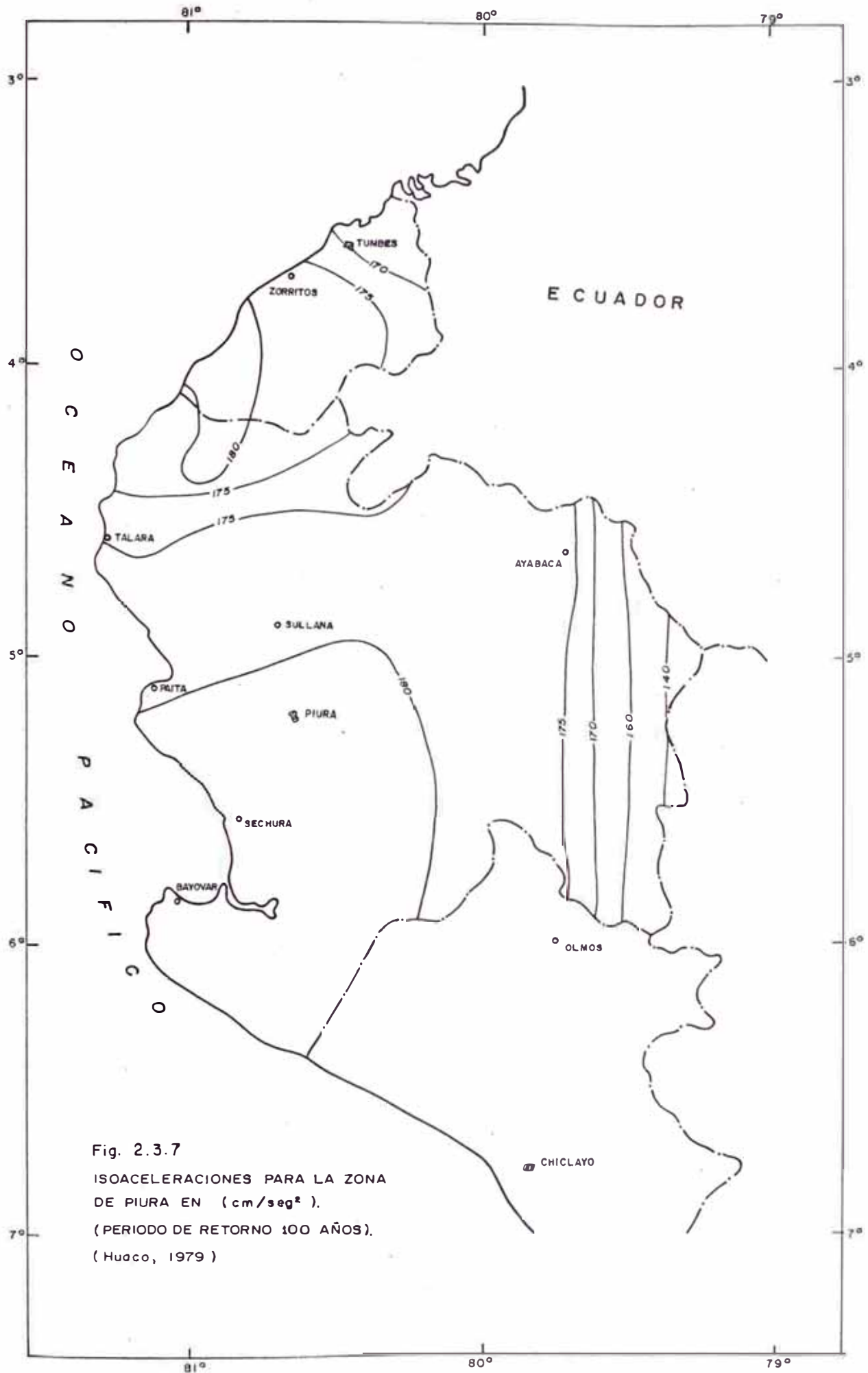
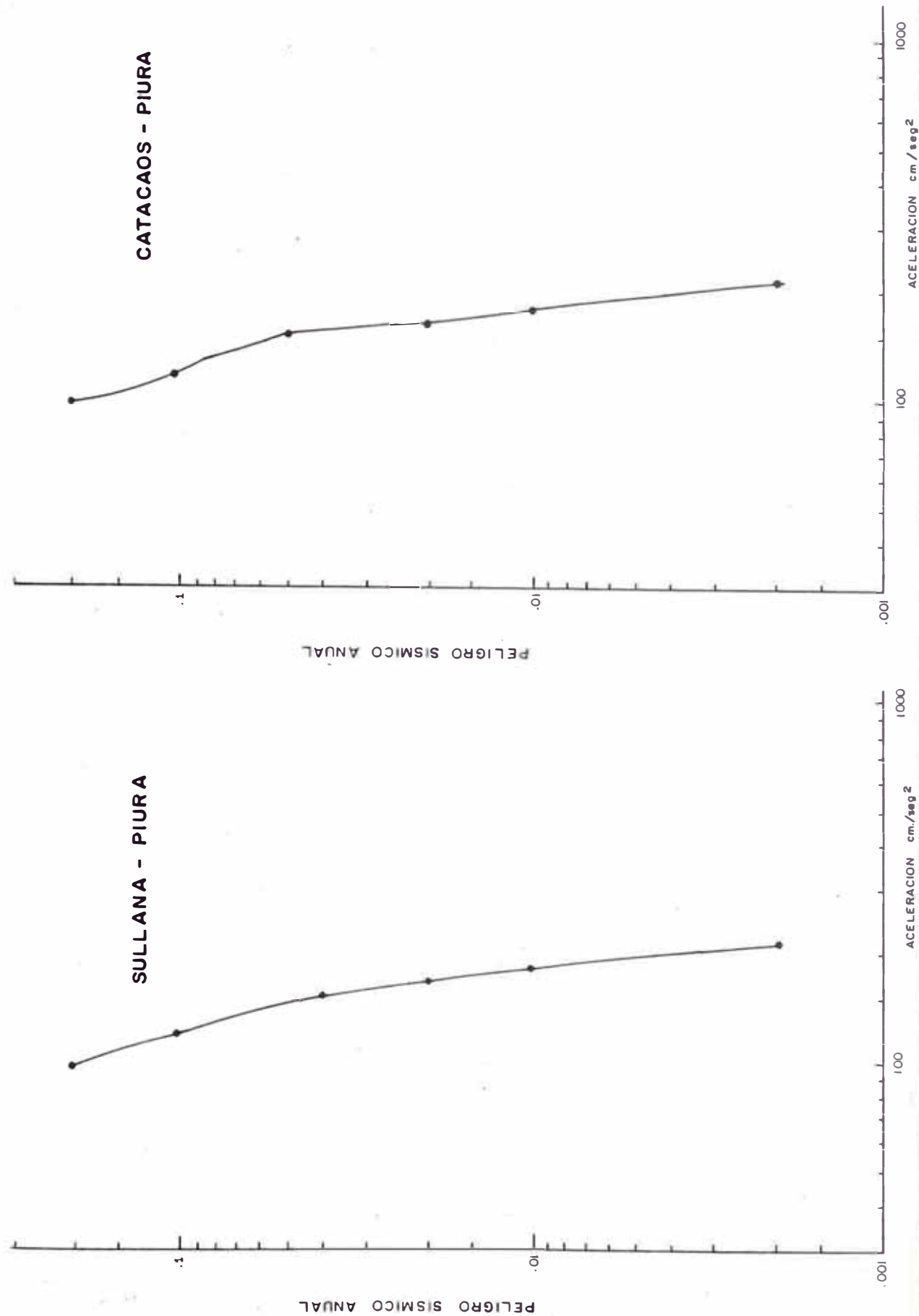


Fig. 2.3.7
ISOACELERACIONES PARA LA ZONA
DE PIURA EN (cm/seg²).
(PERIODO DE RETORNO 100 AÑOS).
(Huaco, 1979)

Fig. 2.3.8 PELIGRO SISMICO ANUAL PARA LA ZONA DE PIURA
(Huaco, 1979)



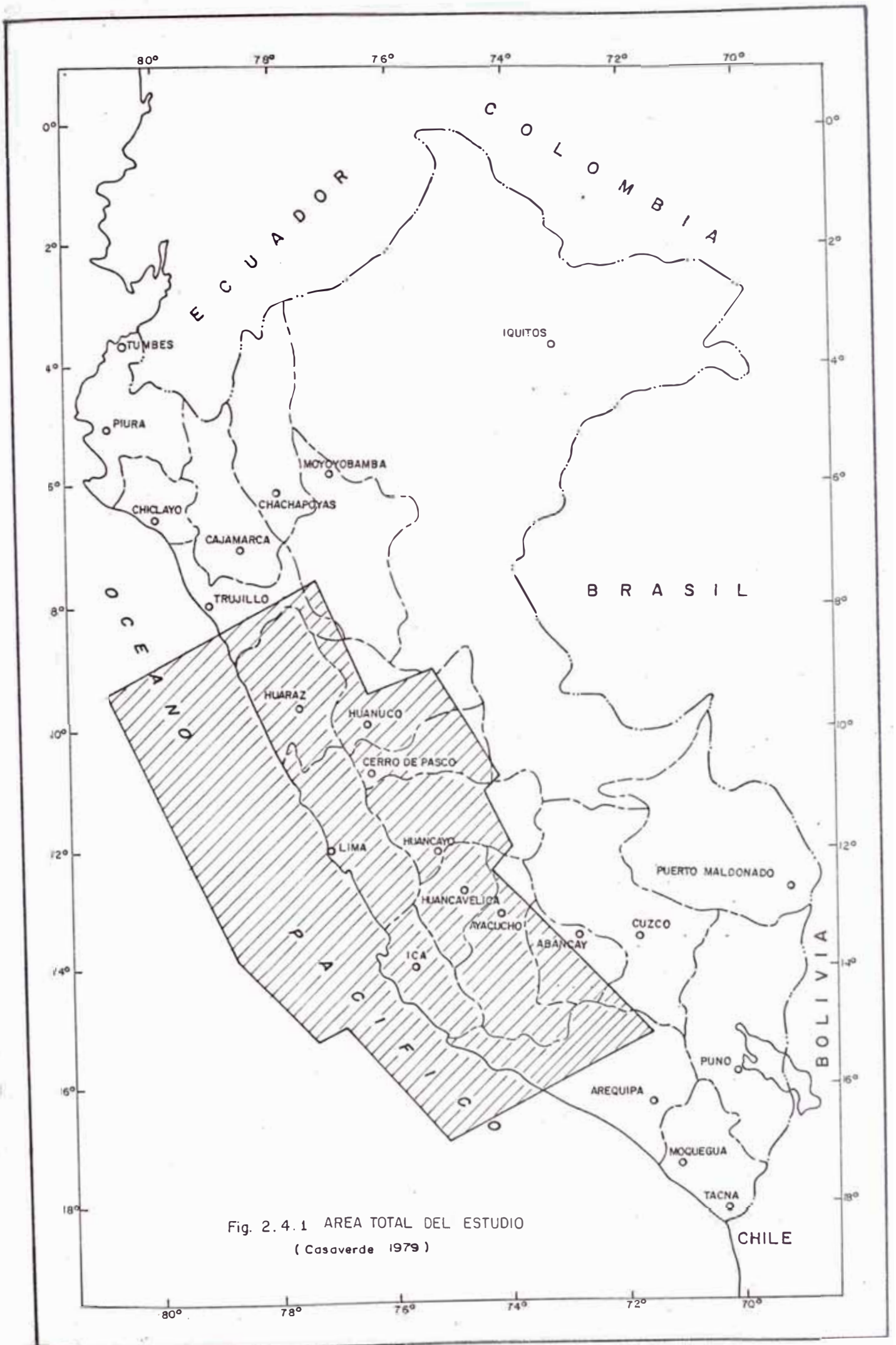


Fig. 2.4.1 AREA TOTAL DEL ESTUDIO
(Casaverde 1979)

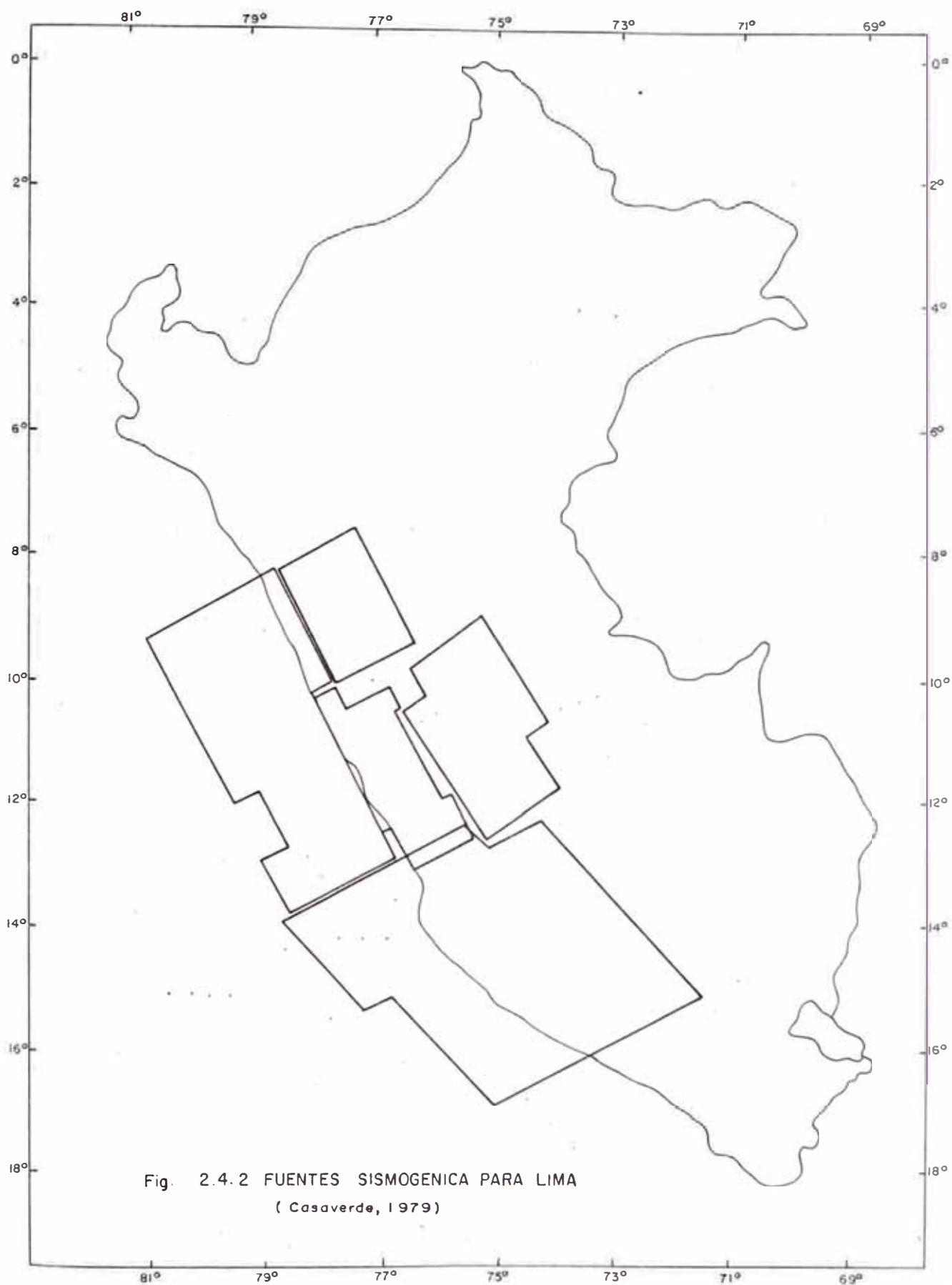


Fig. 2.4.2 FUENTES SISMOGENICA PARA LIMA
(Casaverde, 1979)

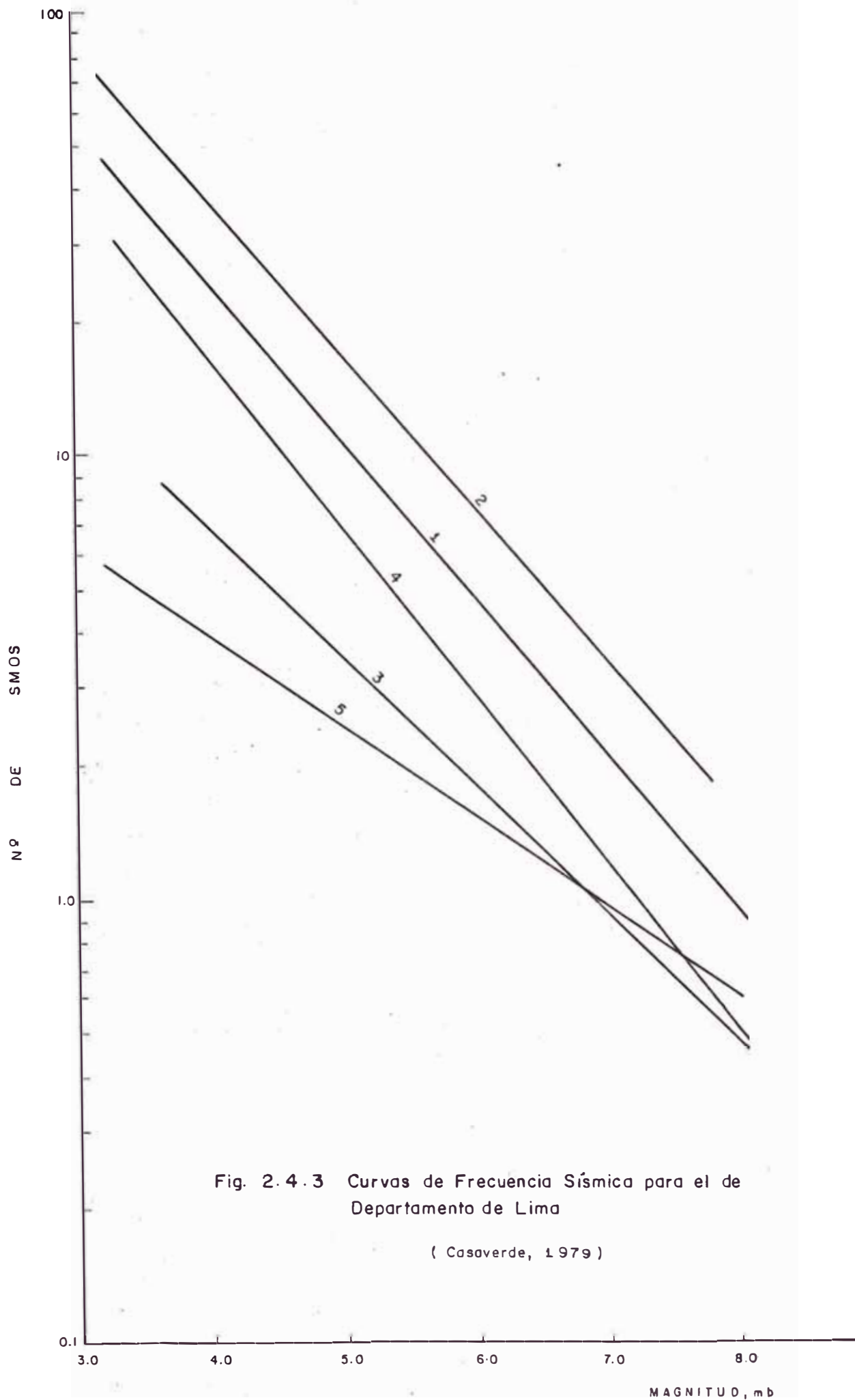


Fig. 2.4.3 Curvas de Frecuencia Sísmica para el de Departamento de Lima

(Casaverde, 1979)

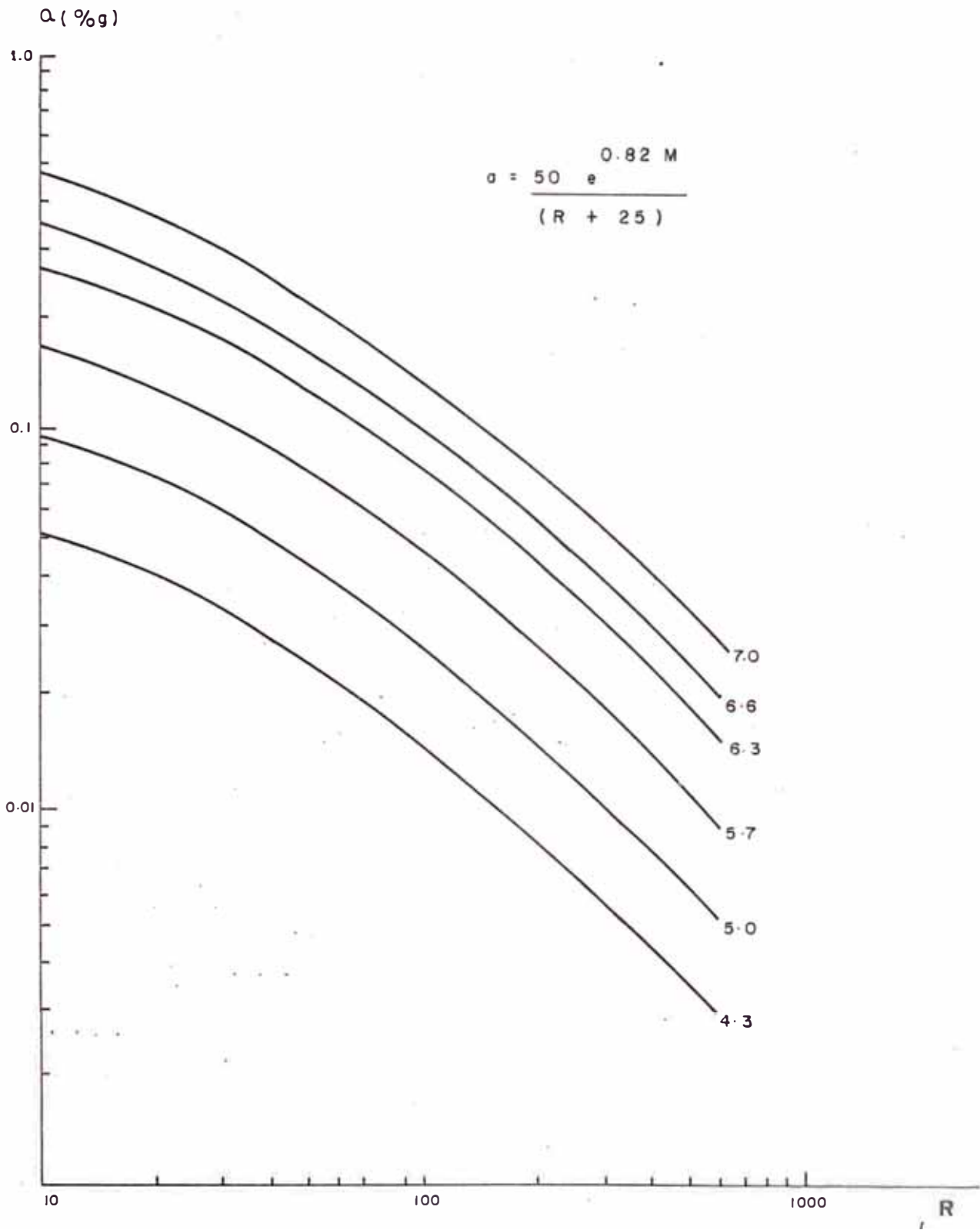


Fig. 2.4.4 Relación de Atenuación de la Aceleración
(Casaverde, 1979)

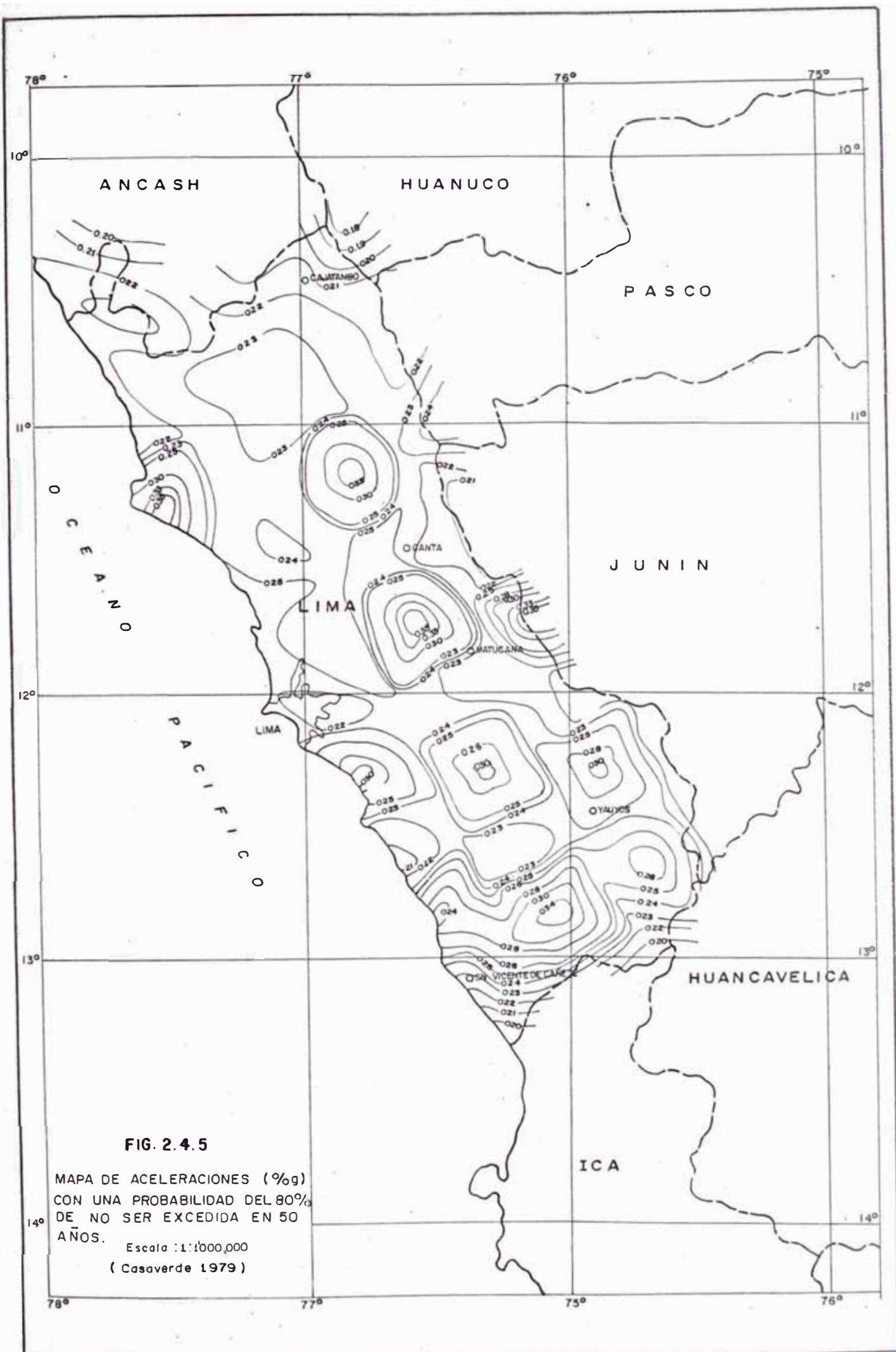


FIG. 2.4.5

MAPA DE ACELERACIONES (%g)
 CON UNA PROBABILIDAD DEL 80%
 DE NO SER EXCEDIDA EN 50
 AÑOS.

Escala : 1:1.000.000
 (Casaverde 1979)

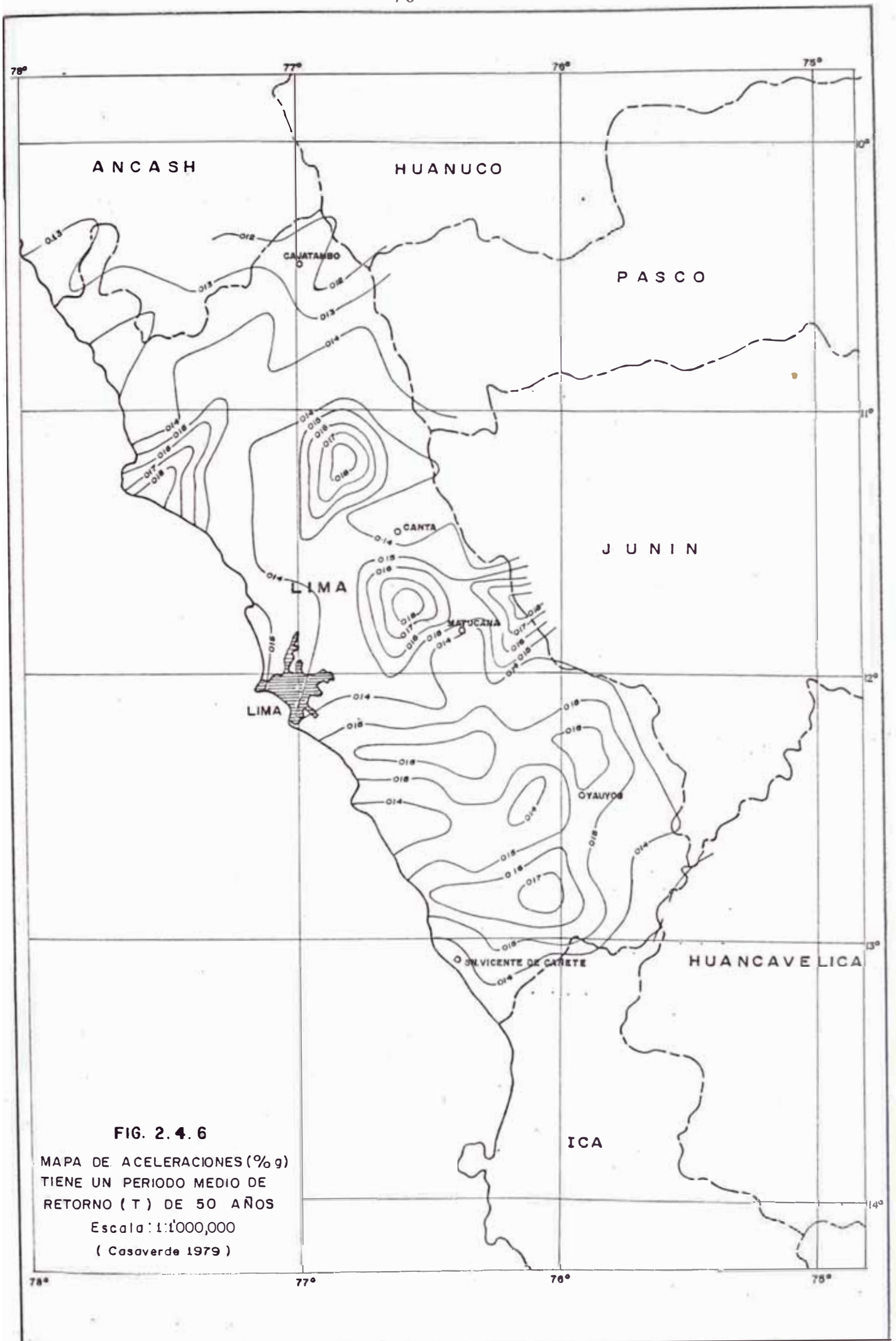


FIG. 2.4.6

MAPA DE ACELERACIONES (% g)
TIENE UN PERIODO MEDIO DE
RETORNO (T) DE 50 AÑOS
Escala: 1:1'000,000
(Casaverde 1979)

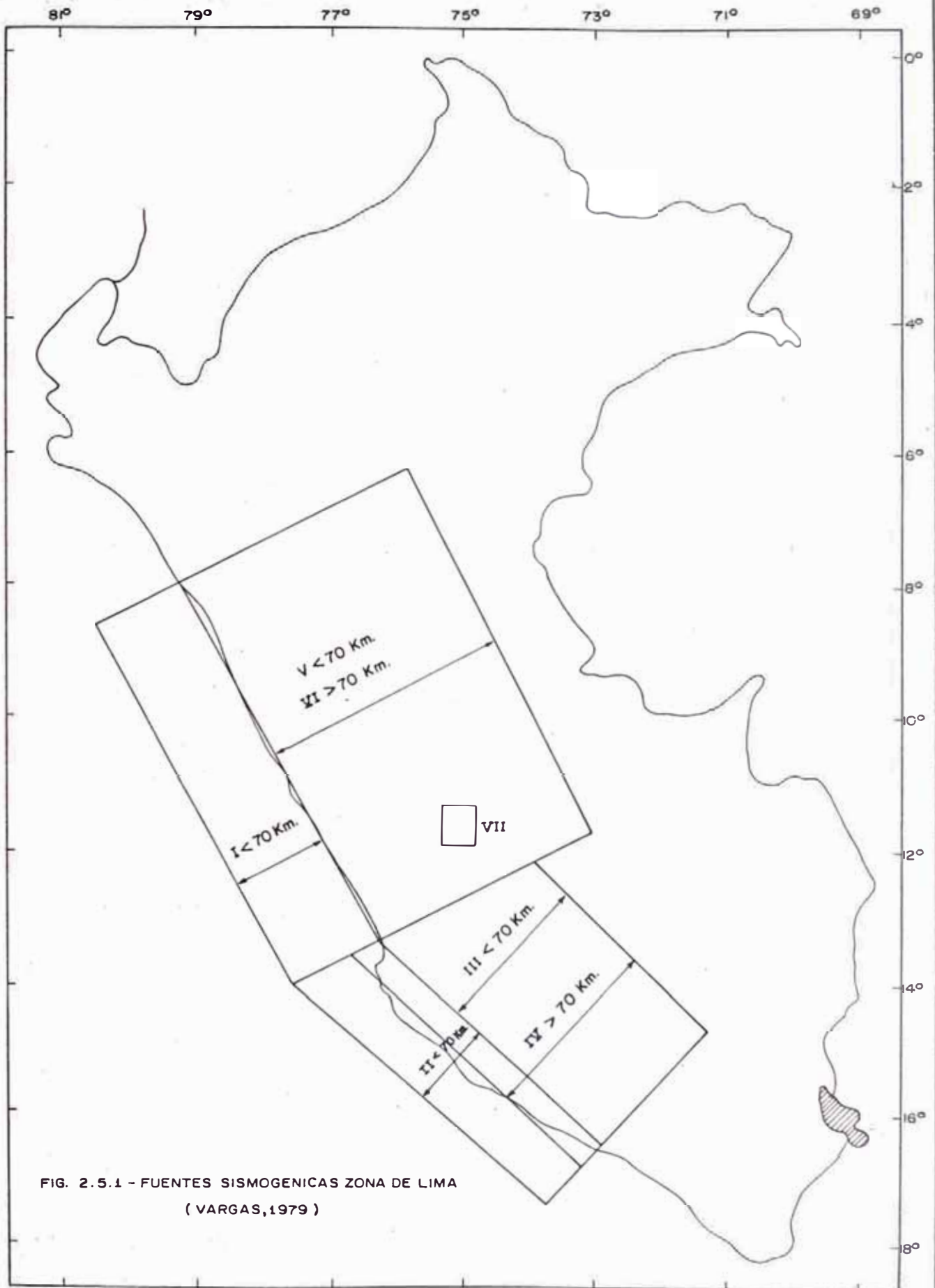
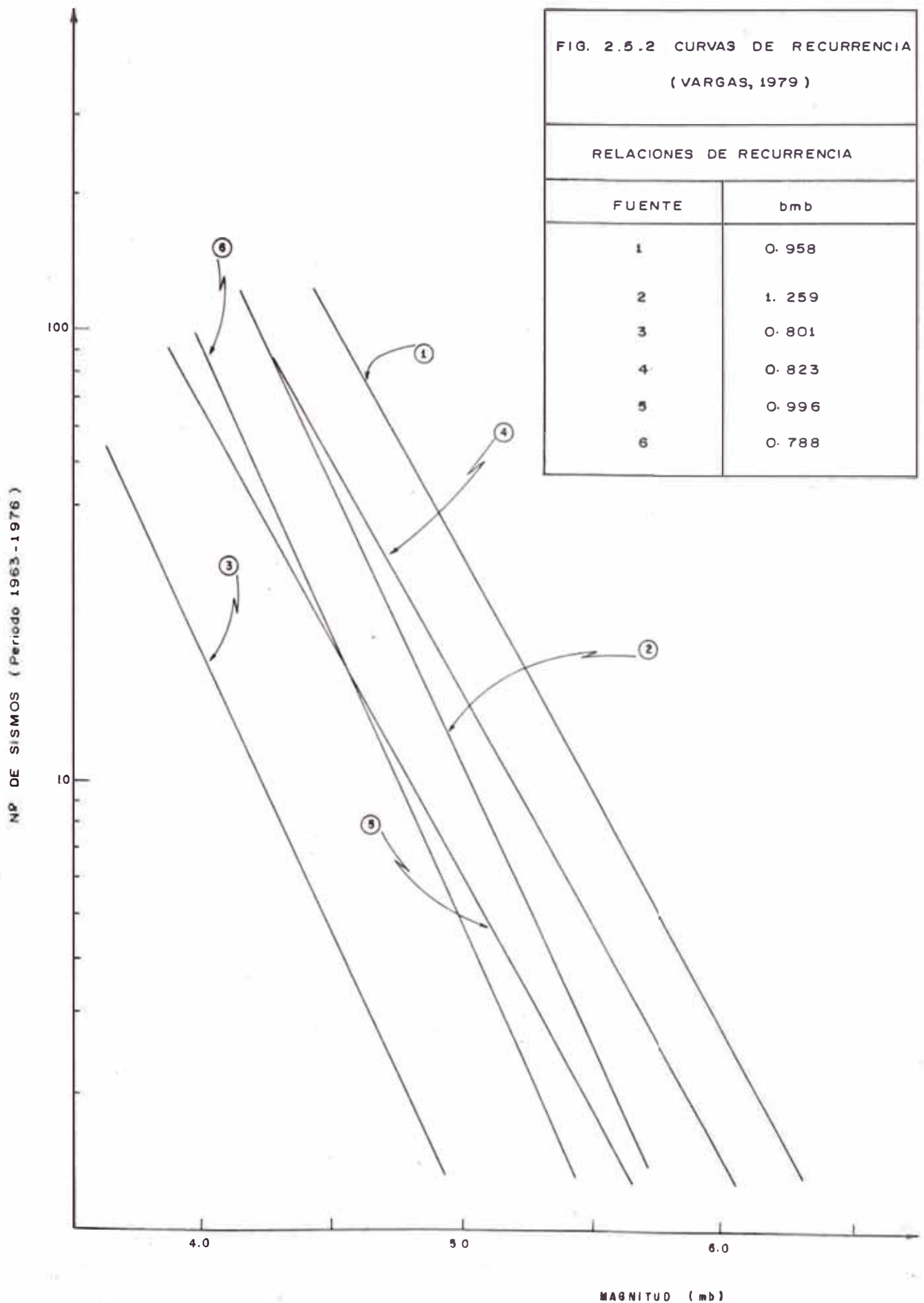


FIG. 2.5.1 - FUENTES SISMOGENICAS ZONA DE LIMA
(VARGAS,1979)

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA DE SISMOS
BOGOTÁ, COLOMBIA

FIG. 2.5.2 CURVAS DE RECURRENCIA
(VARGAS, 1979)

RELACIONES DE RECURRENCIA	
FUENTE	bmb
1	0.958
2	1.259
3	0.801
4	0.823
5	0.996
6	0.788



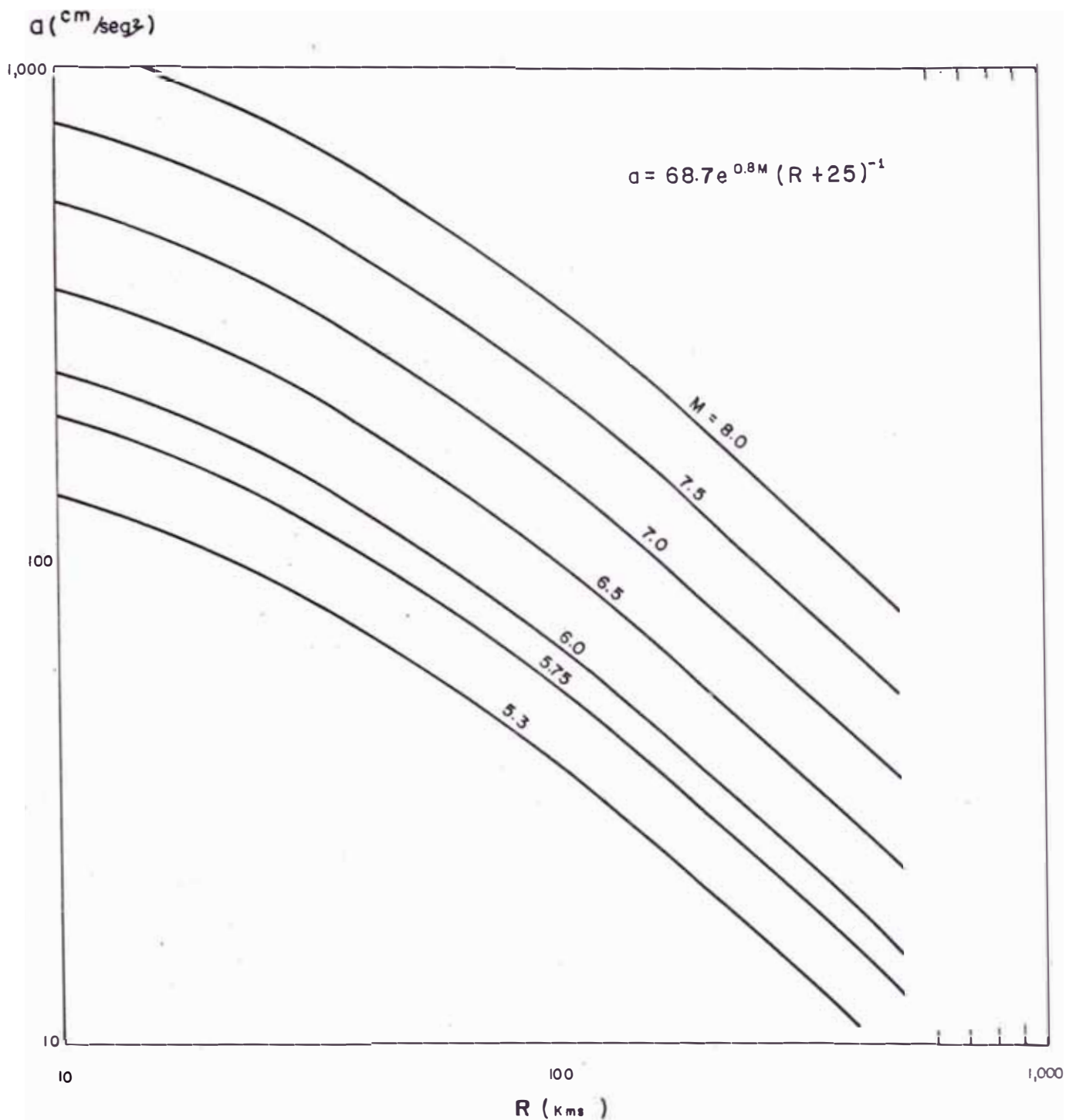


Figura 2.5.3 Atenuación de la Aceleración Máxima del Suelo, según el Nivel de Magnitud de los Sismos (M_s).

(Vargas, 1,979)

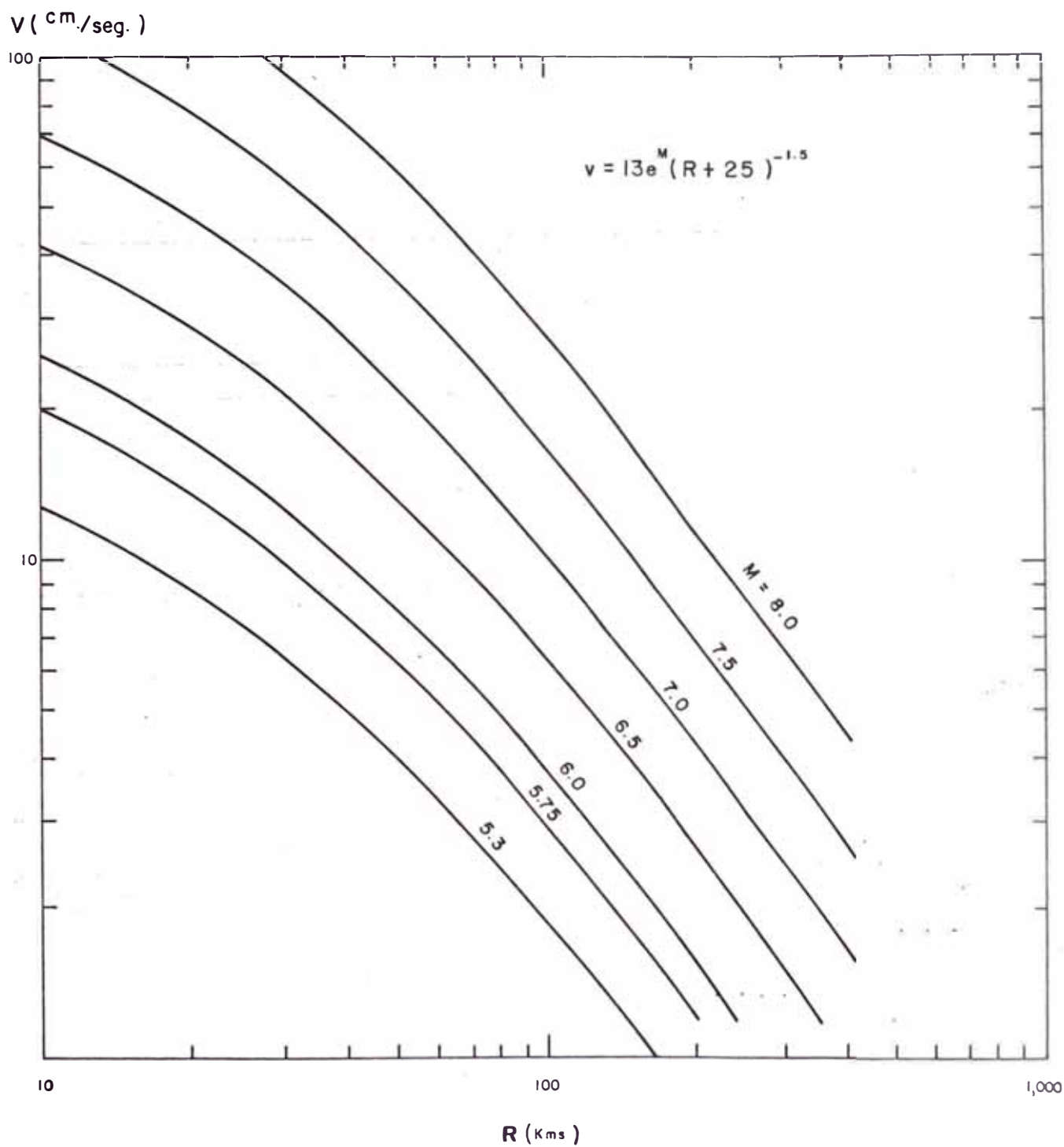


Figura 2.5.4 Atenuación de la Velocidad Máxima del Suelo, según el Nivel de Magnitud de los Sismos. (M_s)

(Vargas , 1,979)

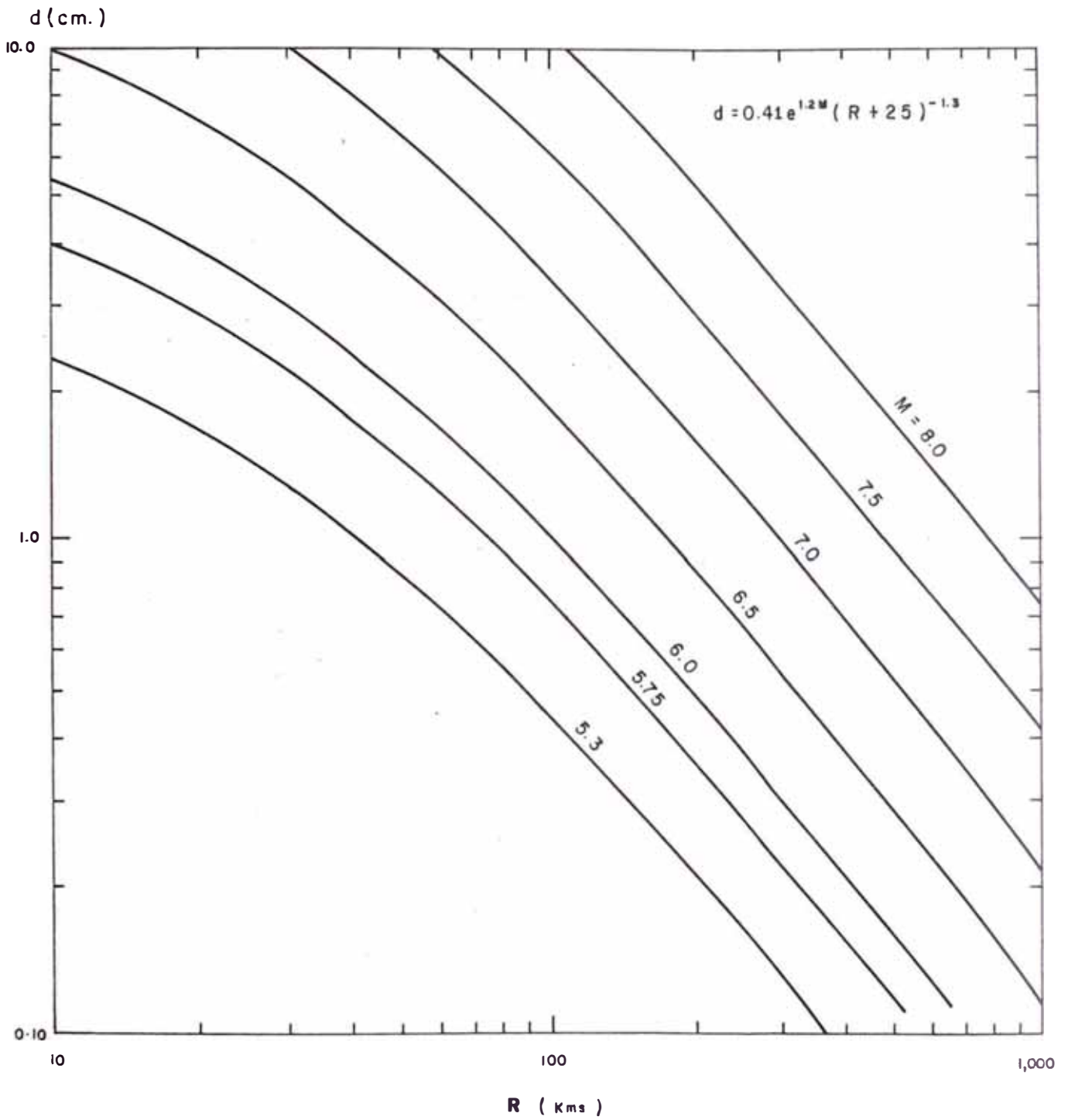
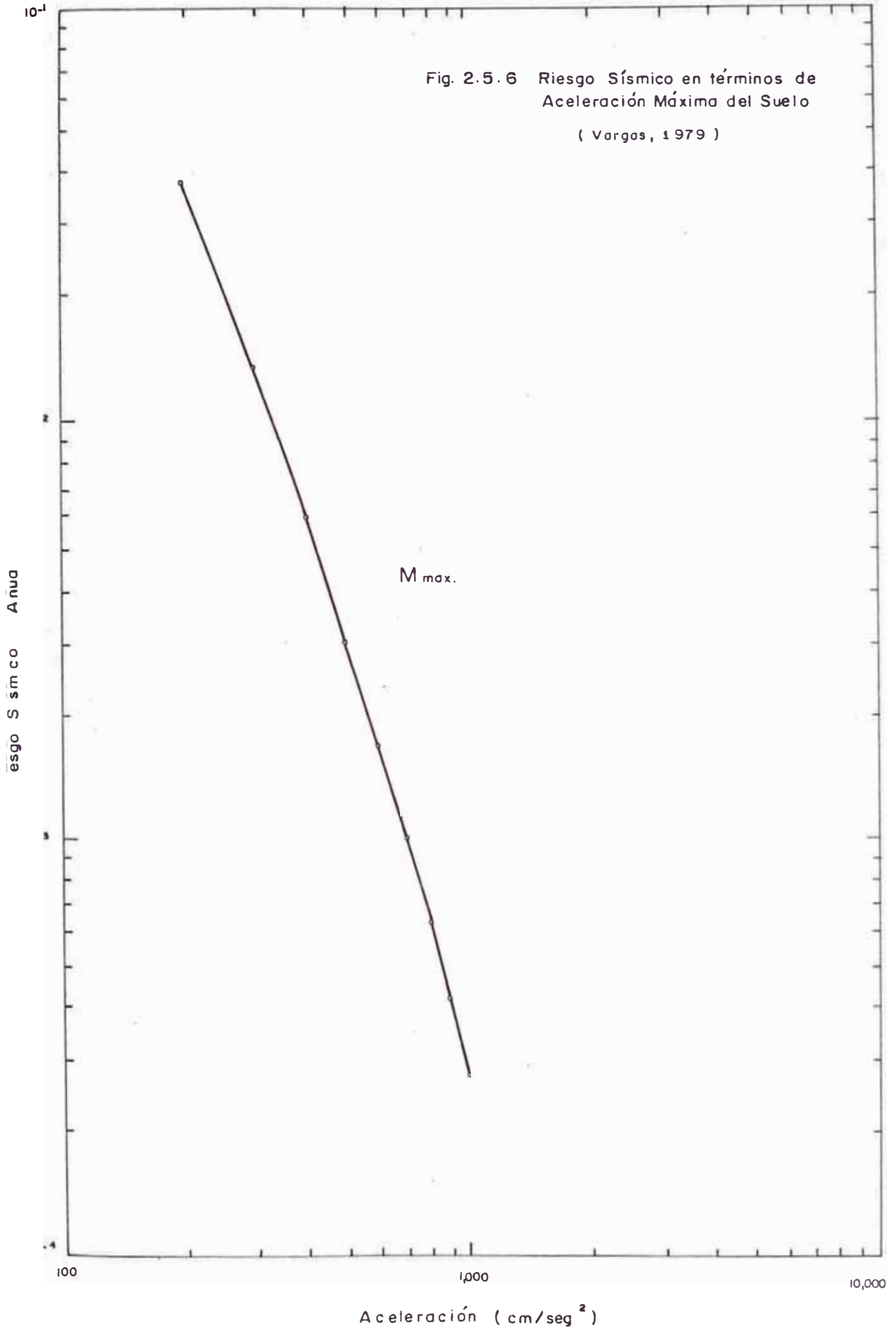


Figura 2.5.5 Atenuación del Desplazamiento Máximo del Suelo, según el Nivel de Magnitud de los Sismos. (M_s)

(Vargas, 1,979)

Fig. 2.5.6 Riesgo Sísmico en términos de
Aceleración Máxima del Suelo
(Vargas, 1979)



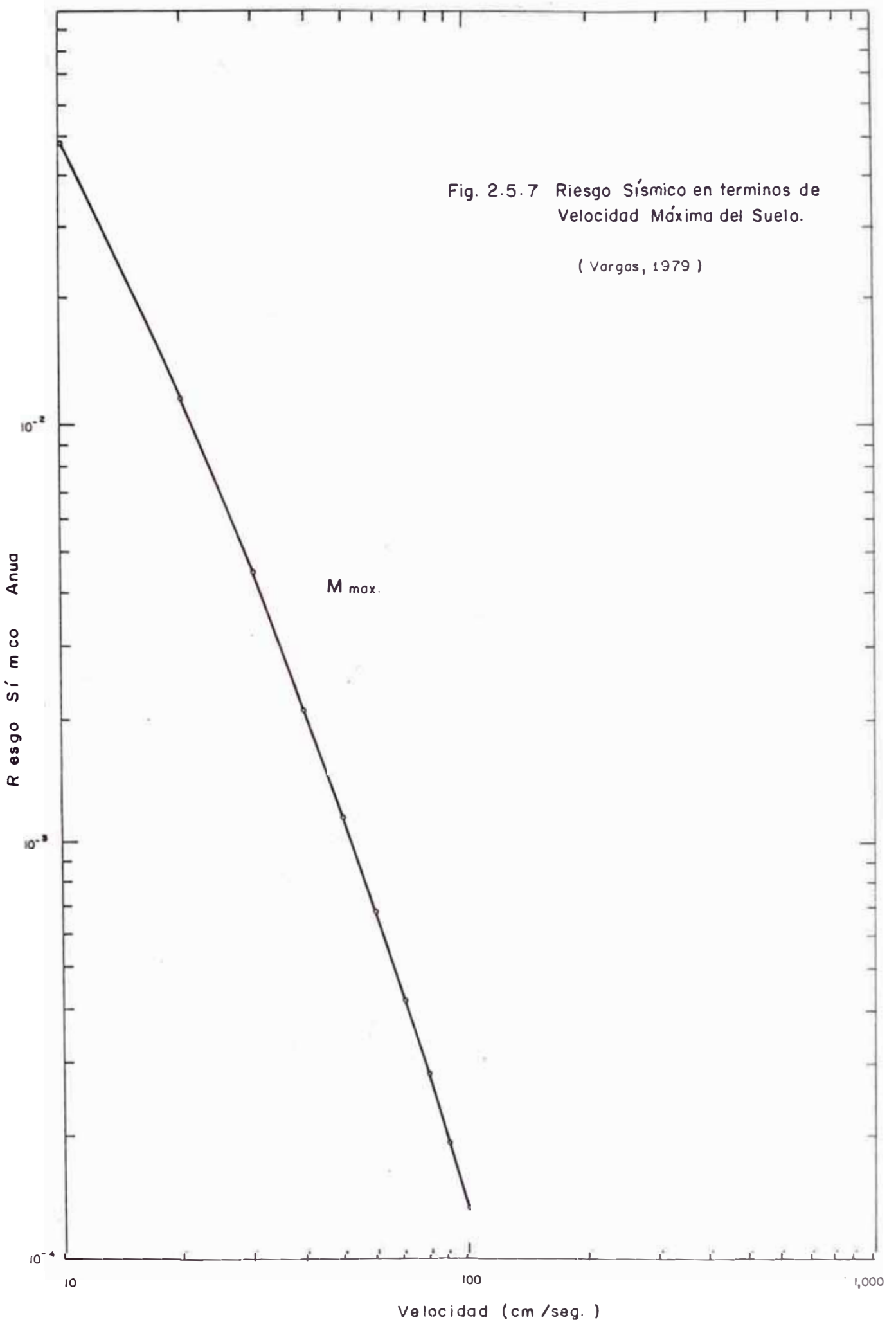


Fig. 2.5.7 Riesgo Sísmico en terminos de Velocidad Máxima del Suelo.

(Vargas, 1979)

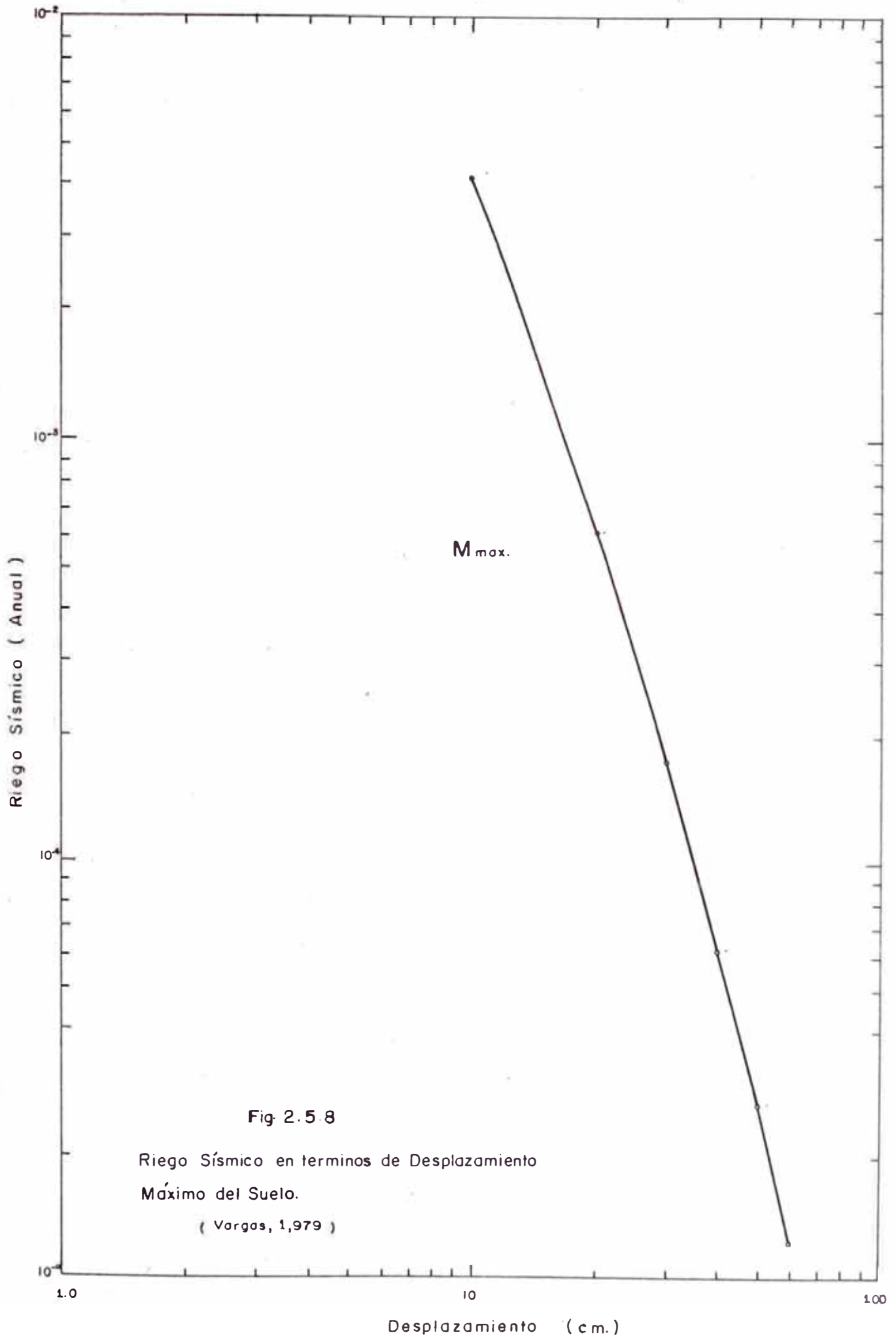
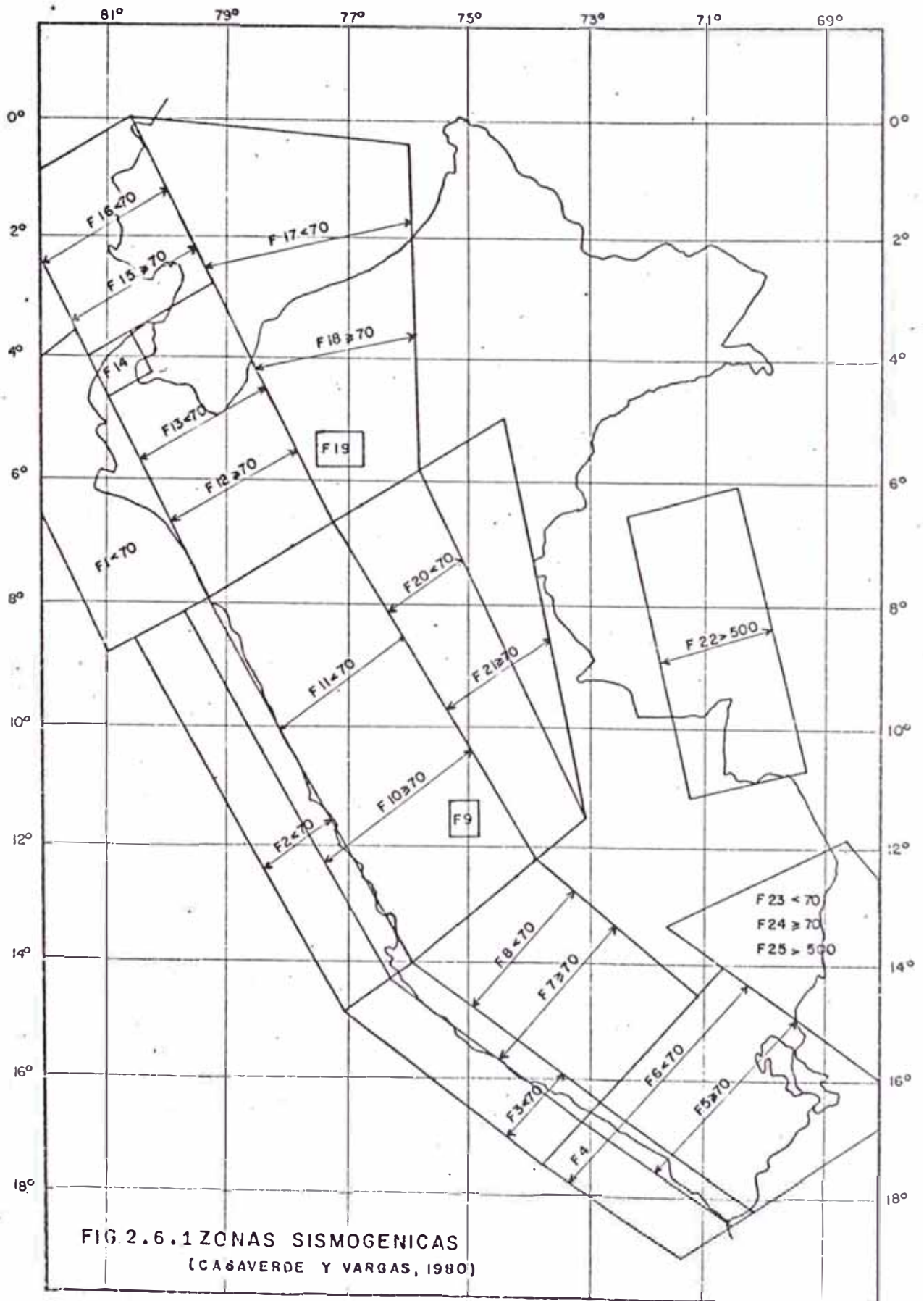


Fig 2.5.8

Riego Sísmico en terminos de Desplazamiento
Máximo del Suelo.

(Vargas, 1,979)



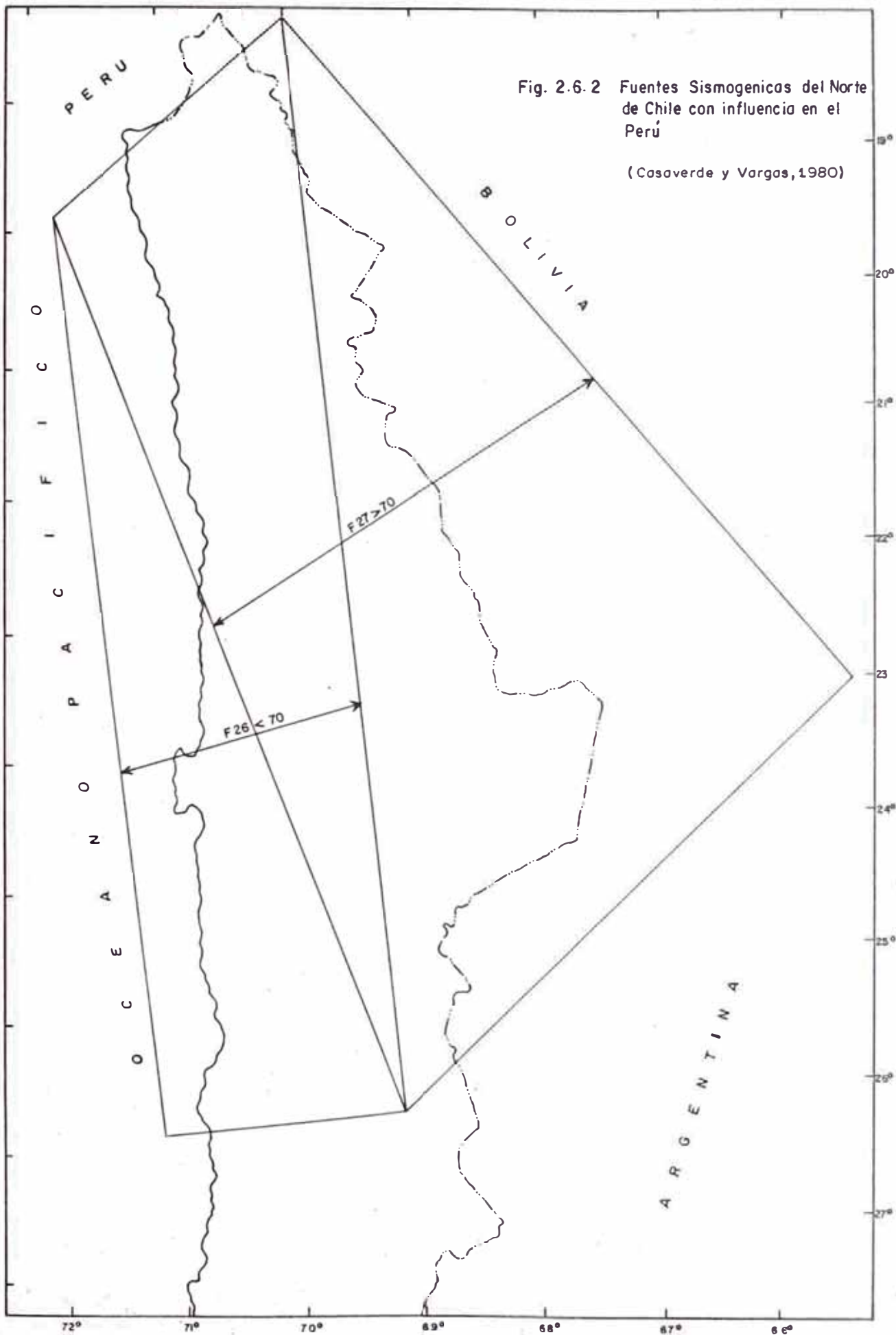


Fig. 2.6-2 Fuentes Sismogenicas del Norte de Chile con influencia en el Perú

(Casaverde y Vargas, 1980)

FIG. 2.6.4 CURVAS DE RECURRENCIA
ZONA CENTRO
(CASAVEDE Y VARGAS, 1980)

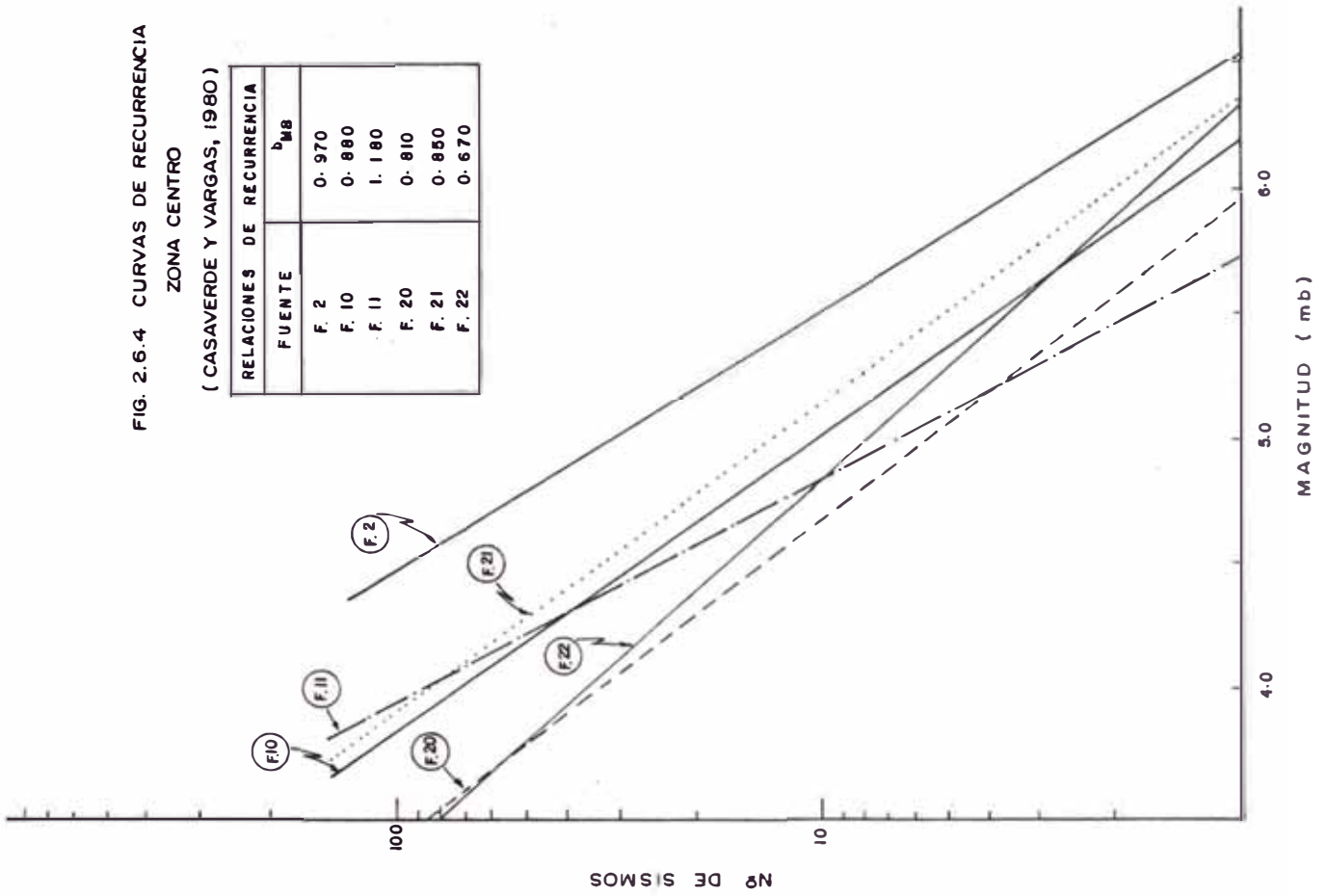


FIG. 2.6.3 CURVAS DE RECURRENCIA
ZONA NORTE
(CASAVEDE Y VARGAS, 1980)

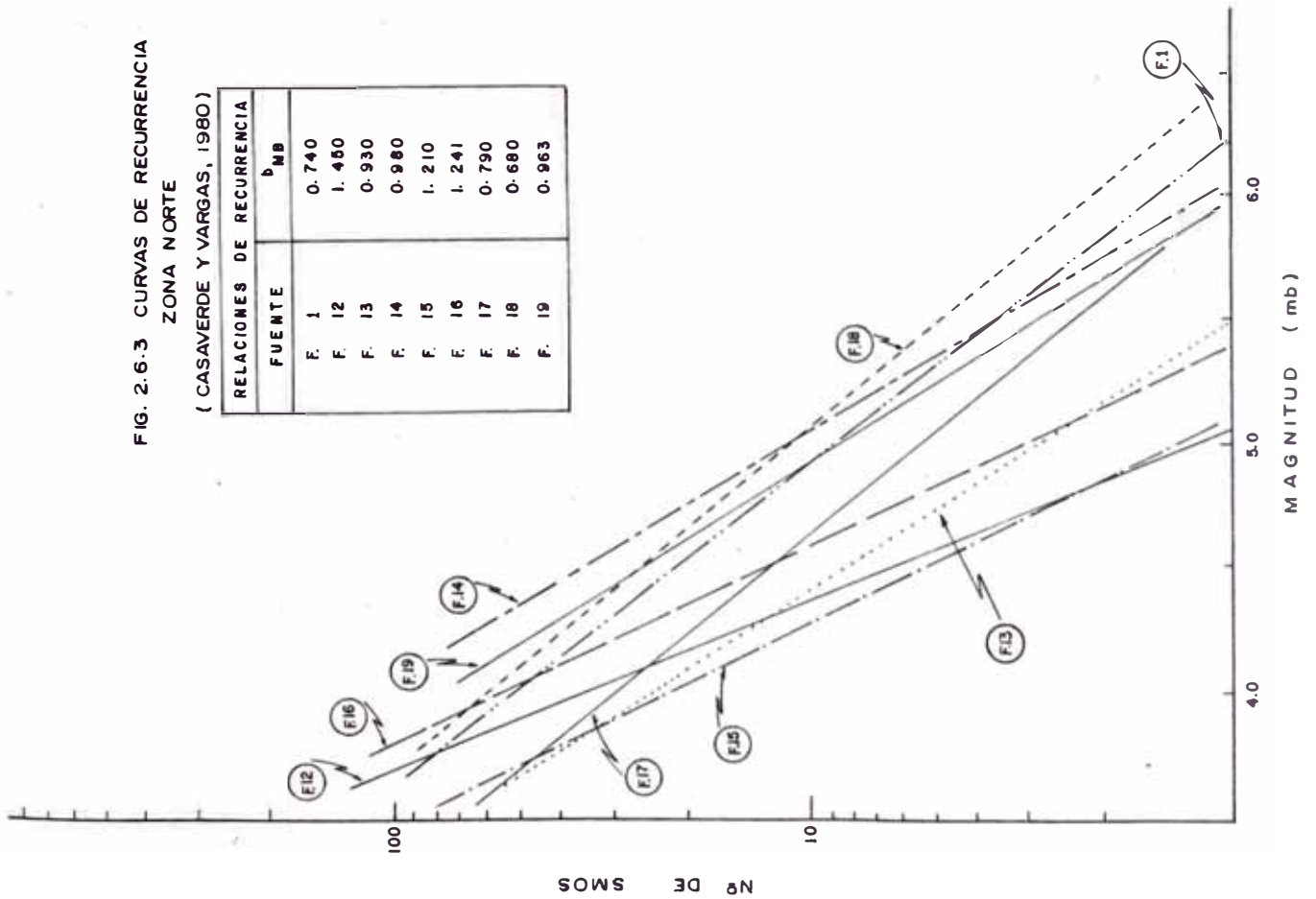


FIG. 2.6.5 CURVAS DE RECURRENCIA
ZONA SUR

(CASASVERDE Y VARGAS, 1980)

RELACIONES DE RECURRENCIA	
FUENTE	b MB
F. 3	1.300
F. 4	0.834
F. 5	0.814
F. 6	0.965
F. 7	0.815
F. 8	0.870
F. 23, 24, 25	0.814

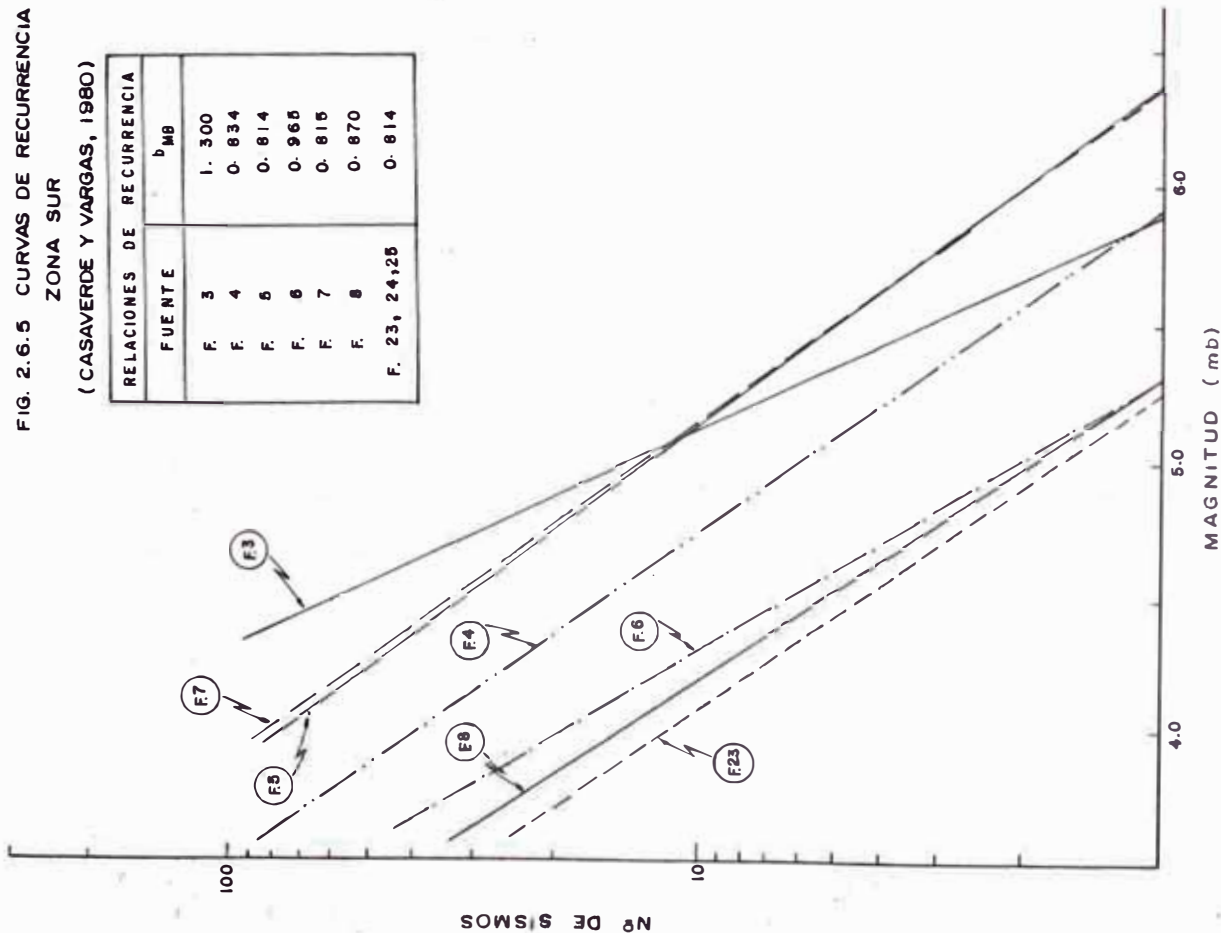
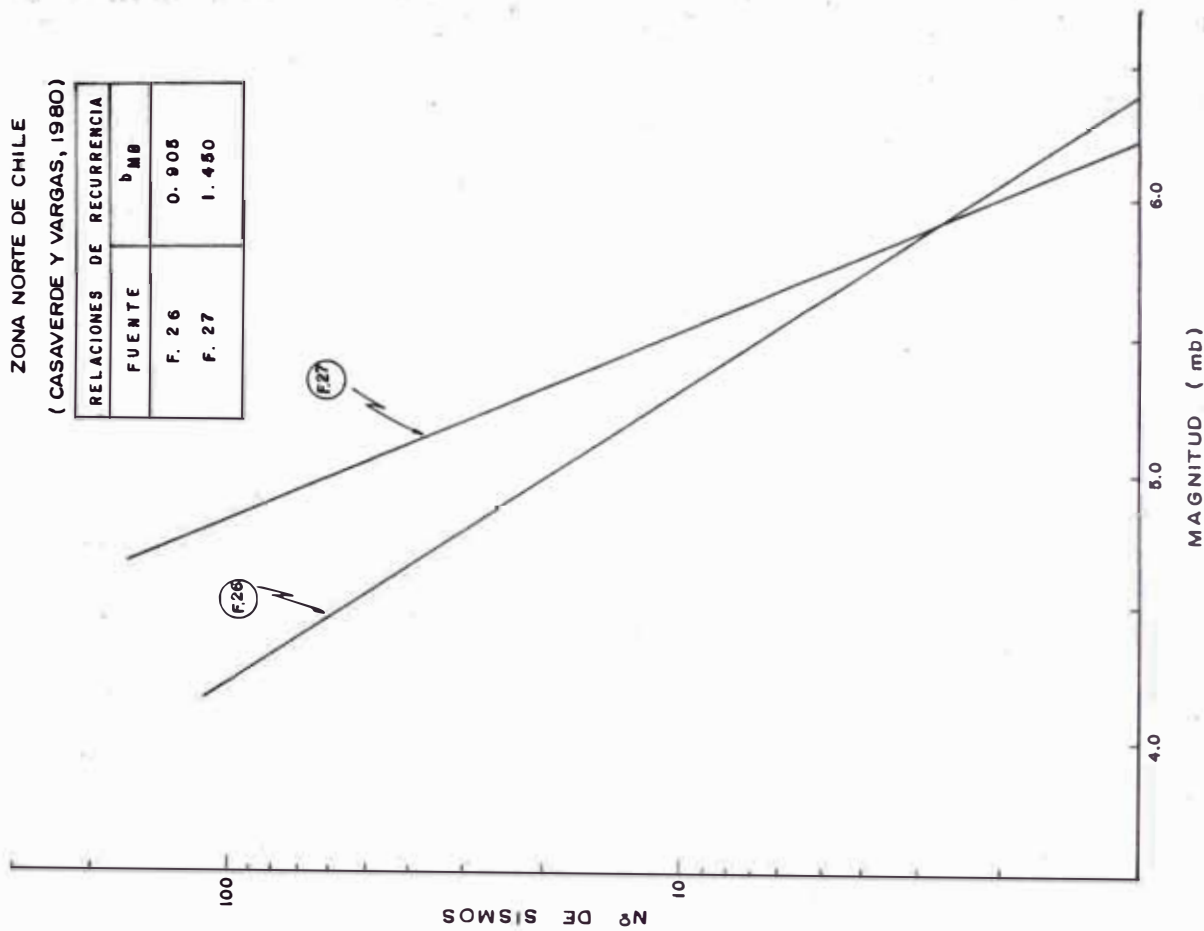


FIG. 2.6.6 CURVAS DE RECURRENCIA
ZONA NORTE DE CHILE

(CASASVERDE Y VARGAS, 1980)

RELACIONES DE RECURRENCIA	
FUENTE	b MB
F. 26	0.908
F. 27	1.450



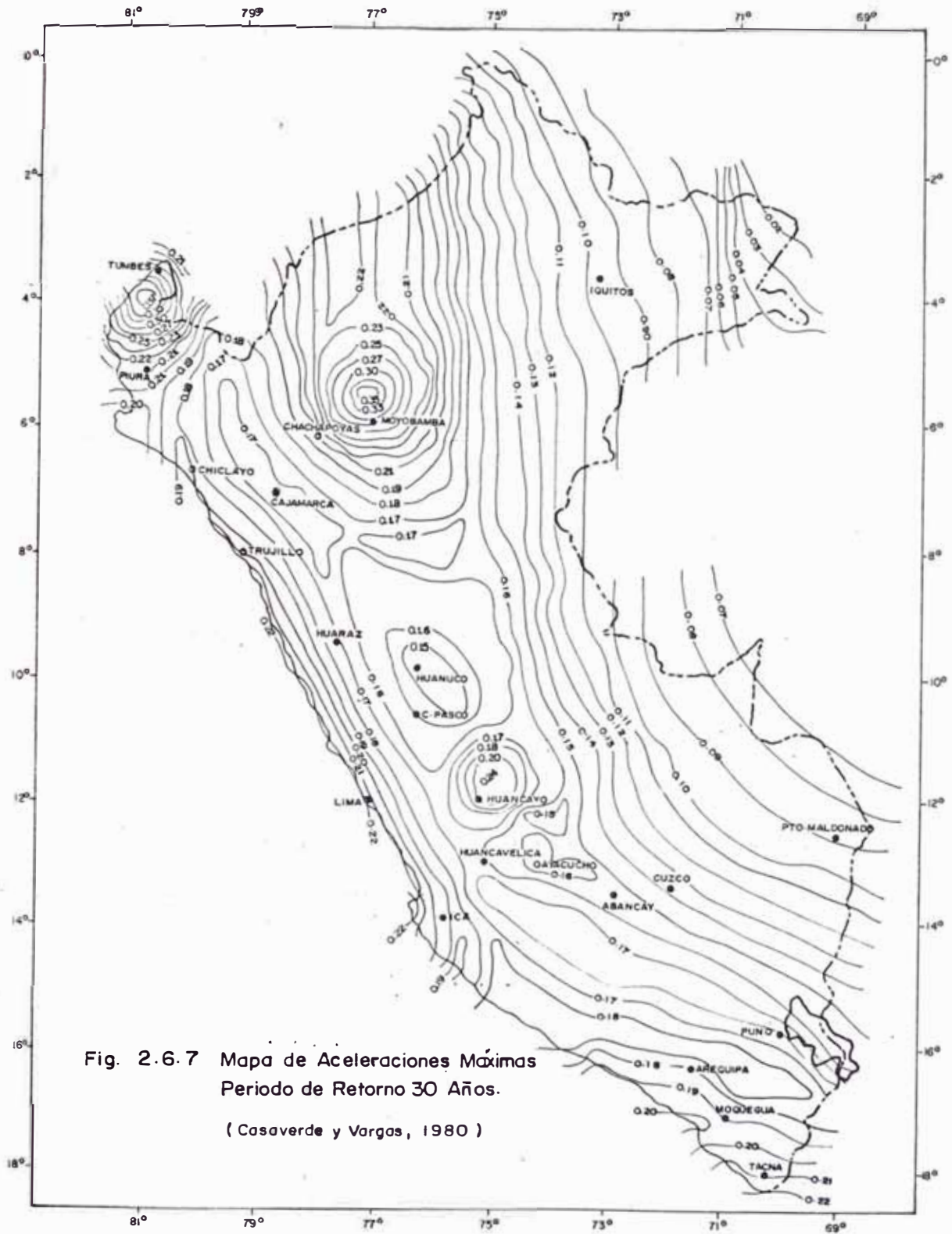


Fig. 2.6.7 Mapa de Aceleraciones Máximas
Periodo de Retorno 30 Años.
(Casaverde y Vargas , 1980)

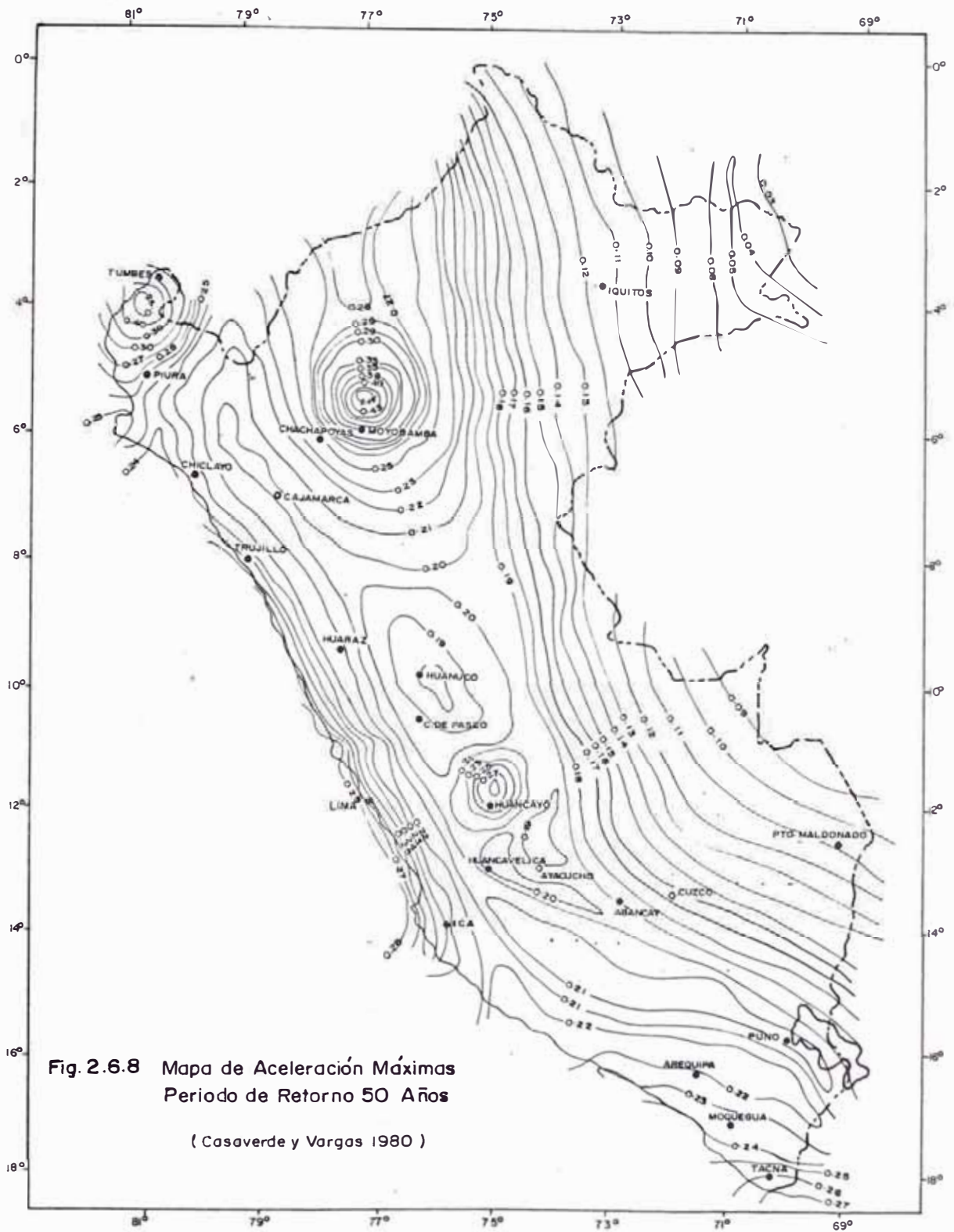


Fig. 2.6.8 Mapa de Aceleración Máximas
Periodo de Retorno 50 Años

(Casaverde y Vargas 1980)

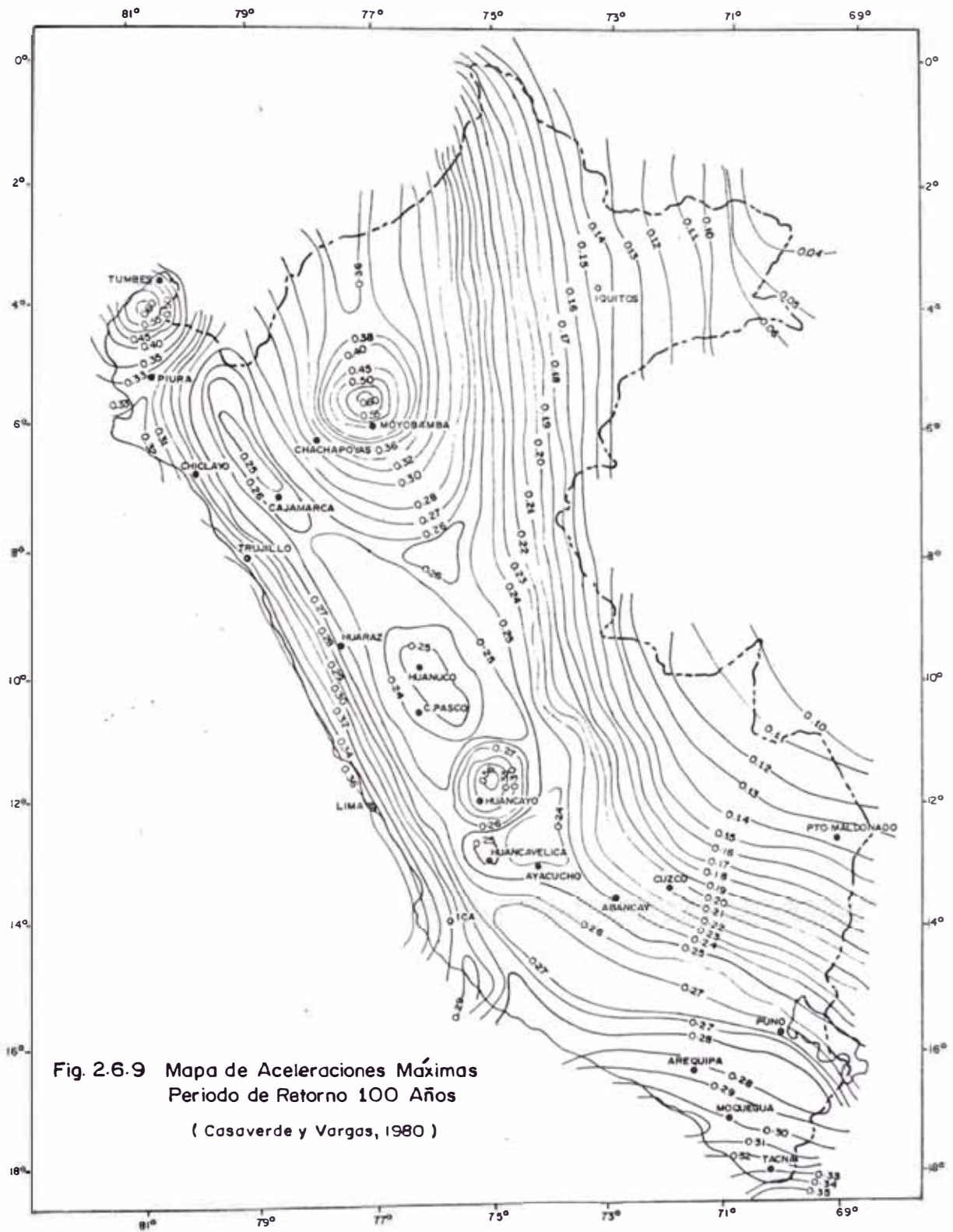


Fig. 2.6.9 Mapa de Aceleraciones Máximas
Periodo de Retorno 100 Años
(Casaverde y Vargas, 1980)

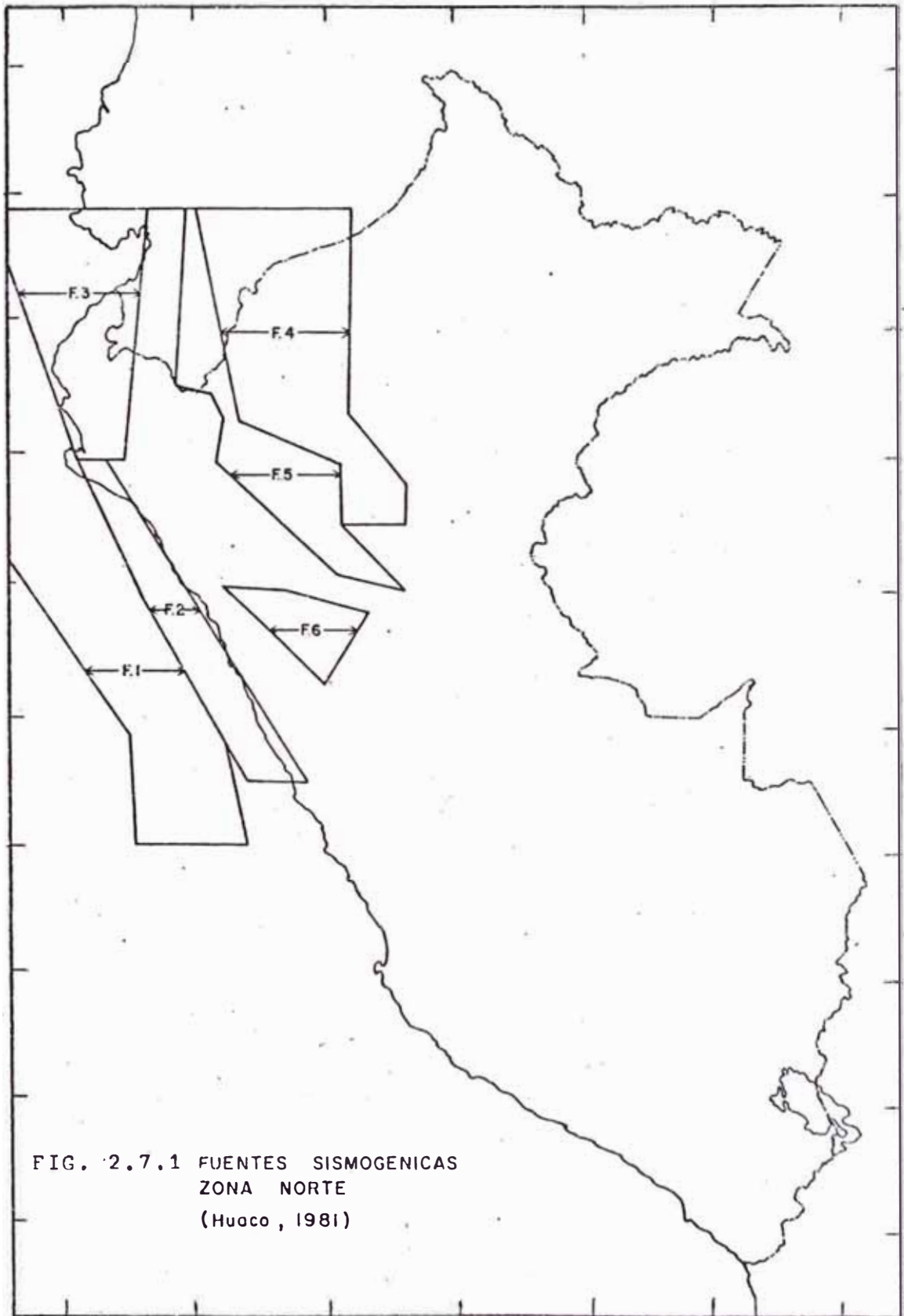


FIG. 2.7.1 FUENTES SISMOGENICAS
ZONA NORTE
(Huaco , 1981)

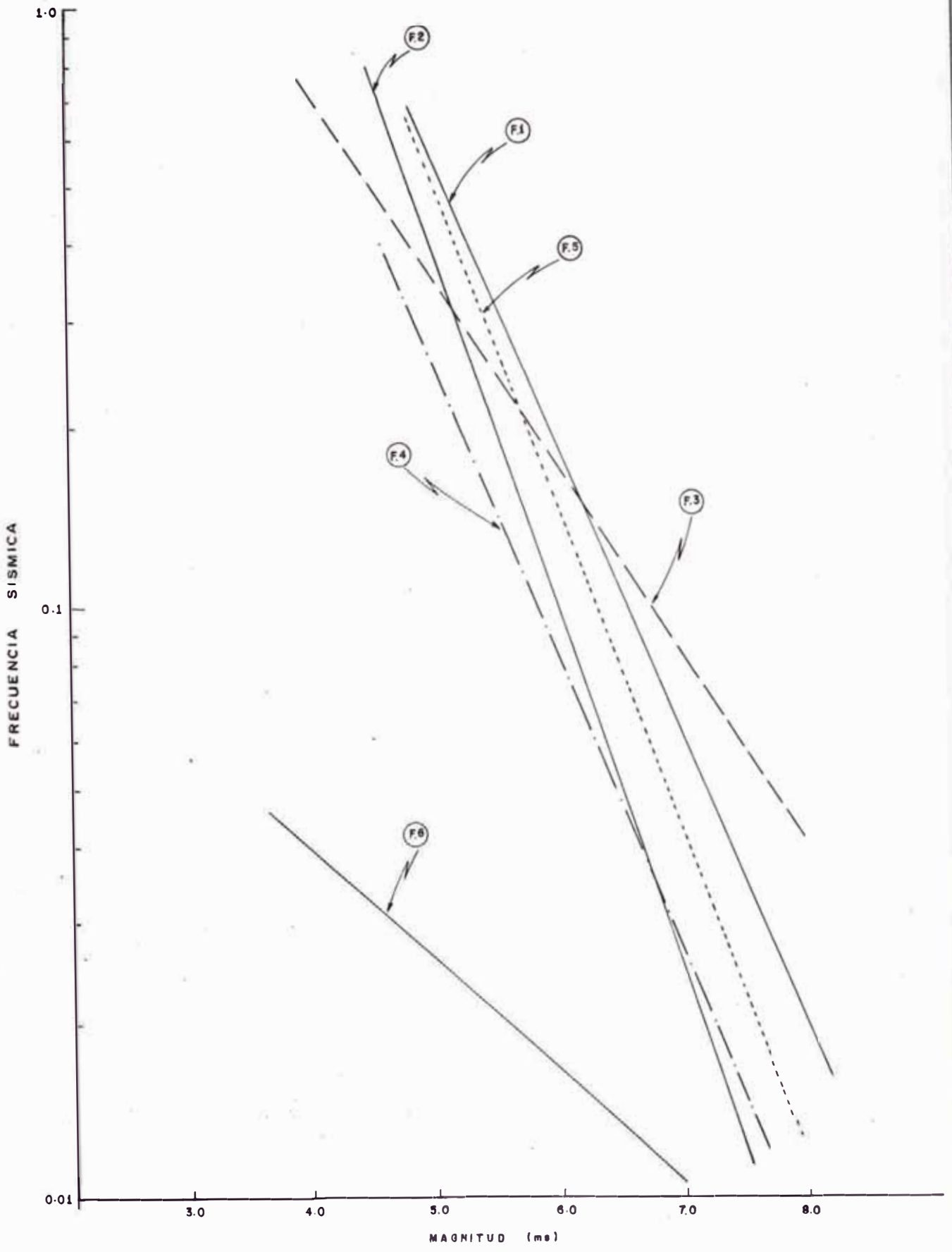
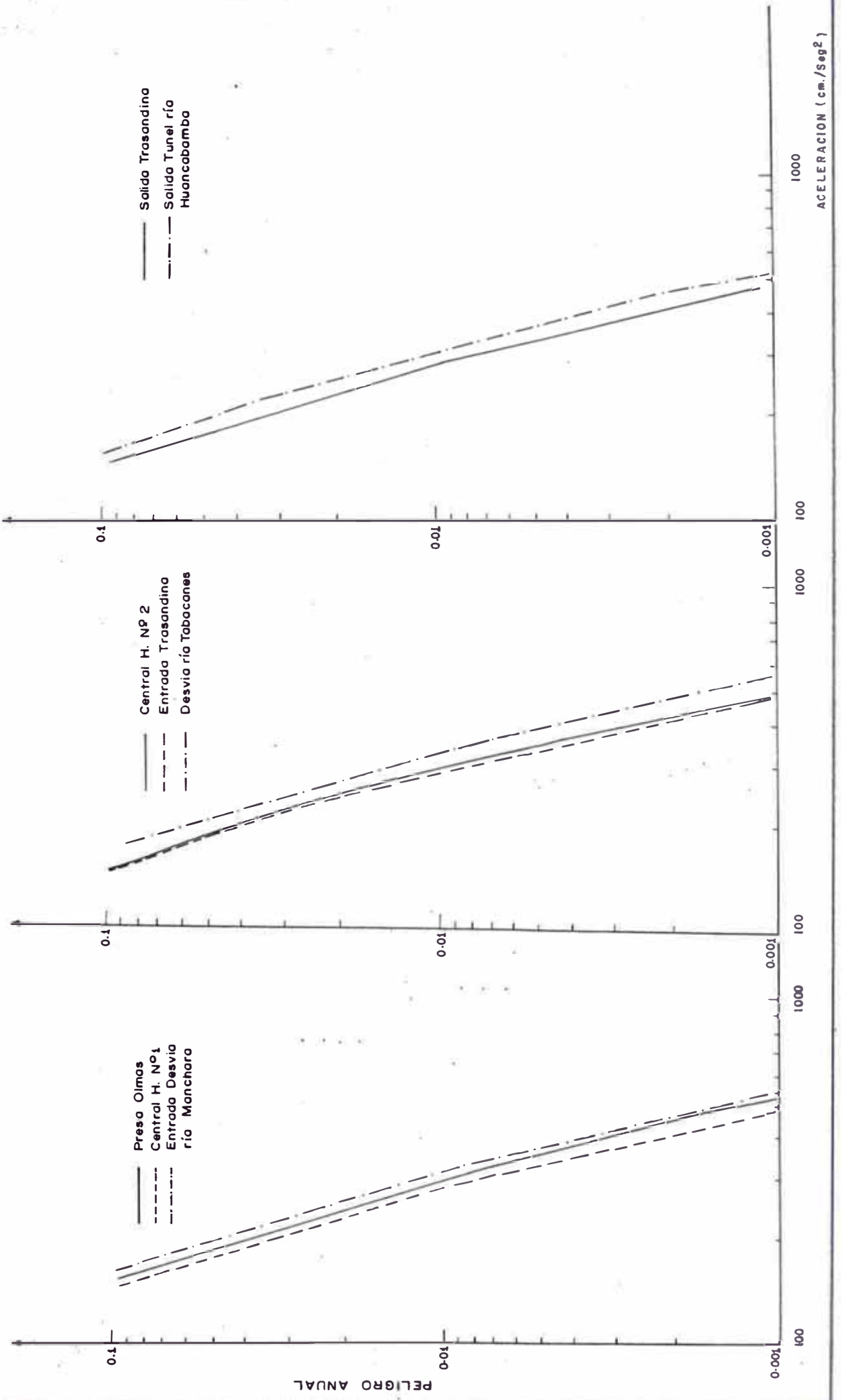
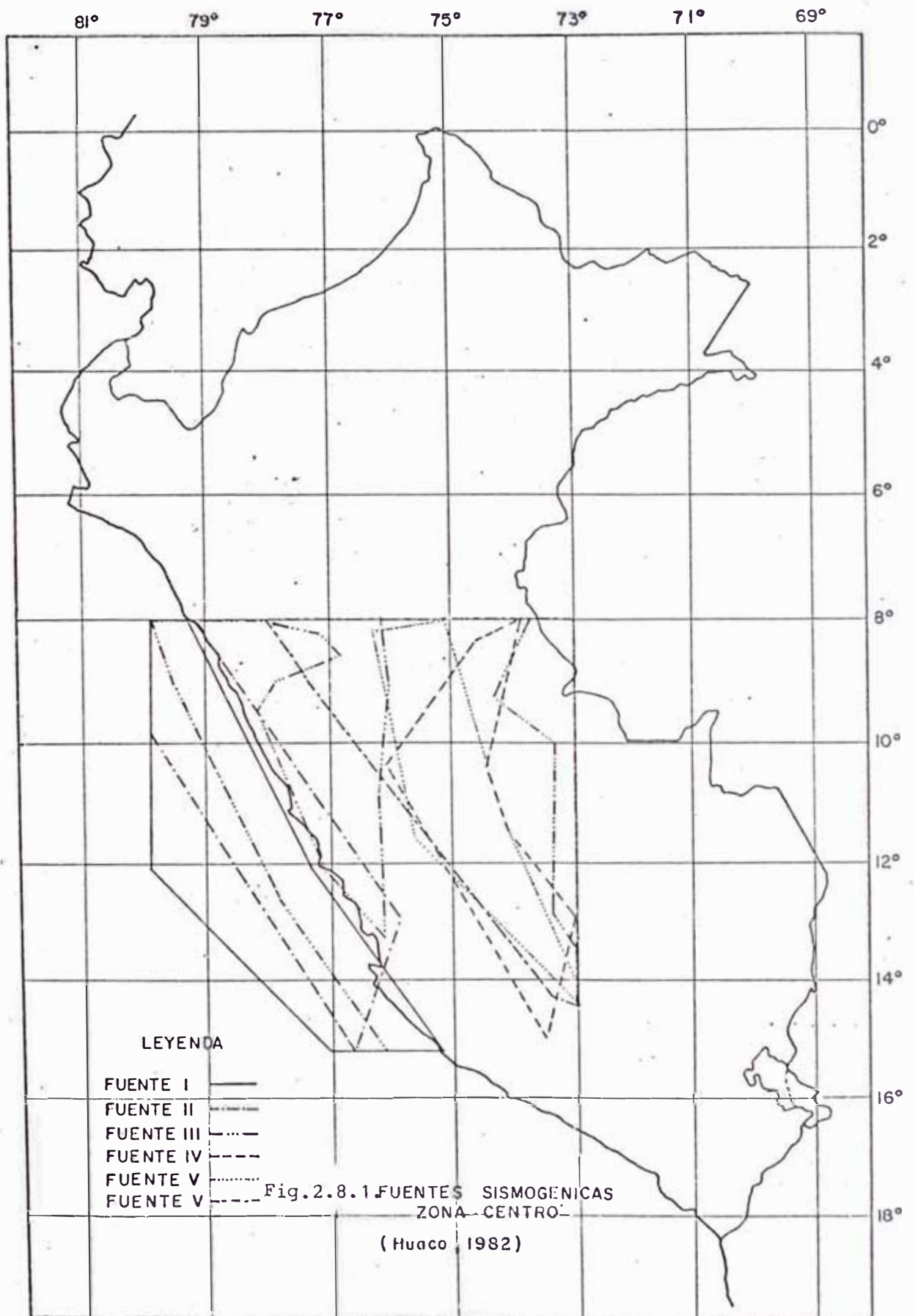


FIG. 2. 7. 2 CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA PARA LA ZONA DEL PROYECTO OLMOS (HUACO 1981)

FIG. 2-7.3 PELIGRO SISMICO ANUAL DE LOS LUGARES DE INTERES DEL PROYECTO OLMOS (HUACO, 1981)





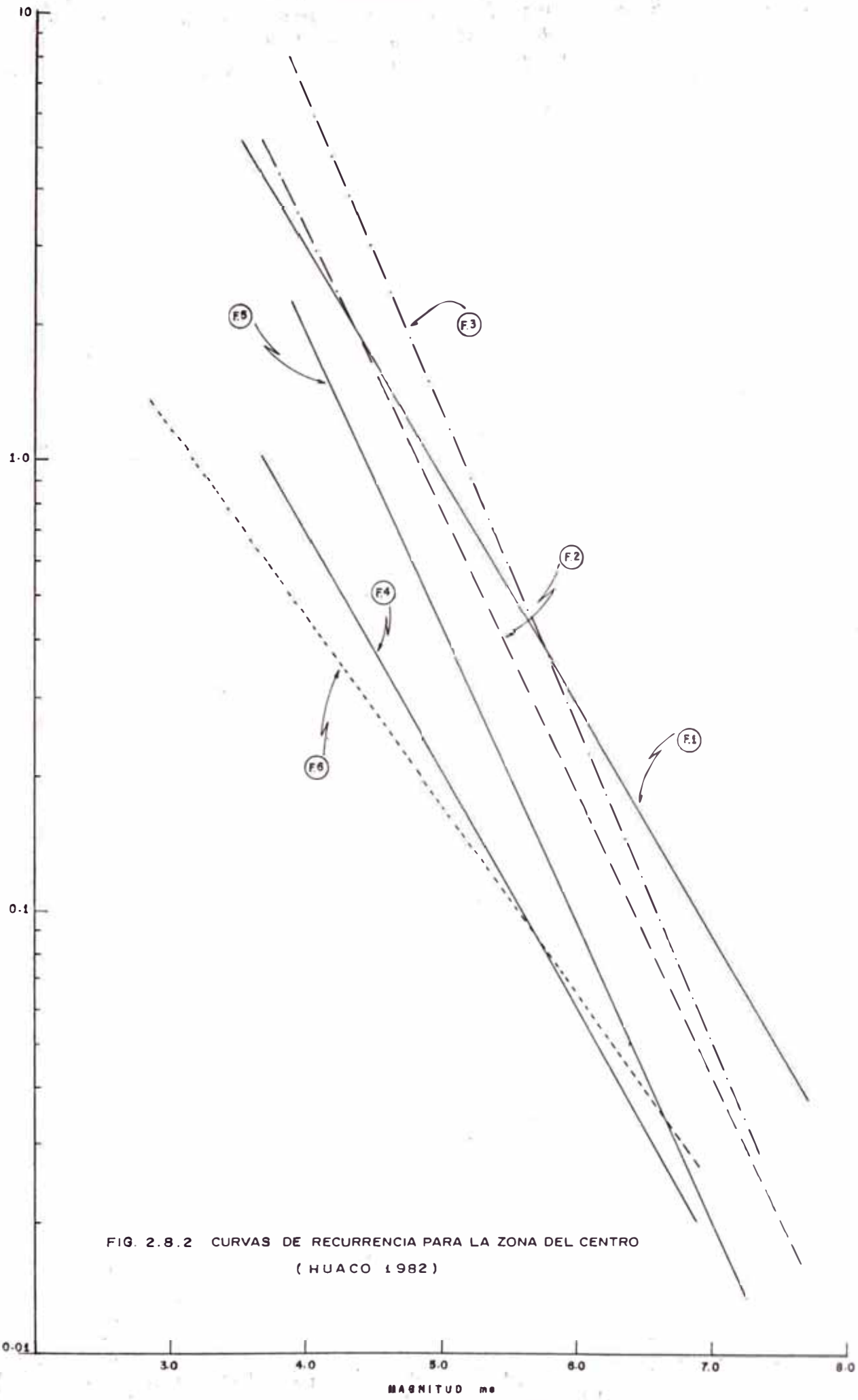


FIG. 2.8.2 CURVAS DE RECURRENCIA PARA LA ZONA DEL CENTRO
(HUACO 1982)

FIG. 2.8.3 PELIGRO SISMICO ANUAL PARA LA ZONA TRANSVERSE MANTARO
(HUACO, 1982)

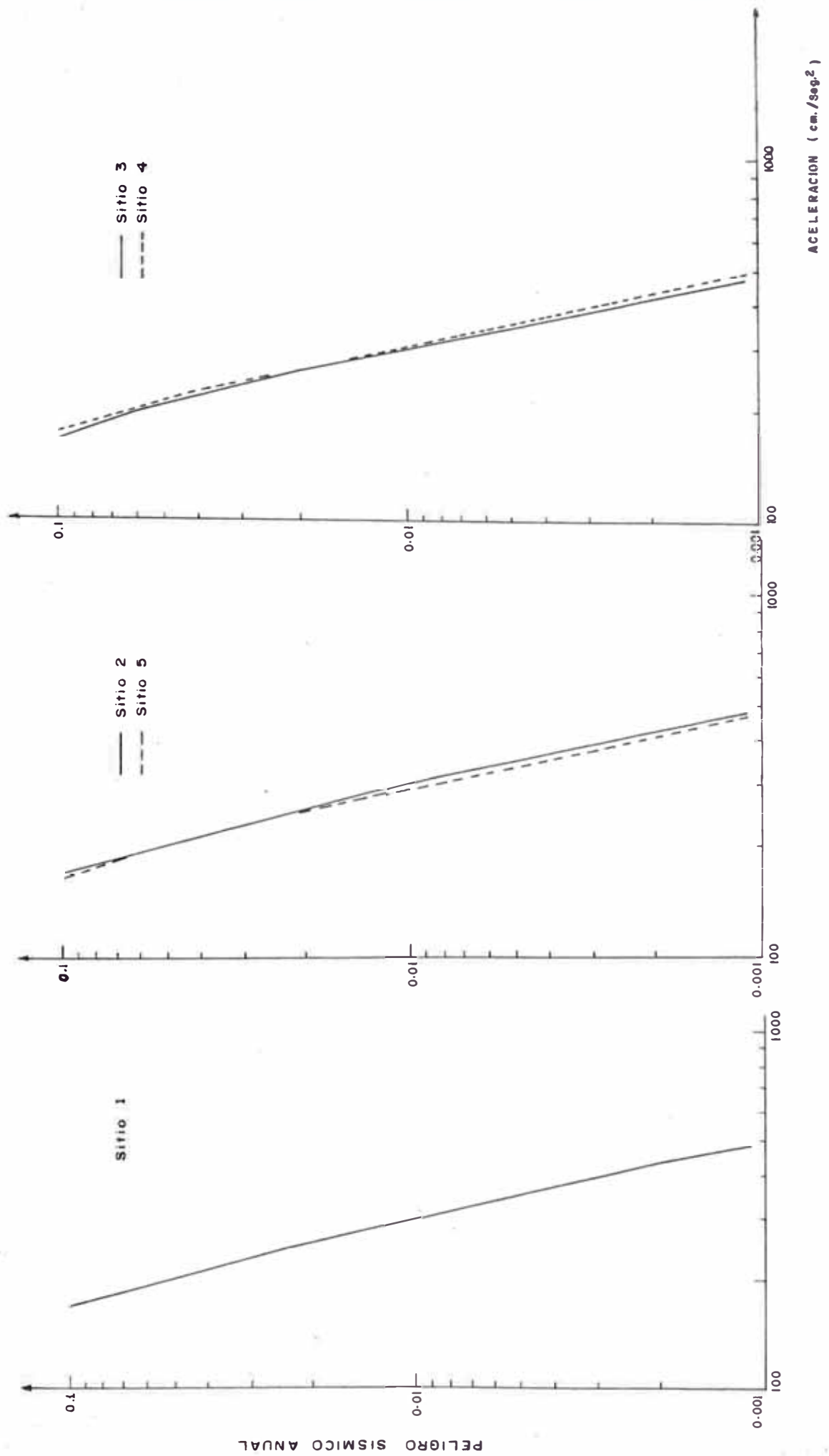


FIG. 2.9.2 CURVAS DE RECURRENCIA
ZONA CENTRO

(CASAVEDE Y VARGAS, 1982)

RELACIONES DE RECURRENCIA		b_{MB}
FUENTE		
F. 2		0. 987
F. 10		0. 760
F. 11		1. 086
F. 20		0. 690
F. 21		0. 830
F. 22		0. 610

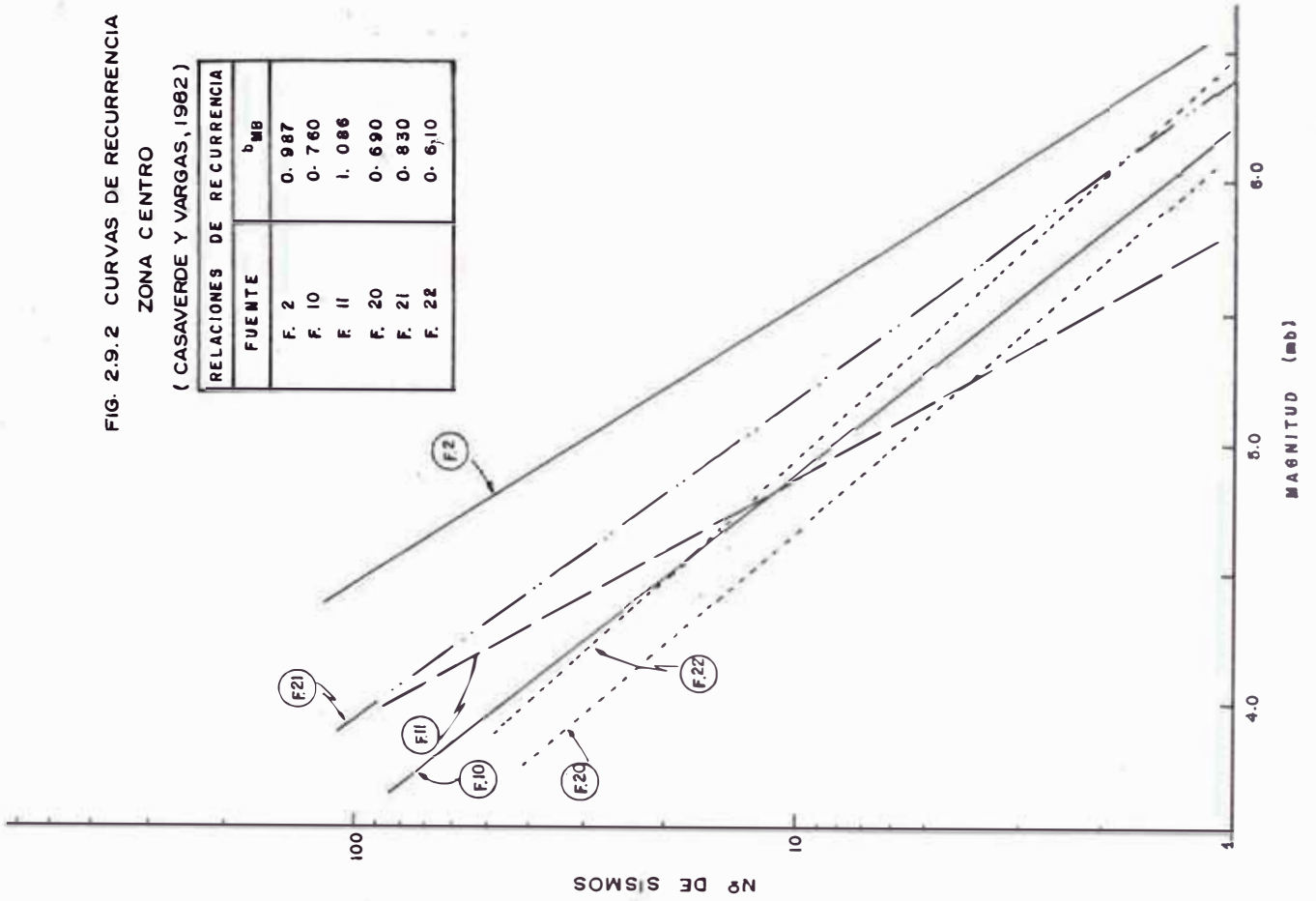


FIG. 2.9.1 CURVAS DE RECURRENCIA
ZONA NORTE

(CASAVEDE Y VARGAS, 1982)

RELACIONES DE RECURRENCIA		b_{MB}
FUENTE		
F. 1		0. 712
F. 12		1. 210
F. 13		0. 762
F. 14		0. 987
F. 15		1. 260
F. 16		1. 200
F. 17		0. 742
F. 18		0. 670
F. 19		0. 940

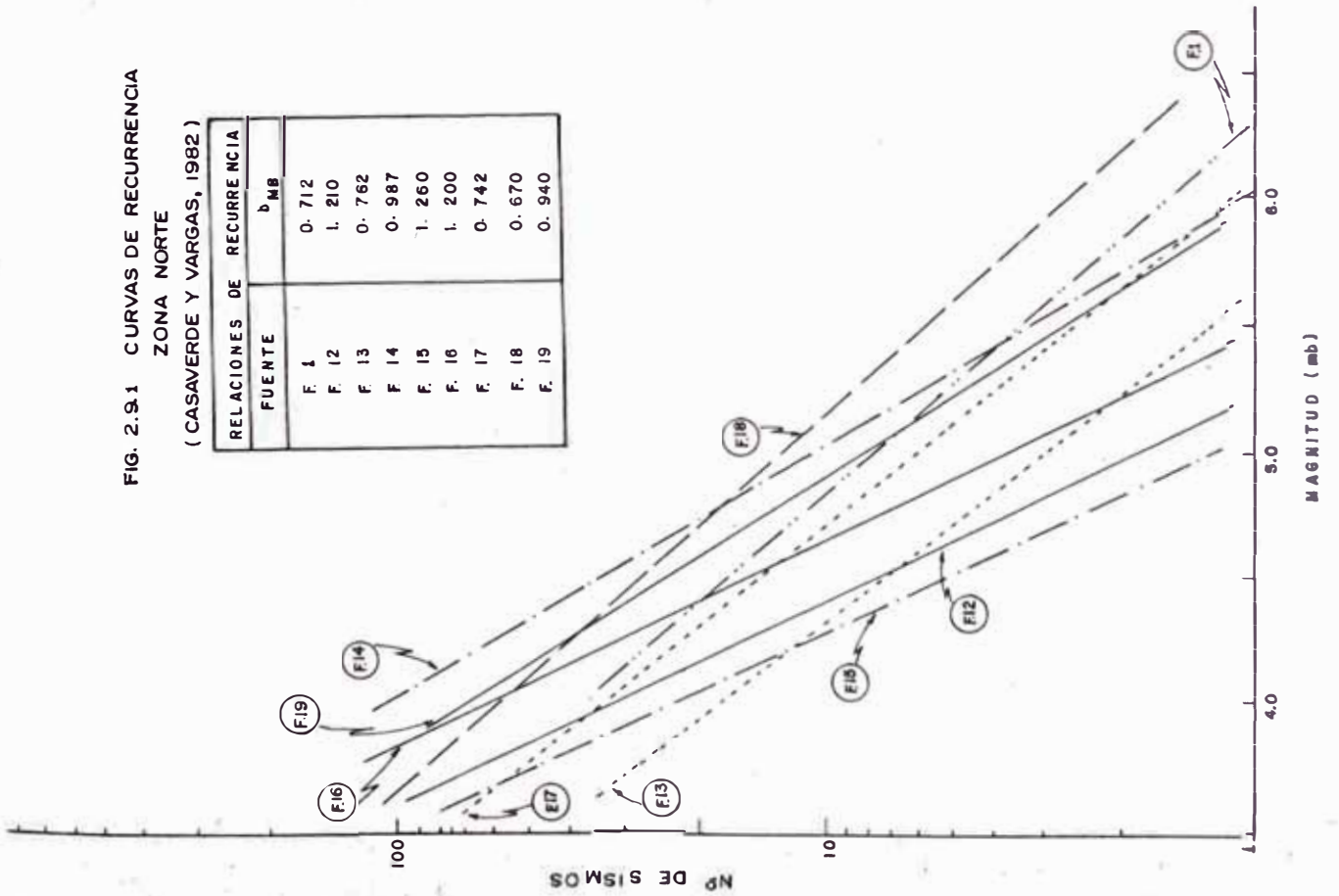


FIG. 2.9.3 CURVAS DE RECURRENCIA
ZONA SUR
(CASAVEDE Y VARGAS, 1982)

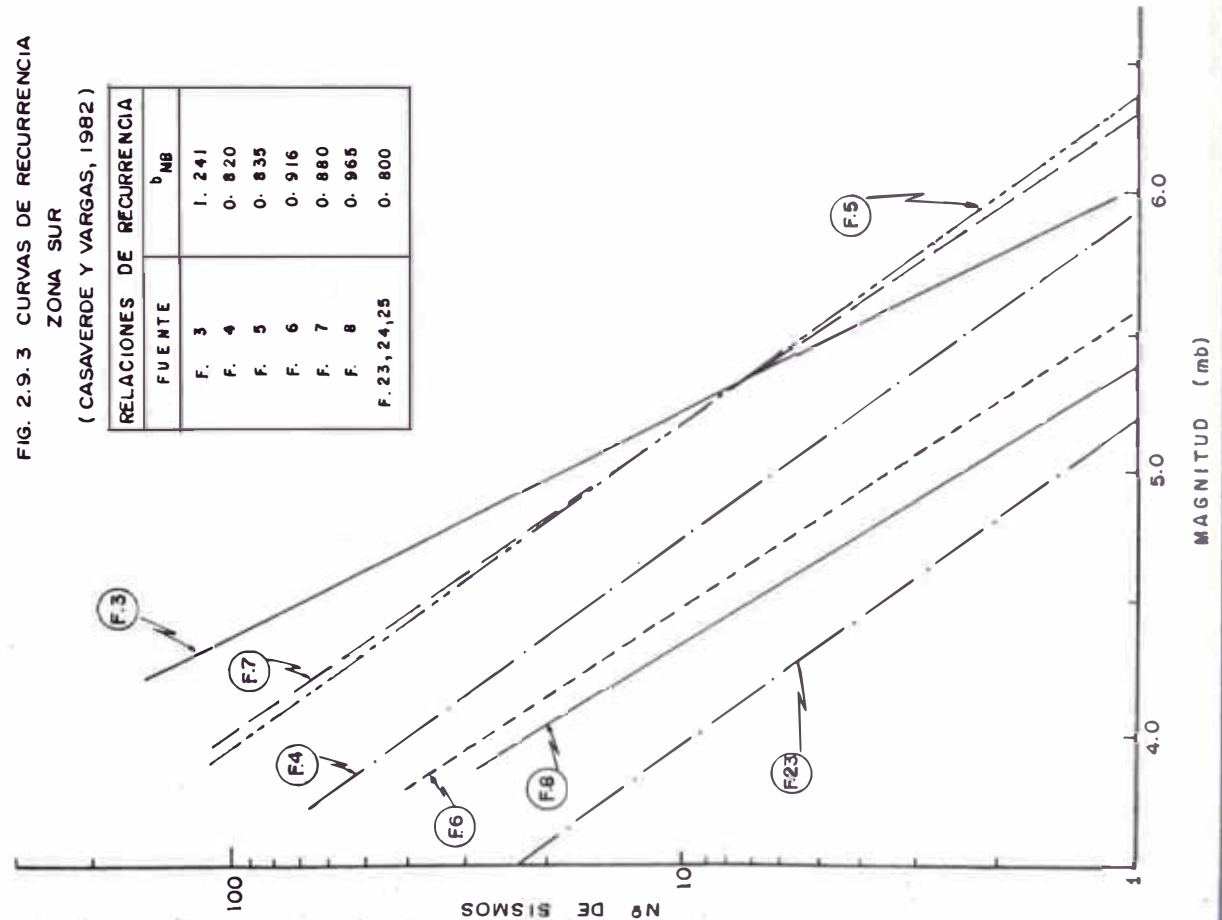
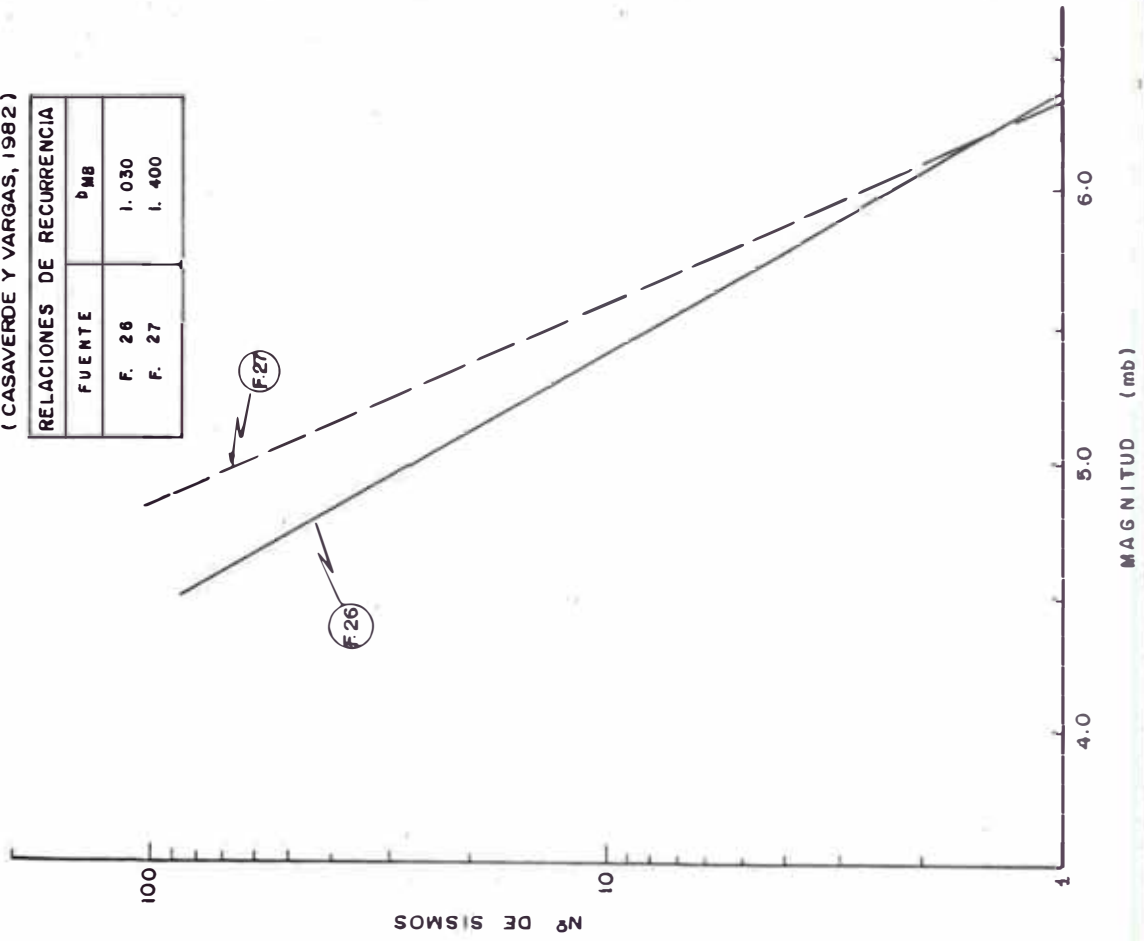


FIG. 2.9.4 CURVAS DE RECURRENCIA
ZONA NORTE DE CHILE
(CASAVEDE Y VARGAS, 1982)



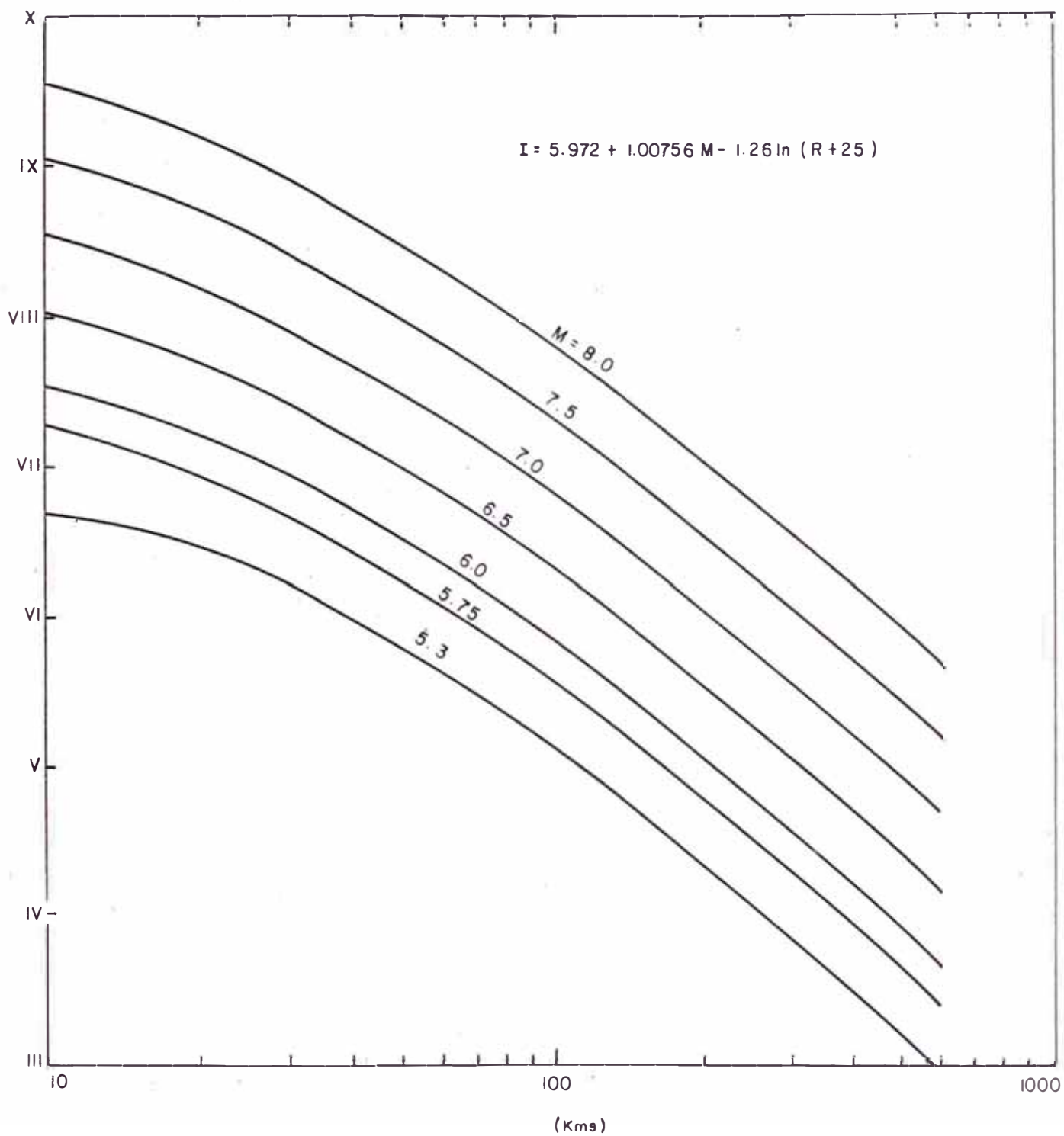
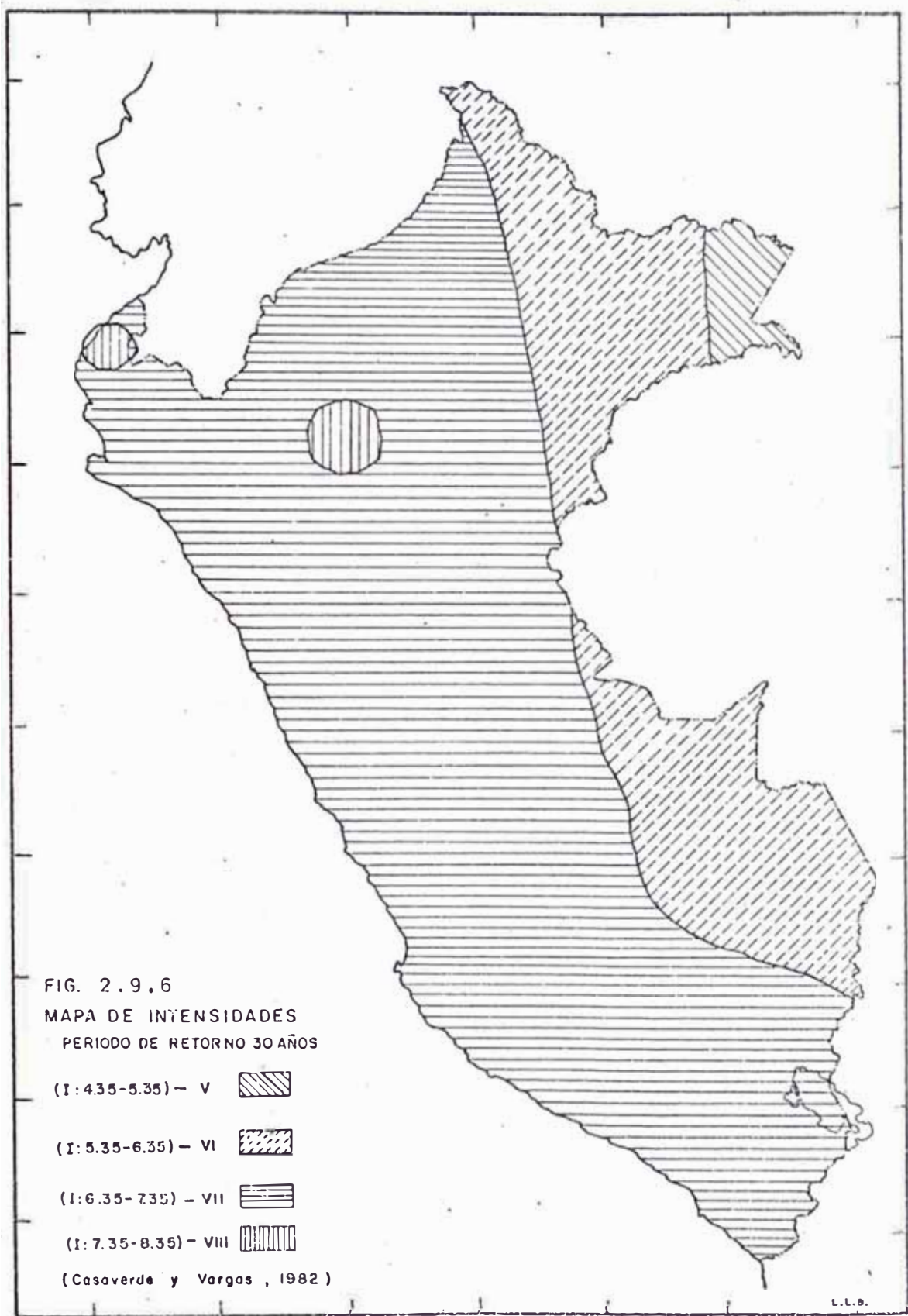
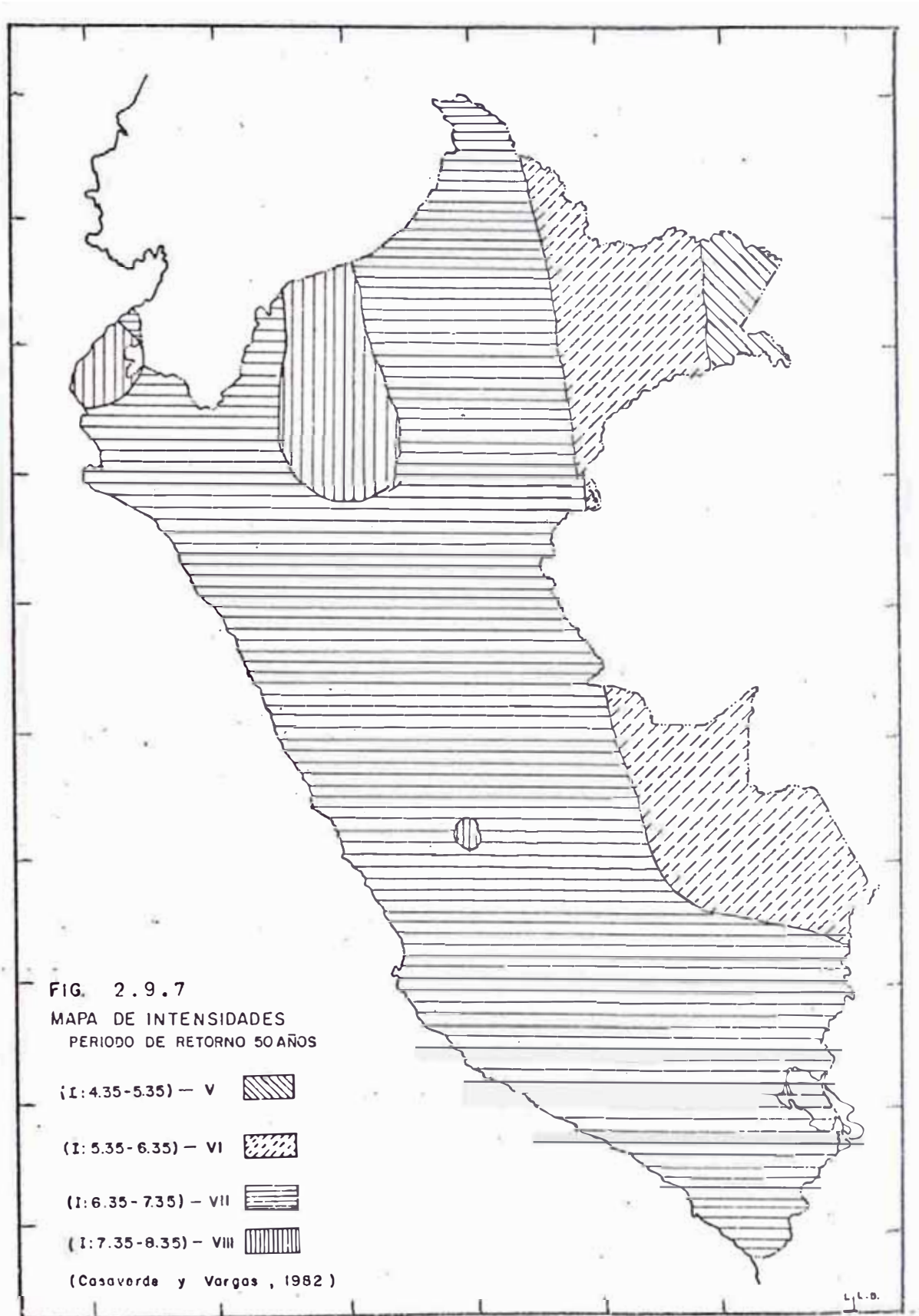


Fig. 2.9.5 - Atenuación de la intensidad (MMI) según el nivel de magnitud de los Sísmos (Ms)

(Casoverde y Vargas 1982)





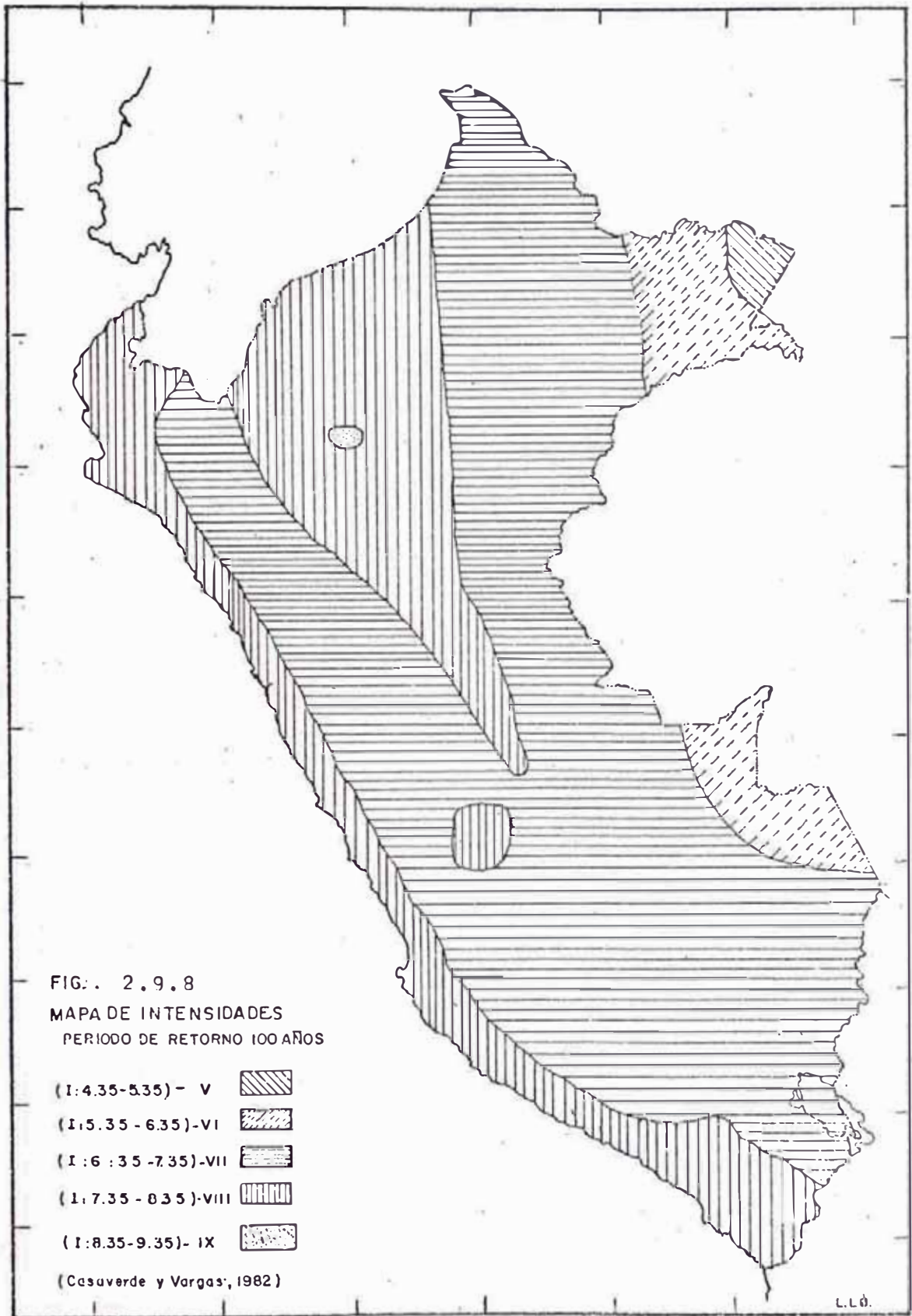


FIG. 2.10.2 CURVAS DE RECURRENCIA
(ORDONEZ, 1984)

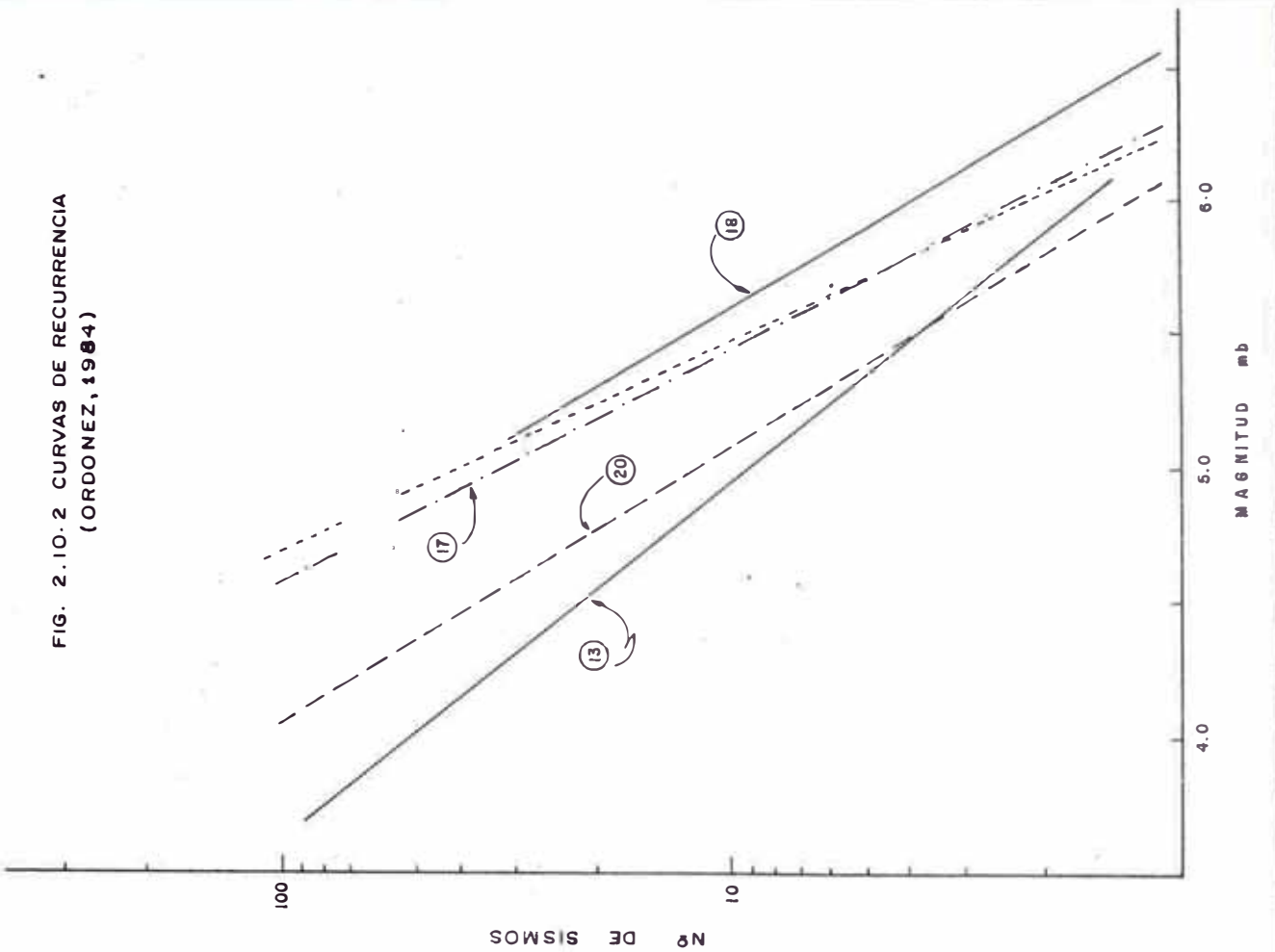


FIG. 2.10.1 CURVAS DE RECURRENCIA
(ORDONEZ, 1984)

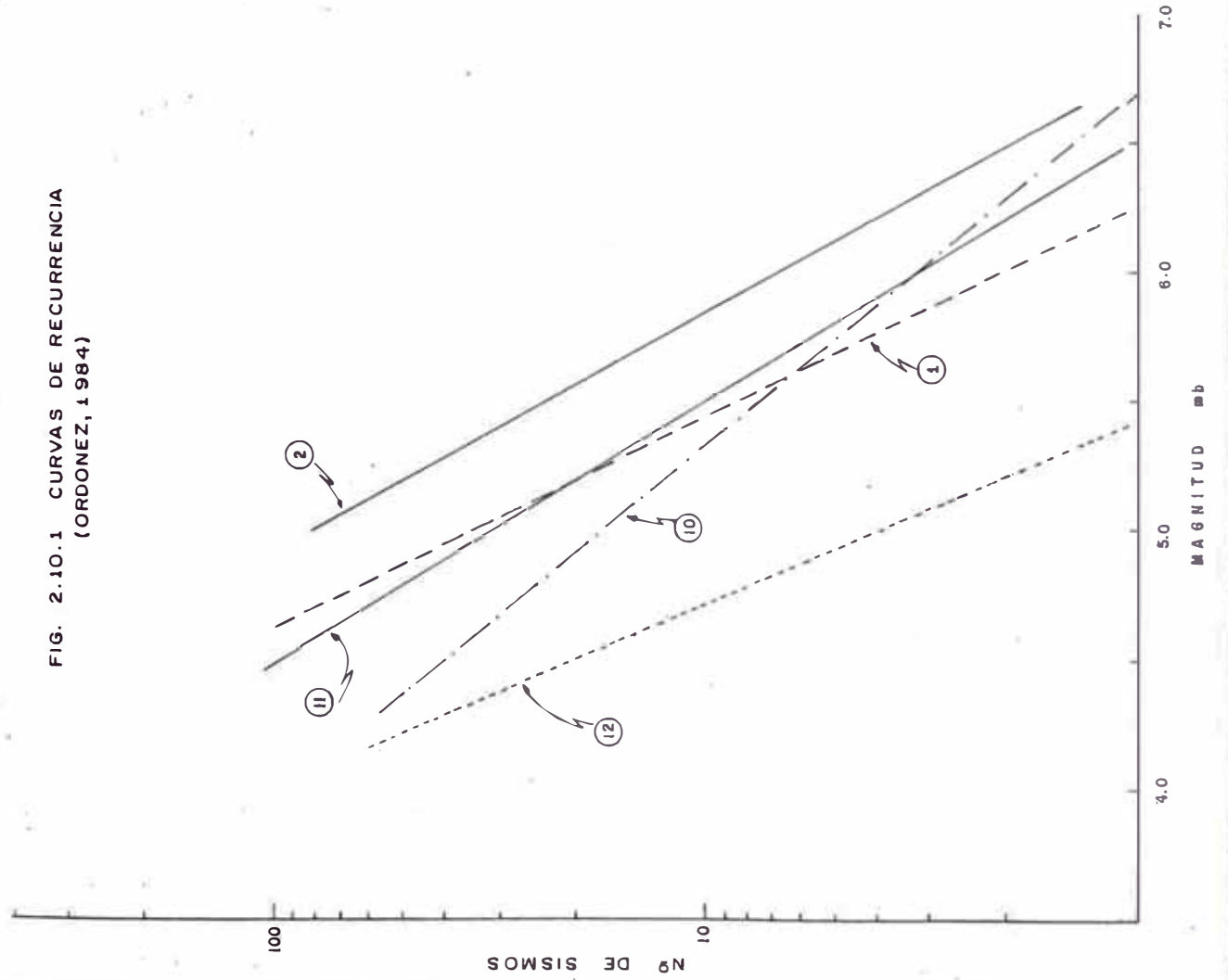


Fig 2.10.3 Relación entre Magnitudes mb y Ms
Catalogo sísmico de la NOAA
PERIODO SISMICO: 1963 - 1981
(Ordoñez 1984)

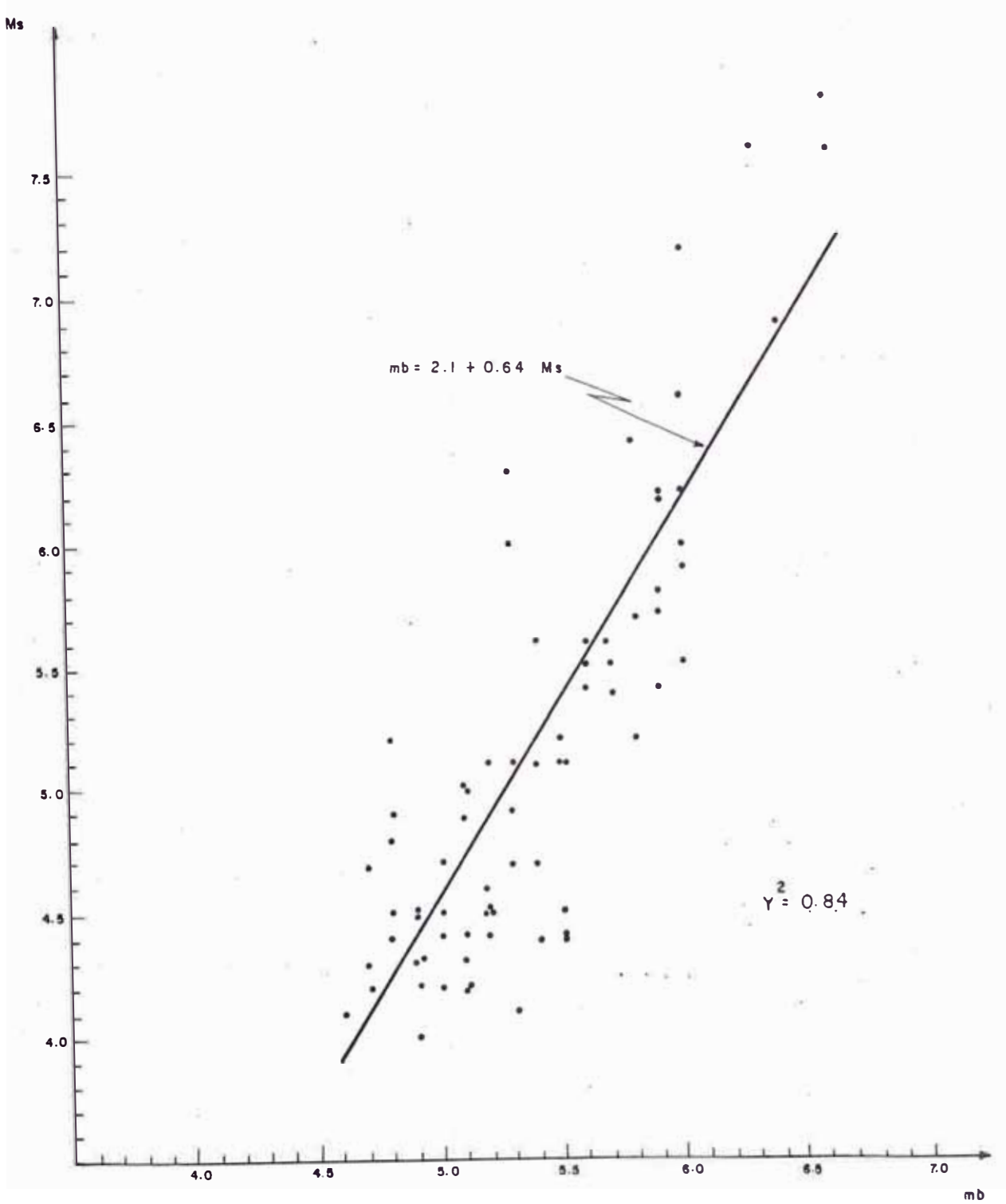
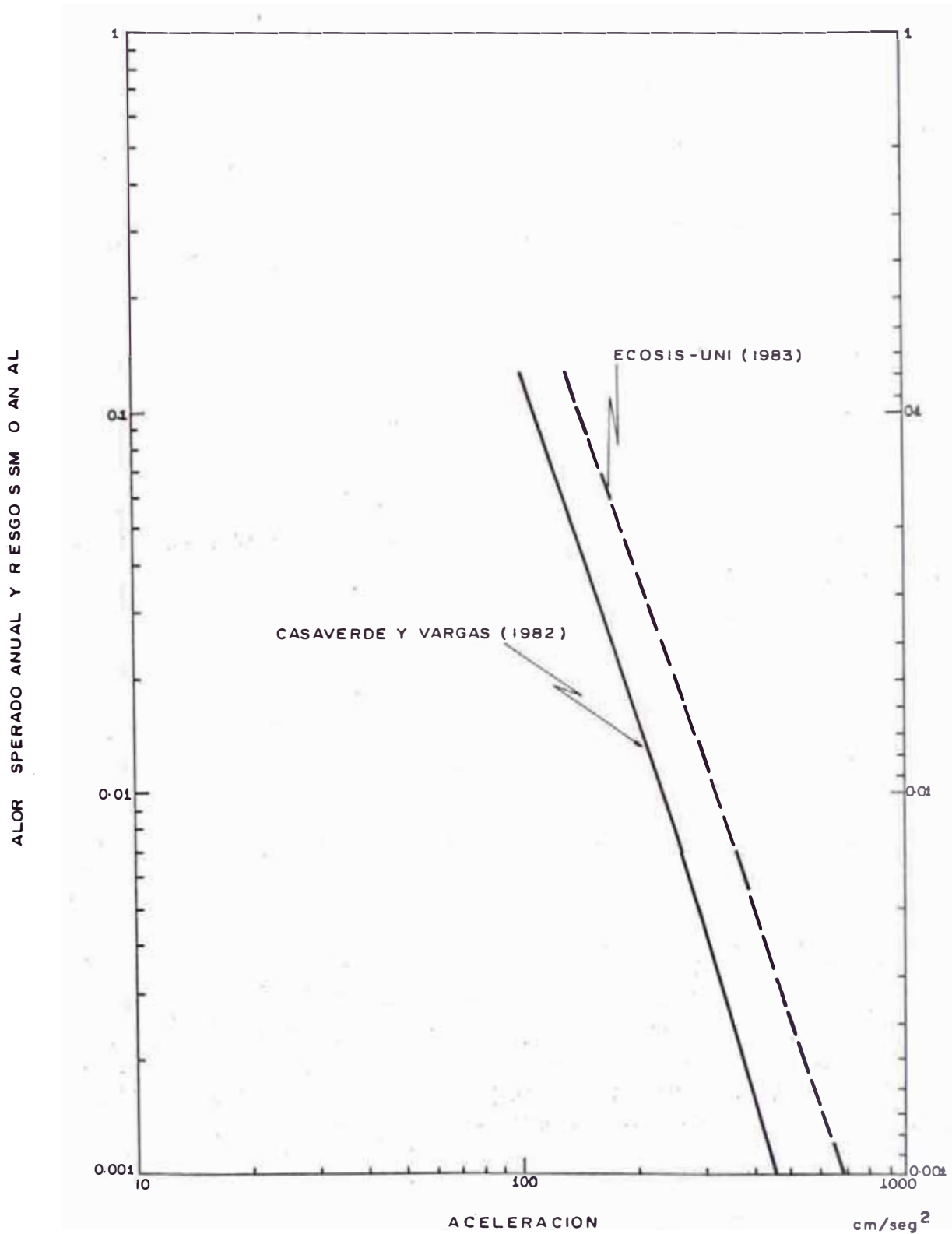


Fig. 2.10.4

Valor esperado anual y riesgo sísmico anual
(Ordoñez, 1, 1984)



HUARAZ (77.53°W, 9.53°S)

Fig. 2.10.5

Riesgo sísmico de Huaraz para un tiempo de exposición de t años
(Ordoñez, 1984)

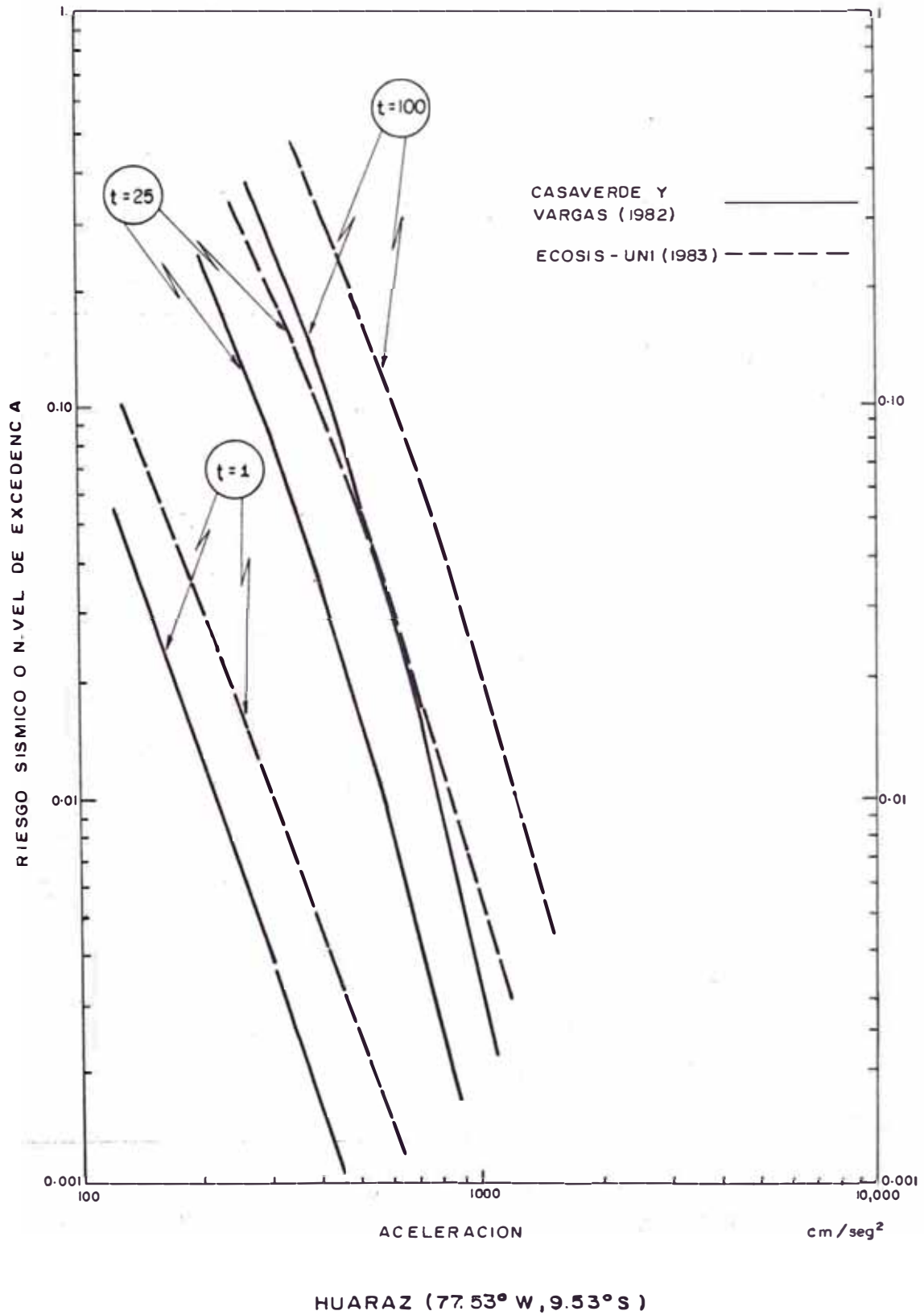
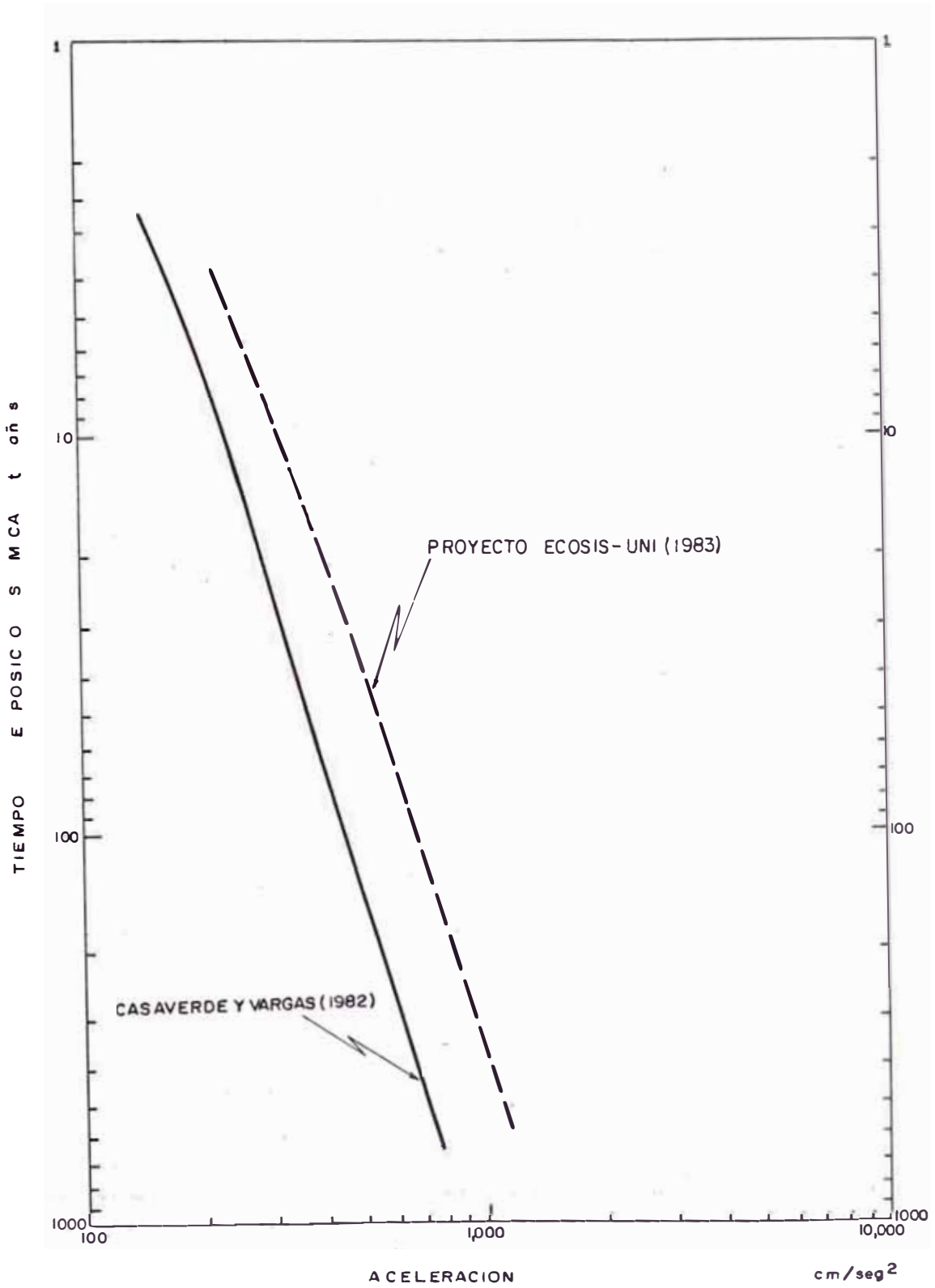


Fig. 2.10.6

Aceleraciones esperadas en Huaraz para un nivel de Confidencia del 90%
(Ordoñez, 1984)



HUARAZ (77.53° W, 9.53° S)

CAPITULO III

REVISION DE LOS CATALOGOS SISMICOS

- 3.1 INTRODUCCION
- 3.2 INFORMACION BASICA DE LOS CATALOGOS SISMICOS
- 3.3 FUENTES INTERNACIONALES DE LOCALIZACION DE SISMOS
- 3.4 CATALOGO SISMICO DE LA NOAA
- 3.5. REVISION DEL CATALOGO DE LA NOAA
- 3.6 OBSERVACIONES ENCONTRADAS EN LA REVISION
- 3.7 CATALOGO DE HIPOCENTROS PERUANOS ECOSIS-UNI 1984
- 3.8 CONCLUSIONES

3.1 INTRODUCCION

Como quiera que cualquier estudio a desarrollarse sobre ingeniería sismo-resistente parte de los datos de un catálogo sísmico de hipocentros, se consideró fundamental revisar completamente toda la información contenida en los catálogos sísmicos existentes, a fin de depurarlos y actualizarlos con los datos más recientes.

La información principal en los catálogos de hipocentros - lo constituye el tiempo de origen, coordenadas epicentrales, profundidad focal y las magnitudes de cada sismo ocurrido. Información complementaria comprende la intensidad máxima, los fenómenos asociados, los efectos culturales, número de región sísmica, etc.

El presente trabajo ha consistido en revisar los sismos peruanos y de áreas vecinas contenidas en el catálogo de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos, cuya versión original se encuentra disponible en cinta magnética en la Universidad Nacional de Ingeniería; para luego elaborar un nuevo catálogo basado en dicha revisión y actualizarlo con información más reciente.

La revisión se efectuó con la finalidad de verificar la consistencia de la información contenida en dicho catálogo y para ello se procedió a verificar cada uno de los sismos, recurriendo a las fuentes originales de información através de sus respectivos boletines. De cada sismo se han verificado todos los parámetros focales tales como fecha, tiem

po de origen, coordenadas epicentrales, profundidad focal y sus magnitudes. Se ha revisado también la información referente a los fenómenos asociados, efectos culturales, número de observaciones, máxima intensidad y número de región sísmica.

Para efectuar esta labor se consultó en la biblioteca del CERESIS (Centro Regional de Sismología para América del Sur) los boletines publicados por las diferentes agencias especializadas en la labor de localización de los sismos: USGS (U.S. Geological Survey), ISC (International Seismological Centre) que anteriormente era la ISS (International Seismological Summary), BCIS (Bureau Central International de Seismologie), G-R (Gutenberg y Richter) y otros más.

De acuerdo a la precisión en el cálculo de los parámetros focales de los sismos, se ha considerado dos grupos de sismos: los sismos históricos (ocurridos hasta 1962) que constituyen los sismos con cálculos aproximados y los sismos instrumentales (a partir de 1963) constituyendo los sismos calculados con mayor precisión.

Para los sismos instrumentales se ha verificado toda la información, pero para los sismos históricos no se ha completado la revisión por falta de algunos boletines en la biblioteca consultada. Una relación de los boletines que faltan se presenta en el Anexo 1.2 .

Terminada la revisión, se preparó un informe conteniendo todas las observaciones encontradas, enviándoselas al USGS

para su consulta. Dicho organismo aceptó gran parte de estas observaciones, dando el visto bueno para las correcciones necesarias. Basado en ello, se elaboró el catálogo de hipocentros ECOSIS-UNI, 1984 implementado en el centro de cómputo de la Universidad Nacional de Ingeniería, incorporándose además los sismos más recientes, comprendiendo un período de datos mayor que el catálogo de la NOAA.

3.2 INFORMACION BASICA DE LOS CATALOGOS SISMICOS

La información sísmica básica sobre una región puede clasificarse en dos grupos: la correspondiente a los parámetros focales de los terremotos y la que se refiere a la distribución de daños y efectos de cada sismo. Un catálogo sísmico debe contener ambos tipos de información en la forma más completa posible, lo cual exige en lo que se refiere a las características de los sismos en su zona focal, la descripción de un buen número de parámetros tales como la caída de esfuerzo, momento, velocidad de ruptura, etc. Pero muchos de estos parámetros (incluyendo las magnitudes mb y las profundidades focales) no son en general determinadas para sismos anteriores a la instalación de estaciones sismológicas para los que la información conocida suele reducirse a los datos sobre fecha y hora de ocurrencia y a las descripciones de daños, que permiten una localización aproximada del evento y en algunos casos estimar un valor de intensidad máxima.

La información proporcionada por los catálogos sísmicos -

para nuestra región comprende sólo los sismos que ocurrieron a partir de 1900, que fueron cuando se instalaron por primera vez instrumentos en Sudamérica. Los sismos anteriores a este siglo en el Perú no están contenidas en los catálogos y sólo constituyen información descriptiva resumida principalmente en los trabajos de Silgado. Sin embargo, la información proporcionada por los catálogos tampoco es completa, por cuanto gran parte de ellos no tienen determinados todos sus parámetros focales. De acuerdo a ello y considerando el desarrollo de la ciencia sismológica así como la mayor cantidad de instrumentos en Sudamérica, se pueden considerar dos períodos en la obtención de los datos sismológicos :

Sismos históricos (los ocurridos hasta 1962)

Sismos con determinaciones aproximadas de localización e hipocentros. Las magnitudes están en función sólo de las ondas de superficie (Ms)

Sismos instrumentales (los ocurridos a partir de 1963)

Sismos con determinaciones precisas de localización e hipocentros. Las magnitudes están en función de las ondas de cuerpo (mb).

Diversas agencias internacionales se encargan de la localización de los sismos y la determinación de sus características, mediante los reportes proporcionados por las distintas estaciones sísmicas distribuidas en todo el mundo. Estas agencias se encargan de publicar los sismos ya calculados a través de sus boletines editados en forma pe

riódica (mensual, semestral, anual ú otro). Estos boletines constituyen la fuente de datos para la elaboración de los catálogos de hipocentros y se debe procurar seleccionar la información más precisa, confiable y completa para cada evento sísmico que haya ocurrido y esté registrado por estas agencias.

3.3 FUENTES INTERNACIONALES DE LOCALIZACION DE SISMOS

Muchas son las agencias encargadas de la localización de los sismos y del cálculo de sus respectivos parámetros focales. Sólo se presentarán las agencias más importantes, siendo los dos primeros los que tienen vigencia y que comprenden la mayor cantidad de los sismos registrados en el mundo. Los otros dos corresponden a sismos más antiguos.

a) U.S. Geological Survey (anteriormente el U.S. Coast and Geodetic Survey)

Este organismo constituye una de las agencias más importantes en el mundo dedicada a la investigación de la sismología y por ende a la localización de los sismos ocurridos en el planeta. Su sede central se encuentra en la ciudad de Golden, Colorado en Estados Unidos. Este organismo que depende del Departamento del Interior de los Estados Unidos, se dedica también a la investigación de otros fenómenos de la naturaleza tales como la meteorología, la oceanografía, la geología, etc.

A través de los años, en el USGS se ha venido efectuando una serie de cambios en lo que se refiere a nombres

y agencias encargadas de la localización de los sismos. En un comienzo esta labor lo realizaba el U.S. Coast and Geodetic Survey (USCGS), organismo que dependía del Departamento de Comercio de los Estados Unidos. En Octubre de 1970, el USCGS se convierte en parte de una nueva agencia, la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), por orden presidencial.

Bajo la NOAA, su nombre es cambiado a NOS (National Ocean Survey) encargado de continuar con la localización de sismos. A mediados de 1971 esta labor es encomendada a la ERL (Environmental Research Laboratories) siempre bajo la NOAA. En Setiembre de 1973, la responsabilidad de esta labor es transferida del Departamento de Comercio al Departamento del Interior, correspondiendo al Geological Survey (USGS) continuar con dicha labor.

Debido a estos continuos cambios, los sismos reportados por esta agencia vienen identificados en algunos catálogos sísmicos como si fuesen de diferentes agencias independientes: sismos CGS, sismos NOS, sismos ERL y sismos GS. Estos sismos son publicados en dos tipos de boletines "Preliminary Determination of Epicenters" y "The Earthquake Data Report", cuyas características son detalladas más adelante. Adicionalmente publica los sismos americanos en los boletines "United States Earthquakes".

Basados en los reportes de las diferentes estaciones y agencias en todo el mundo, el USGS calcula los parámetros focales de los sismos. Los hipocentros en general son calculados en base a las Tablas Sismológicas de Jeffreys

y Bullen (1940) y las de Bolt (1968). Para el cálculo de las magnitudes se utilizan las siguientes fórmulas

$$MS = \text{Log} (A/T) + 1.66 \log D + 3.3$$

donde MS magnitud expresada en función de las ondas superficiales

A amplitud máxima en micrones de la onda de superficie dentro del período de rango $18 \leq T \leq 22$

T período en segundos

D distancia epicentral en grados (de la estación al epicentro), siendo $20^\circ \leq D \leq 160^\circ$

El valor MS considerado es el promedio de los calculados por las diferentes estaciones. Para sismos con profundidades focales mayores de 50 Kms no es evaluada esta magnitud.

La magnitud mb viene dada por :

$$mb = \log (A/T) + Q (d,h)$$

donde: mb magnitud expresada en función de las ondas de cuerpo

A amplitud en micrones, no necesariamente el máximo en el grupo de las P

T período en segundos, y es restringido en el rango $0.1 \leq T \leq 3.0$

Q factor en función de la distancia D y la profundidad h, donde $D \leq 5^\circ$

- b) The International Seismological Centre (anteriormente el International Seismological Summary)

Esta es otra de las agencias más importantes en el mundo, y su sede central se encuentra en la ciudad de Edinburg, en Escocia.

Hasta 1963, esta agencia funcionaba bajo el nombre de el International Seismological Summary, que desde 1918 reportaba los sismos ocurridos en el mundo (sismos ISS). En sus boletines no solo publicaba los sismos ISS sino también de otras agencias, principalmente los del USCGS. En 1964, se convierte en el International Seismological Centre continuando con la labor de la localización de sismos. El ISC publica sus sismos y los reportados por otras agencias como del USGS, LAO, MOS, etc. en dos tipos de boletines "The Monthly Bulletin of the ISC" presentados en orden cronológico y los "The Regional Catalogue of Earthquakes" presentados por regiones sísmicas.

Basados en los reportes de diferentes estaciones y agencias (ver Anexo 1.1) son calculados los parámetros focales de los sismos. Los hipocentros de los sismos ISC son determinados por el método de la Reducción Uniforme (Jeffreys, 1961), que es una variante del método de los Mínimos Cuadrados. Las Tablas Sismológicas de Jeffreys y Bullen (1940) son utilizadas para el cómputo.

La profundidad focal es calculada como una fracción

del radio de la tierra (h_R) pero en los boletines aparece indicado en kilómetros (medido desde la superficie). La fórmula de conversión es:

$$h_{km} = 6338 h_R + 33$$

Para el cálculo de las magnitudes se sigue el procedimiento propuesto por Gutenberg y Richter (1956). La magnitud m_b viene expresada por :

$$m_b = n^{-1} \sum_i [Q(\Delta_i, h) + q_i] \quad 3$$

donde: Q factor en función de la profundidad h y distancia Δ

q es el Log_{10} (amplitud en milicrones/periódodo en segundos) para la estación i .

n número de observaciones.

Se asume que la amplitud ha sido observada en un instrumento de período corto vertical. La magnitud m_b es calculada sólo cuando tres ó más estaciones reportan las observaciones de amplitud.

Cuando las amplitudes y períodos son dadas para ondas de superficie de 20 seg, se calcula la magnitud M_S mediante la expresión:

$$M_S = \log_{10} (A/T)_{\max} + 1.66 \log \Delta + 3.3$$

donde: A amplitud resultante horizontal

T período medio

Δ distancia epicentral en grados

M_S es calculado sólo si la distancia está en el rango

$$20^\circ \leq \Delta \leq 160^\circ$$

c) Bureau Central International de Seismologie :

Organismo cuya sede se encuentra en Strasbourg, Francia. En los boletines BCIS se publican no solamente los sismos reportados por esta agencia (sismos BCI) sino también los sismos de otras agencias, principalmente los del USCGS. Lamentablemente en estos boletines no se incluye información respecto a la forma de cálculo de los parámetros focales.

d) Libro "Seismicity of the Earth" por Gutenberg y Richter, Edición 1954

Estos autores han determinado los parámetros focales de numerosos sismos ocurridos en el mundo. Dado el año de edición del libro, sólo contiene sismos ocurridos hasta 1952. Basados en las fórmulas desarrolladas por ellos mismos para calcular las magnitudes (ver a y b) y en base a los reportes de diferentes estaciones determinaron los valores para una gran mayoría de sismos (sólo los MS).

3.4 CATALOGO SISMICO DE LA NOAA

En la Universidad Nacional de Ingeniería se tiene a disposición en Cinta Magnética un catálogo de hipocentros sudamericanos que ha sido elaborado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), abarcando un área comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas:

85W , 15N	30W , 15N
85W , 60S	30W , 60S

Dicho catálogo contiene un total de 14,169 sismos ocurridos en el presente siglo hasta Mayo de 1981. Del total de sismos, 3,941 corresponden a sismos históricos (los ocurridos hasta 1962) y 10,228 corresponden a los sismos instrumentales (los ocurridos a partir de 1963).

La mayoría de los sismos históricos de este catálogo son los reportados por el USCGS (sismos CGS) pero incluyen también sismos de otras fuentes tales como del ISS, BCI, G-R y otras de fuentes menores. Los sismos instrumentales de este catálogo corresponden solamente a los sismos reportados por el USCGS (USGS a partir de 1973) no incluyen do los sismos de otras fuentes tales como los del ISC.

La información principal de cada sismo de este catálogo es la siguiente :

Fuente, indicada por las iniciales de la Fuente de la cual se ha obtenido la mayor parte ó toda la información referente al sismo (columna 8-10).

Fecha (UT/GMT), indicado por el año (col 12-15), mes (col 17-18) y día (col 20-21) en que ocurrió el sismo. Tiempo de origen (UT/GMT), correspondiendo a la hora (col 23-24), minutos (col 26-27) y segundos (col 29-31). El decimal de los segundos corresponde a la col 31.

Coordenadas epicentrales, expresado en grados decimales. La latitud (N ó S) corresponden a las col. 33-38, siendo los decimales las col. 35-37 y la col 38 para indicar N ó S.

La longitud (W ó E) corresponde a las col. 40-46, sien

do los decimales las col, 43-45 y la col 46 para indicar W ó E.

Profundidad focal, indicado en kilómetros (col. 48-50)

Magnitud mb, indicados en las col 52-54, correspondiendo a las col. 53 y 54 para los decimales. En las col. 56-57 se especifica el tipo de magnitud "mb".

Magnitud Ms, indicados en las col. 76-77, siendo el decimal la col. 77. Las col 79-80 es para especificar el tipo de magnitud "MS"

Otra magnitud, valor obtenido de otras fuentes, No se especifica el tipo de magnitud pero generalmente es MS. Esta magnitud se ubica en las col. 86-88, correspondiendo las col. 87-88 para los decimales. En las col. 90-92 se indica la fuente de donde proviene esta magnitud (PAS, BRK, PAL, etc).

Fenómenos Asociados al sismo.

col 65 ... diastrofismo, que puede ser F (fallamiento superficial), U (levantamiento ó hundimientos), D (fallamiento y levantamiento ó hundimiento).

col 66 ... Tsunamis, que puede ser T (tsunami), Q (posible tsunami).

col 67 Seiches, que puede ser S (seiche), Q (posible seiche).

col 68 ... Vulcanismo, indicado por V (sismo asociado con el vulcanismo)

col 69 ... Neotectönismo, que puede ser R (resquebrajaduras de rocas), C (resquebrajaduras en

minas de carbón), M (fuente meteorítica), E (explosión accidental, controlada ó sospechosa), I (colapso), L (relámpagos u otro fenómeno visual visto)

col 70 Ondas generadas, que pueden ser T (ondas T), A (ondas acústicas), G (ondas de gravedad), B (ambos A y G).

Efectos Culturales, correspondiendo a la col. 84 y que puede ser F (sismo sentido), D (ligeros daños) ó C (muertos y heridos).

. Máxima Intensidad, ubicado en la col. 63. La intensidad viene en la escala Mercalli Modificada donde 1-9 = I-IX, X = X, E = XI, T = XII.

Número de observaciones que se utilizaron para el cálculo del hipocentro (col. 98-100)

. Número de región sísmica, definido por Elinn-Engdahl(col. 72-74).

3.5 REVISION DEL CATALOGO DE LA NOAA

Como ya ha sido mencionado, en la UNI se dispone en cinta magnética de un catálogo de sismos sudamericanos elaborado por la NOAA. Como la finalidad del presente estudio fue la de revisar solamente los sismos peruanos y los de áreas vecinas, era necesario excluir los demás sismos.

3.5.1 SELECCION DE LOS SISMOS PERUANOS Y DE AREAS VECINAS

Mediante un programa de cómputo especialmente desarrollado se efectuó en el Centro de Cómputo de la UNI, la selección

de los sismos ocurridos en el Perú y en sus alrededores dentro de las siguientes coordenadas geográficas :

85W , 03N	66W , 03N
85W , 21S	66W , 21S

obteniendo un total de 4,649 sismos de los cuales 1,287 corresponden al período histórico y 3,362 al período instrumental.

Esta versión de sismos peruanos extrae el contenido principal del catálogo original y es presentado en un nuevo formato constituido por :

col 7-9	: fuente de datos
col 11-14	: año
col 17-18	: mes
col 21-22	: día
col 25-26	: hora
col 29-30	: minutos
col 33-36	: segundos
col 39-44	: latitud del epicentro
col 45	: N (norte) ó S (sur)
col 47-53	: longitud del epicentro
col 54	: E (este) ó W (oeste)
col 57-59	: profundidad focal
col 62-65	: magnitud en función de ondas de cuerpo
col 66-67	: especificación de esta magnitud "MB"
col 70-72	: magnitud en función de ondas de superficie
col 73-74	: especificación de esta magnitud "MS"

col 77-80	otra magnitud adicional
col 81-83	especificación de la fuente de esta <u>mag</u> nitud
col 86-89	magnitud local
col 90-91	; especificación de esta magnitud "MS"
col 95-100	fenómeno asociado (diastrofismo, tsunamis, seiches, volcanismo, neotectonismo y ondas generadas) correspondiendo un - fenómeno para cada columna respectiva-- mente.
col 105	: intensidad máxima
col 114-116	: número de región
col 121	efecto cultural
col 125	· número de observaciones

3.5.2 REVISION DEL CATALOGO

La revisión comprendió todo el catálogo "local" de la NOAA, tanto los sismos históricos como los instrumentales. Esta revisión ha consistido en verificar cada uno de los sismos del catálogo con las fuentes originales a través de sus respectivos boletines, y a su vez de cada sismo verificar toda la información referida al sismo (parámetros focales, intensidad, fenómenos asociados, efectos culturales, etc). Para efectuar la revisión se ha consultado en la biblioteca del CERESIS los boletines de las diferentes agencias especializadas en la localización de sismos. Para los sismos instrumentales se encontraron todas las referencias -

necesarias para su revisión; para los sismos históricos no se pudo completar la revisión ya que no existe varios boletines en dicha biblioteca. Se recurrió a la biblioteca del Instituto Geofísico del Perú a fin de "ubicar" dichos boletines pero lamentablemente tampoco pudieron encontrarse. Una relación de los boletines que faltan ser revisados se presenta en el Anexo 1.2.

3.5.2.1 Revisión de los sismos históricos (hasta 1962)

En este período se encontraron principalmente sismos USCGS (CGS y USE), sismos ISS y sismos G-R. Aparecen también un sismo BOG, un sismo HIG y un sismo CFR, haciendo un total de 1,287 sismos.

Los sismos HIG (1868) y CFR (1906) no han sido verificados por falta de referencia bibliográfica.

Todos los sismos ISS fueron verificados en los boletines de la International Seismological Summary, boletines que empezaron a publicarse desde 1918 hasta 1963, año en que este organismo se convirtió en la International Seismological Centre (ISC). La colección completa se encuentra en la biblioteca del CERESIS.

Todos los sismos G-R fueron verificados en el libro "Seismicity of the Earth" de Gutenberg y Richter; Ed. 1954. En las tablas de este libro se recopila la información de los sismos calculados por estos autores.

Los sismos BCI y el sismo BOG (1959) fueron verificados

de los boletines de la Bureau Central International de Seismologie. Estos boletines se publican aproximadamente cada semana, dependiendo del número de sismos ocurridos en ese lapso, pero no dan referencia del año en que empezaron estas publicaciones; en la biblioteca del CERESIS estos boletines están incompletos, habiéndose encontrado los mismos a partir de 1955. Debido a lo anterior, no se han podido verificar los sismos BCIS anteriores a dicho año y algunos de años posteriores.

La revisión de los sismos CGS resultó tediosa debido a que estos sismos han vuelto a ser recalculados, dificultando la determinación de la bibliografía correcta para su revisión. A pesar de ello, se procedió a la revisión y se ha seguido la priorización de los siguientes boletines para ello :

a) boletines USE, del U.S. Coast and Geodetic Survey.

Estos boletines anuales presentan un resumen de los sismos reportados por este organismo desde 1928. Lamentablemente no existe la colección completa en la biblioteca del CERESIS, habiéndose verificado con estos boletines los sismos CGS hasta 1944, los de 1955 y los de 1956.

b) boletines de la BCIS, que recopila también los sismos reportados por el USCGS. Con estos boletines se revisaron los sismos CGS que no pudieron ser verificados con los boletines anteriores; se han verificado estos sismos desde 1957 hasta 1962 pero quedaron algunos sin verificarse ya que estos boletines también están incomple

pletos.

El U.S. Coast and Geodetic Survey publica sus sismos en los "Preliminary Determination of Epicenters" (PDE) poco después de ocurridos los eventos, pero muchos de ellos - vuelven a ser recalculados por el mismo organismo. Debido a ello, no se ha considerado estos boletines en la revisión de los sismos CGS.

Los sismos USE fueron revisados de los boletines USE arriba mencionados.

3.5.2.2 Revisión de los sismos instrumentales (desde 1963)

En este período se encontraron sólo sismos del USGS (CGS, NOS, ERL, GS) en un número de 3362 sismos, habiéndose verificado toda la información contenida en el catálogo.

Los sismos de 1963 fueron verificados con los boletines BCIS.

Los sismos a partir de 1964 fueron verificados de los boletines de la International Seismological Centre (año en que se establece este organismo), completándose la revisión con los boletines del USGS (los "Preliminary Determination of Epicenters" y los "Earthquake Data Report"). Con los boletines ISC se verificaron la mayor parte de la información: fecha, tiempo de origen, latitud y longitud del epicentro, profundidad focal, magnitudes mb y Ms. El resto de la información tales como la intensidad, número de región, fenómenos asociados, etc. fueron verificados -

con los boletines del USGS.

Las características de estos boletines son

a) boletines del ISC :

- . "Bulletin of the ISC", publicación mensual que resume los sismos ocurridos en el mundo en varias versiones (ISC, USCGS, MOS, LAO, etc).

La biblioteca del CERESIS dispone de estos boletines desde el Vol. 1 (Enero 1964) hasta el volumen correspondiente a Setiembre de 1981.

"The Regional Catalogue of Earthquakes", publicación semestral. En estos boletines los sismos que han sido publicados previamente en los boletines mensuales, - son agrupados por Regiones Sísmicas.

Se dispone en la biblioteca del CERESIS desde el Vol. 1 (Enero-Junio 1964) hasta el Vol. 18 (Enero-Junio - 1981).

b) boletines del USGS :

- . "Preliminary Determination of Epicenters" (PDE), publicación mensual que recopila sólo los sismos reportados por el USGS. No se tiene referencia del año en que empezaron estas publicaciones, encontrándose en la biblioteca del CERESIS boletines desde 1953 hasta Mayo de 1983 (hasta el año 1967 están en Tarjetas).
- "The Earthquake Data Report" (EDR), boletines en donde los sismos publicados en los PDE aparecen con mayor precisión (aproximación hasta el milésimo en los parámetros focales), conteniendo además información

adicional tal como : la desviación standard de los parámetros calculados y las estaciones que reportaron el evento.

Tampoco se referencia el año en que estas publicaciones empezaron, encontrándose en la biblioteca del CERESIS boletines desde 1965 hasta 1983.

Comparando los EDR y los PDE con los sismos USGS que aparecen en los boletines del ISC se concluye que existe coincidencia en todos los sismos a partir de 1968. Para sismos anteriores (de 1964 hasta 1967) muchos de los sismos publicados en los PDE ó EDR han sido recalculados nuevamente por el USGS, y como el ISC edita sus boletines con mucho tiempo de retraso a diferencia de los boletines del USGS que salen al poco tiempo de ocurridos los eventos, - los sismos que aparecen en los boletines del ISC son los definitivos. Por tal razón los sismos de los boletines PDE ó EDR no necesariamente coinciden con los sismos USGS publicados en los boletines del ISC para este período (de 1964 hasta 1967).

A partir de 1968 los sismos publicados en los PDE ó EDR son determinados en forma más precisa de tal forma que ya no vuelven a ser recalculados. De ahí que a partir de ese año no se encuentre diferencia con los sismos USGS que aparecen en los boletines del ISC.

Es importante indicar que los sismos USGS que aparecen en los boletines ISC no contienen toda la información referida al sismo tales como : el número de región, número de

observaciones, algunas magnitudes adicionales, intensidad máxima, efectos culturales y fenómenos asociados. Toda esta información sí aparece en los boletines PDE y EDR.

3.6 OBSERVACIONES ENCONTRADAS EN LA REVISION

Como la revisión del catálogo ha sido realizado consideran do dos períodos de datos: sismos históricos y sismos instrumentales, las observaciones encontradas como resultado de esta revisión se han especificado para cada caso.

3.6.1 Para los sismos históricos

. Gran parte de los sismos verificados coinciden con los boletines respectivos, sin embargo existen algunas discrepancias en uno u otro parámetro.

. Muchos sismos CGS difieren de los diferentes boletines debido a que estos sismos han sido recalculados.

Se ha detectado duplicidad de algunos sismos, apareciendo un mismo sismo bajo dos fuentes distintas.

. De la revisión de los diferentes boletines se ha encontrado algunos sismos ISS, G-R y CGS que deberían ser incorporados al catálogo.

Se ha detectado también que algunos sismos CGS del catálogo no están en los boletines revisados, pudiendo tratarse de sismos registrados por el USCGS después del editado de los boletines.

3.6.2 Para los sismos instrumentales

- . Casi la totalidad de los sismos del catálogo coinciden con los boletines correspondientes, existiendo muy pocas discrepancias en algunos de ellos.
- . Algunos sismos de 1963 difieren de los boletines debido a que volvieron a ser recalculados, al igual que algunos sismos de Abril y Mayo de 1967.

Se ha detectado siete sismos que no están en los boletines revisados.

Este catálogo no ha incluido sismos reportados por otras fuentes, especialmente los sismos ISC.

3.7 CATALOGO DE HIPOCENTROS PERUANOS ECOSIS-UNI 1984

Como resultado de la revisión efectuada al catálogo de la NOAA para los sismos peruanos y áreas vecinas, se consideró necesario elaborar un catálogo con información consistente y actualizado, tomando como base el catálogo de la NOAA.

Para ello se preparó un informe para el U.S. Geological Survey, indicando detalladamente todas las observaciones encontradas en esta revisión. El USGS consultó estas observaciones con sus propias fuentes de información y aceptaron gran parte de las incorrecciones detectadas, dando el visto bueno para que se efectúen las correcciones pertinentes.

De acuerdo a ello, en el Centro de Cómputo de la Universidad Nacional de Ingeniería se procedió a elaborar un "nuevo" catálogo sísmico basado en el de la NOAA y al que se le denominó "Catálogo de hipocentros peruanos ECOSIS-UNI -

1984".

Este nuevo catálogo se basa pues en el catálogo de la NOAA para sismos peruanos y áreas vecinas y al que se le ha efectuado los siguientes cambios :

se modificó los valores de algunos parámetros, de acuerdo a la respuesta dada por el USGS sobre la revisión efectuada.

se incluyeron los sismos reportados por el ISC y también algunos sismos de otras fuentes que no estaban incluidos en el catálogo de la NOAA.

. se actualizó el catálogo hasta Julio de 1982.

Como este nuevo catálogo se elaboró en base al catálogo NOAA el de sismos peruanos y de áreas vecinas, sus límites geográficos son los sismos.

85W	03N	66W	03N
.85W	21S	66W	21S

abarcando sismos más allá de las fronteras peruanas, pero considerados como influyentes en el Perú .

Sin embargo, considerando que el USGS está trabajando en la elaboración de un catálogo integral único de hipocentros para toda Sudamérica, se purgó al catálogo ECOSIS-UNI los sismos cuyos epicentros no estaban dentro del territorio peruano, a fin de poder integrarse a este catálogo sudamericano y evitar de esta forma la superposición y duplicidad de sismos de otros países. Existe una versión en cinta magnética del catálogo elaborado.

3.8 CONCLUSIONES

- . A los sismos que ocurrieron hasta 1962 se les ha denominado históricos porque sus parámetros han sido calculados en forma aproximada. Estos sismos además no tienen calculado su magnitud mb (calculados en función de ondas de cuerpo) y son pocos los que tienen determinada su profundidad focal.
- . A partir de 1963 la localización de sismos se vuelve más precisa teniendo casi todos estos sismos calculadas la magnitud mb y la profundidad focal.
- . De los 4,649 sismos del catálogo revisado, sólo 229 sismos no han sido verificados por falta de bibliografía. Estos sismos corresponden al período histórico. La revisión de los sismos USCGS históricos resultó ser difícil por cuanto estos sismos han sido recalculados continuamente, dificultando encontrar la referencia bibliográfica correcta para su verificación.
- . Se puede concluir que el catálogo NOAA presenta información consistente para los sismos instrumentales y algunas incorrecciones para los sismos históricos siendo lo más importante la duplicidad de sismos. En cuanto al catálogo ECOSIS-UNI, 1984, podemos decir que viene a ser el catálogo NOAA depurado y actualizado, destacando la incorporación de los sismos del ISC.

CAPITULO IV

RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE ANCASH SIN CONSIDERAR LA INFLUENCIA DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

- 4.1 INTRODUCCION
- 4.2 FUNDAMENTOS DEL RIESGO SISMICO
- 4.3 REVISION DE LA INFORMACION SISMOTECTONICA
DEL DEPARTAMENTO DE ANCASH
- 4.4 FUENTE DE DATOS
- 4.5 EVALUACION DE LAS FUENTES SISMOGENICAS
- 4.6 ANALISIS ESTADISTICO DE RECURRENCIA SISMICA
- 4.7 LEYES DE ATENUACION
- 4.8 EVALUACION DEL RIESGO SISMICO
- 4.9 CONCLUSIONES

4.1 INTRODUCCION

El presente capítulo tiene por finalidad evaluar el riesgo sísmico de todo el departamento de Ancash, utilizando parámetros de recurrencia sísmica determinados en este estudio y comparar los resultados con aquellos obtenidos utilizando los parámetros determinados por Casaverde y Vargas (1982). Fundamentalmente se trata de calcular nuevos parámetros de recurrencia utilizando los datos de un catálogo de hipocentros revisado, depurado y actualizado. El catálogo empleado por dichos autores fue el Catálogo del Instituto Geofísico del Perú, que tiene información hasta 1980.

La metodología empleada es la misma que la utilizada por Casaverde y Vargas, o sea, la desarrollada por Cornell (1968), modificada por McGuire (1976) con su programa de cómputo RISK. Dicha metodología involucra la delineación de fuentes generadoras de sismos (fuentes sismogénicas), la recurrencia sísmica de dichas fuentes, leyes de atenuación de energía sísmica y finalmente, la evaluación numérica del riesgo sísmico en términos de intensidades máximas asociadas a períodos de retorno.

De acuerdo a esta metodología, se realiza en primer lugar un resumen de la sismicidad y de las características tectónicas y geológicas de la región, indispensables en la delimitación de las fuentes sismogénicas influyentes en la región.

En el presente estudio se utilizan las fuentes sismogénicas propuestas por Casaverde y Vargas (1980), debiendo men

cionar en el capítulo VI se modelará una fuente sismogénica lineal adicional identificando a la falla de la Cordillera Blanca, para evaluar su efecto en la determinación del riesgo sísmico del departamento de Ancash.

Se han considerado 12 fuentes sismogénicas con influencia en la región estudiada, las mismas que fueron utilizadas por Ordoñez (1984) en la evaluación del riesgo sísmico de la ciudad de Huaraz.

El análisis estadístico de recurrencia se efectuó para las 27 fuentes sismogénicas de Casaverde y Vargas, confeccionándose dos juegos de parámetros: los obtenidos con los datos del catálogo de la NOAA revisado y depurado, con información hasta 1981; y los obtenidos con los del catálogo ECOSIS-UNI, con información hasta 1982. Dado que los resultados obtenidos con ambos son muy similares, se ha optado por considerar para el presente estudio sólo los obtenidos con el catálogo de la NOAA, ya que cubre completamente las 27 fuentes, a diferencia del nuevo catálogo que no cubre las fuentes 26 y 27 que están en Chile.

Las leyes de atenuación utilizadas fueron las propuestas por Vargas (1979), quien formuló ecuaciones de atenuación para la aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo. Sin embargo, sólo se ha considerado para los cálculos las atenuaciones de la aceleración.

Finalmente el riesgo sísmico anual es evaluado utilizando el programa de cómputo RISK; con los resultados del análisis se confeccionaron mapas de isoaceleraciones para perío

dos de retorno de 30, 50 y 100 años. Los cálculos se efectuaron usando los parámetros obtenidos en el presente estudio y también los parámetros de Casaverde y Vargas (1982). Para la confección de los mapas se ha evaluado el riesgo anual para todo el área de Ancash comprendida entre las coordenadas 76,8° a 78,6° de longitud oeste y entre 8,1° a 10,7° de latitud sur, usando intervalos de 0,2° tanto para la longitud como para la latitud.

Adicionalmente, se ha evaluado el riesgo sísmico anual para las ciudades de Huaraz y Chimbote, consideradas como las más importantes de dicho departamento.

4.2 FUNDAMENTOS DEL RIESGO SISMICO

El riesgo sísmico se define como la probabilidad que en un lugar determinado ocurra un movimiento sísmico de una intensidad igual ó mayor que un cierto valor fijado. En general se hace extensivo el término intensidad a cualquier otra característica del movimiento del suelo tal como la aceleración máxima, el valor espectral de la velocidad, el valor espectral del desplazamiento, la intensidad en la escala Mercalli Modificada u otro parámetro.

La teoría en la cual está basada este método, ha sido desarrollada por A. Cornell (1968), modificada por R. McGuire en su programa de cómputo RISK (1976). En su forma básica está representada por el Teorema de la Probabilidad Total:

$$P(A) = \iint P[A/m \text{ y } r] \cdot f_M(m) \cdot f_R(r) \, dm \, dr \dots\dots (2)$$

donde P indica la probabilidad, A es el evento cuya probabilidad es buscada, m y r son variables aleatorias continuas e independientes que influyen en A . Expresando la relación en palabras diríamos que la probabilidad que A ocurra puede ser calculada multiplicando la probabilidad condicional de A dado los eventos m y r , por las probabilidades independientes de m y r , e integrando todos los valores posibles de m y r . Como la ocurrencia de un evento sísmico es de carácter aleatorio, entonces esta teoría de las probabilidades es aplicable.

Para evaluar el riesgo sísmico de un lugar, la sismicidad y otras características de sismos regionales ocurridos en el pasado deben ser revisados y usados para desarrollar predicciones probabilísticas sobre eventos futuros. La estimación del riesgo sísmico considera entonces que las ocurrencias sísmicas futuras en la región, tendrán el mismo promedio de ocurrencia que el de los sismos pasados en la misma región. Esta predicción requiere una integración de la información acerca de los tiempos, localizaciones y tamaños de terremotos importantes, además de información acerca de la atenuación de la intensidad sísmica.

4.2.1 ELEMENTOS PARA EL CALCULO DEL RIESGO SISMICO

De los fundamentos teóricos expuestos, se deduce que para calcular la máxima intensidad sísmica de un lugar se debe seguir la siguiente secuencia:

- a.- identificación de las fuentes sismogénicas
- b.- análisis estadístico de recurrencia sísmica

- c.- determinación de la atenuación de la energía sísmica
- d.- cálculo de la intensidad máxima del suelo en términos de probabilidad $P(A)$

En la Figura 4.1 se muestra la secuencia seguida en la evaluación del riesgo sísmico.

Las fuentes sismogénicas constituyen zonas generadoras de sismos con características sismotectónicas particulares.

En base a la geología y a la sismicidad histórica e instrumental de la región, las fuentes pueden representarse como focos puntuales, segmentos lineales y segmentos anulares (Cornell, 1968). Las fallas representadas por segmentos lineales pueden representarse por una serie de puntos con tal densidad que la diferencia entre elementos continuos y discretos son insignificantes. Para representar fuentes similares y las que se encuentran en la naturaleza, tales como fallas con rumbo ó buzamiento, pueden combinarse fuentes lineales como fuentes cuadrangulares para formar la superficie adecuada, de este modo se puede introducir el efecto de tercera dimensión en el análisis (Huaco, 1981).

La recurrencia de sismos de los diferentes rangos de magnitud se basa en los datos sísmicos, luego se emplea la regresión lineal para encontrar la relación del número de sismos con la magnitud. De acuerdo a la información disponible, en cada fuente se determinan la mínima y máxima magnitud.

La máxima intensidad de un sitio se determina utilizando ecuaciones empíricas de atenuación que relacionan la intensi

dad, la magnitud y la distancia epicentral ó distancia a la falla según sea el caso. Esta intensidad puede estar representada ya sea por la aceleración, la velocidad, el desplazamiento, la intensidad (MM) u otro parámetro. Lamentablemente las curvas de atenuación están basadas en datos que no son uniformes debido a que varían las condiciones locales, las técnicas de detección, el equipo, etc. La selección de la ecuación debe realizarse cuidadosamente para una región determinada.

Finalmente para evaluar numéricamente el riesgo sísmico de un lugar en términos de probabilidad asociado a períodos de retorno, se ha desarrollado el programa de cómputo RISK.

4.2.2 PROGRAMA DE COMPUTO RISK

El programa de cómputo RISK desarrollado por Robin McGuire (1976) en el U.S. Geological Survey, evalúa numéricamente la integración de la expresión (1) en donde : A representa el evento que un valor especificado de intensidad sea excedido en el lugar de interés durante un sismo. Las variables m y r representan el tamaño del sismo (magnitud ó intensidad epicentral en la escala Mercalli Modificada) y la distancia desde el lugar de interés.

El programa de cómputo evalúa la integración para cada fuente sismogénica independientemente y calcula el número de eventos esperados anuales en dicha fuente. El número total de eventos esperados anuales que causan intensidad mayor ó igual que la especificada en el lugar de interés se obtiene de la

sumatoria de los eventos esperados anuales de cada fuente sismogénica. Si este total es menor que 0.1, este número es aproximadamente igual al riesgo asociado con ese nivel de intensidad.

El riesgo anual es finalmente calculado asumiendo que los terremotos siguen la relación de Poisson (McGuire, 1976) indicada en la siguiente ecuación:

$$\text{RISK}_{\text{anual}} = 1 - e^{-\text{EXP}_{\text{anual}}} \dots\dots\dots (2)$$

En el programa RISK, tanto el riesgo sísmico anual como el número de eventos esperados anuales (valor esperado anual) son listados, correspondiendo a varias intensidades analizadas. Adicionalmente se calculan por interpolación valores de intensidades para varios niveles de riesgo anual especificados (0.1, 0.02, 0.01, 0.005, etc).

4.2.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS DEL RISK

Como ya se mencionó, el programa de cómputo RISK calcula el riesgo sísmico anual ($\text{RISK}_{\text{anual}}$) y también el valor esperado anual ($\text{EXP}_{\text{anual}}$), para varias intensidades dadas.

Con estos resultados se desarrollan una serie de conceptos y definiciones a ser utilizados en la obtención de los parámetros sismo-resistentes para el diseño de las diferentes obras emplazadas en el lugar analizado.

Así tenemos que:

el riesgo sísmico ó peligro sísmico ó probabilidad de excedencia, para un tiempo determinado t (tiempo de exposición sísmica) puede ser expresado en función del ries

go sísmico anual

$$RISK_t = 1 - (1 - RISK_{anual})^t \dots\dots\dots(3)$$

El valor esperado anual asociado a una intensidad dada, se define como el número de sismos, que en promedio va a ocurrir de intensidad igual ó mayor a una intensidad dada, durante un año. Generalmente resultan valores menores que la unidad pero es posible que pueda ser mayores también, dependiendo de la actividad sísmica de la zona.

Según ésto, el período de retorno promedio en años (R) de un sismo de tal intensidad ó mayor, se expresa como:

$$R = \frac{1}{EXP_{anual}} \dots\dots\dots(4)$$

El nivel de confianza ó nivel de confianza viene a ser la probabilidad que en un lugar determinado no ocurra un movimiento sísmico de una intensidad igual ó mayor que un cierto valor dado.

Según esto

$$NIVEL DE CONFIDENCIA = 1 - RISK \dots\dots\dots(5)$$

4.3 REVISION DE LA INFORMACION SISMOTECTONICA DEL DEPARTAMENTO DE ANCASH

En la delineación de las fuentes sismogénicas para consecuentemente lograr una adecuada caracterización de la actividad sísmica de la zona en estudio, se hace indispensable el análisis de la información disponible sobre la sismicidad, tectónica y geología de la región de influencia.

Dado que en el presente estudio se han utilizado las fuentes sismogénicas propuestas por Casaverde y Vargas (1980), solamente se describirá brevemente las características arriba mencionadas, necesarias en la delineación de las zonas generadoras de sismos.

4.3.1 SISMOTECTONICA DE LA REGION

Los elementos principales del régimen sismotectónico peruano que afectan el departamento de Ancash se puede resumir en

- . la zona de subducción a lo largo de la costa oeste del Perú, donde la Placa Oceánica de Nazca descendente está siendo cubierta por la Placa Continental Sudamericana.
- . las fallas tectónicas continentales activas que afectan la Cordillera Blanca, el valle del río Santa y la Cordillera Negra.

Se ha observado que la mayor parte de la actividad tectónica en el mundo se concentra a lo largo de los bordes de las placas, cuyos frotamientos mutuos entre ellas es lo que produce los terremotos, los volcanes y las orogenias, los cuales se concentran a lo largo de los bordes de las placas.

La tectónica de placas señala una interacción por subducción de la placa de Nazca con relación a la placa Sudamericana produciéndose a ángulos variables. La sismicidad y la solución de mecanismos focales de varios sismos peruanos,

evidencian que esta superficie de escurrimiento es de bajo ángulo (10° - 15°) en la zona central y norte del Perú (Stauder, 1975).

La placa Sudamericana crece de la cadena meso-oceánica del Atlántico, avanzando hacia el noroeste con una velocidad de 2 a 3 cms por año y se encuentra con la placa Nazca en su extremo occidental, constituido por la costa sudamericana del Pacífico. Por otro lado, la placa Nazca crece de la cadena meso-oceánica del Pacífico Oriental y avanza hacia el este a una velocidad de 5 a 10 cms por año, subyaciendo debajo de la placa Sudamericana con una velocidad de convergencia de 7 a 12 cms por año (Berrocal et al, 1975).

Como resultado del encuentro de las dos placas y la subducción de la placa Nazca, han sido formados la Cadena Andina y la fosa Perú-Chile en diferentes etapas evolutivas y son responsables de la mayor proporción de actividad sísmica en nuestro continente.

La Cordillera de los Andes atraviesa el departamento de Ancash ramificada en dos cadenas de montañas: la Cordillera Blanca y la Cordillera Negra, corriendo paralela entre ellas el río Santa. La presencia de varios tipos de rocas intrusivas volcánicas, sedimentarias, metamórficas falladas y plegadas son el testimonio del intenso dinamismo a la que ha estado sometida, siendo su sistema de fallamiento más dominante el longitudinal a la Cordillera Blanca. La Cordillera Blanca está constituida fundamentalmente por un batolito de 3 a 12 millones de años de edad. Este batolito se encuentra emplazado entre 2 sistemas casi parale-

los de fallamiento regional que son parcialmente sísmicamente activos (Informe Recreta, 1982)

a) El sistema de fallamiento al Noreste de la Cordillera Blanca, consituído por un complejo de fallas de sobre-escurrimientos y normales que vienen del Sur desde la latitud 13°s, y es paralelo al eje Andino. El fallamiento se emplaza dentro de las unidades cretácicas y muestra un ancho conocido de 30 Kms.

La actividad sísmica asociada a este sistema se ubica al Norte de la Cordillera Blanca en donde comienza la flexión hacia el Oeste de todas las estructuras, por cambios en la dirección de los esfuerzos tectónicos.

b) El otro sistema de fallamiento está contituído por las escarpas de falla en la pendiente Suroeste de la Cordillera Blanca y se le conoce como falla de la Cordillera Blanca. La longitud total es de 180 a 200 Kms. distinguiéndose tres segmentos : el segmento Norte, donde la escarpa es alta y paralela y la línea de falla es simple; el segmento Central, donde la línea se ondula y forma una punta al Noreste de Huaraz; el segmento Sur, formado por muchas escarpas de fallas mas pequeñas que corren discontinuadamente en echelón. Por las evidencias geológicas se demuestra que la falla de la Cordillera Blanca es una falla normal activa, cuyo fallamiento ha ocurrido progresivamente en el cuaternario reciente (Yonekura et al, 1979). La falla de la Cordillera Blanca es tratada con mayor detallamiento en el siguiente capítulo del presente estudio.

4.3.2 SISMICIDAD DE LA REGION

En general para la región de Ancash existe poca información histórica e instrumental de los eventos sísmicos que afectan dicha zona.

Información sobre eventos sísmicos en el Perú recién aparecen en el siglo XVI con la llegada de los españoles, pero no es sino hasta comienzos del presente siglo (1900), en que se comienza a determinar en forma aproximada las localizaciones de los epicentros, cuando se instalaron por primera vez instrumentos en Sudamérica. Datos con determinaciones precisas de todos los parámetros focales de un sismo comienzan a partir de 1963.

4.3.2.1 SISMICIDAD HISTORICA

Esta información comprende la actividad sísmica ocurrida en siglos pasados (antes de 1900), de la cual no se poseen datos instrumentales.

Los sismos históricos están basados en los trabajos de Silgado (1969, 1973, 1975 y 1978). Sin embargo, estos sismos son solamente destructores y no denotan toda la actividad sísmica de la zona.

De estos eventos, sólo se han encontrado seis sismos que han afectado el departamento de Ancash, los cuales son descritos en el Anexo 2.1.

4.3.2.2 SISMICIDAD INSTRUMENTAL

Este período corresponde a los sismos ocurridos en el presente siglo, en que se instalaron por primera vez instrumentos

de medición en Sudamérica. Considerando el desarrollo de la ciencia sismológica, así como la mayor cantidad de instrumentos, se puede considerar los siguientes períodos para los sismos instrumentales

1) 1900 - 1962 : datos instrumentales con determinaciones aproximadas de localización e hipocentros. Las pocas magnitudes calculadas están en función de las ondas superficiales.

2) a partir de 1963

datos instrumentales con determinaciones precisas de localización e hipocentros. La mayoría de los sismos tienen calculada su magnitud en función de las ondas de cuerpo.

Los sismos instrumentales en la región de Ancash presentan el mismo patrón general de distribución espacial que el resto del territorio peruano; es decir que la mayor actividad sísmica se concentra en el mar, paralelo a la Costa. En esta región los focos sísmicos son más superficiales que la mayoría de los que ocurren debajo del Continente.

En el presente siglo ocurrieron 18 sismos importantes que han afectado la región y ellos son descritos en el Anexo - 2.2 .

4.4 FUENTE DE DATOS

En el presente estudio se pretende calcular nuevos parámetros de recurrencia sísmica para las 27 fuentes sismogénicas

establecidas por Casaverde y Vargas (1980), utilizando hipocentros verificados y actualizados en la Universidad Nacional de Ingeniería. Casaverde y Vargas (1982) utilizaron los datos del catálogo del Instituto Geofísico del Perú, - que contiene información hasta 1980 para elaborar el mapa de distribución probabilística de intensidades en el Perú. Como fuente de datos para el desarrollo del presente estudio, se consideraron inicialmente los catálogos de la NOAA y el ECOSIS-UNI; sin embargo, dado la similitud de los resultados de ambos se consideró sólo necesario la presentación de uno de ellos. El catálogo de hipocentros ECOSIS-UNI, implementado en la Universidad Nacional de Ingeniería, contiene información hasta 1982 (Julio), pero lamentablemente contiene sólo sismos peruanos y los ocurridos en sus cercanías, por lo que no cubre los sismos pertenecientes a las fuentes 26 y 27 (Chile). El catálogo de hipocentros de la NOAA, que tiene información hasta 1981 (Mayo), contiene datos de los sismos de Sudamérica, por lo que cubre ampliamente las 27 fuentes. Por esta razón se consideró para el presente estudio este último catálogo, debiendo mencionar además que resulta un catálogo de hipocentros con información confiable por cuanto en la revisión efectuada se encontró escasas incorrecciones en algunos datos, correspondiendo la mayoría de ellas a sismos anteriores a 1963. Estas incorrecciones que fueron revisadas y aceptadas por el USGS (United States Geological Survey) se subsanaron para efectuar el análisis estadístico de los datos. Para efectos de realizar el análisis estadístico, se consi

deró solamente el período 1963 - 1981, ya que la información anterior al año 1963 es incompleta por cuanto hay carencia - de los valores de las magnitudes mb y de las profundidades - focales en la mayoría de los sismos anteriores a 1963.

4.5 EVALUACION DE LAS FUENTES SISMOGENICAS

La metodología de Cornell (1968) involucra el uso de fuentes generadoras de sismos con características tectónicas y geológicas propias (fuentes sismogénicas).

Diferentes autores en los estudios presentados en el Capítulo II, proponen sus propias fuentes sismogénicas para el área en estudio, siendo los más completos los propuestos por Casaverde y Vargas en 1980 en el estudio de Zonificación Sísmica del Perú.

Las 27 fuentes sismogénicas establecidas por Casaverde y Vargas, fueron delineadas en base a la distribución de epicentros, así como las características tectónicas y geológicas - del área de influencia. Las fuentes se delinearón como áreas al no contar con datos suficientes como para modelar fuentes lineales (fallas). Sin embargo, se debe indicar que uno de los objetivos principales del presente estudio es la de tratar de modelar la falla de la Cordillera Blanca como una fuente sismogénica lineal y determinar su influencia en el riesgo sísmico para el departamento de Ancash, aspecto que será tratado en los siguientes capítulos.

Gran parte de los sismos ocurridos en el país son producto - de la interacción de las Placas de Nazca y la Sudamericana.

El hecho de que la placa de Nazca se profundiza conforme a vanza bajo el continente ha determinado las diferentes características sísmicas entre la Costa y el interior del país y que condujo a determinar fuentes de la Costa y fuentes del Continente.

Las particiones transversales de las fuentes de la Costa y las Continentales corresponden al cambio de buzamiento de la Superficie de Benioff con la latitud. Dichas particiones coinciden con accidentes geológicos de importancia (de flexiones de Huancabamba, Cajamarca y Abancay).

Las fuentes 1, 2, 3, 4 (fuentes del litoral) corresponden a sismos superficiales de la zona de Benioff (profundidad focal hasta los 70 Kms). Las fuentes 6, 8, 11, 13, 16, 17, 20 y 23 corresponden a sismos superficiales (0 a 70 Kms) - asociada a la actividad sísmica andina. Las fuentes 5, 7, 10, 12, 15, 18, 21, y 24 corresponden a sismos de profundidad intermedia (70 a 110 Kms) relacionados con la superficie de Benioff. La fuente 9 está asociada a la falla de Huaytapallana. Las fuentes 14 y 19 corresponden a sismos - muy superficiales, que podrían estar asociadas a fallas aún no definidas. Las fuentes 22 y 25 (zona de Selva) representan los sismos profundos en la superficie de Benioff (mayor que 500 Kms).

Finalmente las fuentes 26 y 27 del norte de Chile con influencia en el Perú, corresponden a sismos superficiales y de profundidad intermedia respectivamente.

4.5.1 FUENTES SISMOGENICAS CON INFLUENCIA EN ANCASH

De las 27 fuentes sismogénicas establecidas por Casaverde y Vargas (1980), se ha considerado para el presente estudio - 12 fuentes que tienen influencia en el departamento de An cash y son las fuentes : 1, 2, 9, 10, 11, 12, 13, 17, 18, - 19, 20 y 21.

Las fuentes consideradas, son las mismas utilizadas por Or- dónñez (1984) en el estudio de riesgo sísmico de la ciudad de Huaraz, y son mostradas en la Figura 4.2.

4.6 ANALISIS ESTADISTICO DE RECURRENCIA SISMICA

El análisis estadístico de recurrencia sísmica se reduce bá sicamente a calcular los parámetros de la tasa de actividad sísmica (TASA) y de recurrencia (β) de cada fuente sismogé- nica.

La recurrencia de sismos se determina de acuerdo a la expresión de Richter dada en 1958 :

$$\log N = a - bM \dots\dots\dots(6)$$

donde

N número de sismos de magnitud M ó mayor por unidad de tiempo.

a, b .. constantes propias de cada fuente sismogéni ca. El parámetro b está relacionado con la distribución relativa de los tamaños de los sismos; valores altos de b están asociados a sismos de gran magnitud. El valor de a de pende del período de observación y del nivel

de sismicidad.

Esta expresión también se puede escribir como

$$N = 10^a e^{-\beta M} \dots\dots\dots (7)$$

donde

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_{b1} , se tiene

$$\log N_{M_{b1}} = a_{M_{b1}} - b(M - M_{b1}) , M \geq M_{b1}$$

que se puede expresar también como

$$N_{M_{b1}} = 10^{a_{M_{b1}}} e^{-\beta(M - M_{b1})} , M \geq M_{b1}$$

En el presente estudio se han determinado nuevos parámetros de recurrencia para las 27 fuentes sismogénicas, con datos tomados del catálogo de la NOAA de sismos peruanos para el período 1963-1981 y considerando sólo los sismos con magnitud $m_b \geq 4.0$

La información presentada en el catálogo de hipocentros el año 1962 es incompleta ya que la mayoría de los sismos que ocurrieron en ese período no tienen calculado la magnitud m_b , tampoco se presenta la profundidad focal. Por esta razón, el período sísmico considerado para el presente estudio comprende desde el sismo del 16/02/1963 (primer sismo peruano de 1963 con información de m_b) hasta el sismo del 27/05/1981 (último sismo peruano de este catálogo), correspondiendo un período sísmico de 18.28 años.

Para cada fuente se efectuó la distribución de la frecuencia de las magnitudes m_b considerando intervalos de 0.1 y luego se efectuó la distribución de la frecuencia acumulativa; estas distribuciones se muestran en las Tablas N°4.1 y 4.2 respectivamente.

Para el análisis de las fuentes 9, 14 y 19, que corresponden a sismos superficiales asociadas a fallas locales, se consideraron los sismos con profundidad focal hasta los 70 Kms. Estos sismos no fueron considerados en el análisis de las fuentes 11, 13 y 17 (estas fuentes contienen a las fuentes 9, 14 y 19 respectivamente).

El ploteo de los datos de la Tabla N° 4.2 en papel semilogarítmico presenta la recurrencia sísmica de cada fuente, en donde se determinó la magnitud mínima M_{bl} como nivel inferior de referencia para el ajuste de la curva. Para el ploteo de los datos de las fuentes 23, 24 y 25, diferenciadas solamente en la profundidad de sus sismos, se consideró como una sola fuente integral ya que cada una de ellas independientemente contiene muy pocos datos.

Una vez fijado el M_{bl} de cada fuente, se procedió a calcular las rectas de recurrencia por el método de los mínimos cuadrados, determinándose de esta forma los valores de a y b de la expresión (6), así como también el coeficiente de correlación r^2 para indicar el grado de dispersión de los datos utilizados.

Las Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11 muestran las rectas de recurrencia para las 27 fuentes, así como también los datos utilizados en el cálculo.

Determinadas las rectas de recurrencia de cada fuente, se calculó también la tasa anual correspondiente a M_{b1} , que viene a ser el número de sismos por año que ocurren en la fuente de magnitud igual ó mayor a M_{b1} .

En la Figura 4.3 se muestra una curva de recurrencia representativa para un mejor entendimiento del concepto de la tasa sísmica.

$$TASA_{M_{b1}} = \frac{10^{a_{M_{b1}}}}{T}$$

donde :

$$a_{M_{b1}} = a - b.M_{b1} \quad , \quad (\text{ver Figura 4.3})$$

$$T = \text{período sísmico} = 18.28 \text{ años}$$

En la Tabla N° 4.3 se presentan los valores de a y b , el valor de M_{b1} y su correspondiente tasa anual y el coeficiente de correlación que se obtuvieron en el presente estudio para cada fuente sismogénica.

Todo este análisis se realizó en base a las magnitudes m_b (en función de ondas de cuerpo), pero fue necesario compatibilizar con el programa RISK ya que utiliza información en base a magnitudes M_s (en función de ondas superficiales).

Para ello, se consideró la ecuación que relaciona los M_b con los M_s , propuesta por Ordoñez (1984):

$$M_b = 2.1 + 0.64 M_s \dots\dots\dots (3)$$

Esta recta se determinó con los datos del catálogo de la NOAA pertenecientes a las fuentes sismogénicas con influencia en Ancash y calculada por el método de los mínimos

cuadrados. La gráfica de esta recta se presentó en el Capítulo II.

4.6.1 DISTRIBUCION DE PROFUNDIDADES FOCALES

Para determinar las profundidades representativas de los hipocentros de cada fuente sismogénica, fue necesario efectuar el cálculo de la frecuencia de estas profundidades focales con los datos del catálogo de la NOAA, para el período 1963-1981.

Las frecuencias obtenidas de cada fuente fueron graficadas para su mejor interpretación en la determinación de las profundidades focales. Los gráficos son mostrados en las Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19. Para el análisis de estos gráficos se tomó en cuenta las fuentes de mayor actividad sísmica, así como el grado de influencia de las fuentes al lugar de interés (proximidad, número de sismos y profundidad de estos sismos).

Las profundidades representativas de las 27 fuentes sismogénicas se presentan en la Tabla N° 4.4, debiendo indicarse que debe ser refinadas según el lugar de interés.

Para el caso en estudio, el lugar de interés lo constituye el departamento de Ancash, motivando un nuevo análisis de estas gráficas, tomándose sólo en cuenta las fuentes que tienen influencia en Ancash.

Las profundidades obtenidas se muestran en la Tabla N° 4.5 .

4.6.2 DATOS DE ENTRADA PARA EL PROGRAMA RISK

Basado en el análisis de recurrencia sísmica se deducieron los parámetros utilizados en el programa de cómputo RISK MO, MI, BETA y RATE, donde :

MO Magnitud límite inferior M_s . Se consideró el valor de 5.0 para todos los casos.

MI Máxima magnitud M_s encontrada en toda la historia sísmica de la fuente sismogénica.

BETA Parámetro de la ecuación (2) en función de M_s .

$$BETA = b_{M_s} \ln 10$$

utilizando la relación (3) tenemos

$$b_{M_s} = 0.64 b_{M_b} \quad \text{entonces}$$

$$BETA = 0.64 b_{M_b} \ln 10$$

RATE Tasa sísmica anual correspondiente a MO (número de sismos por año que tienen magnitud igual ó mayor a MO).

$$RATE = 10^{a_{M_0}} / T, \quad T = \text{período sísmico}$$

En la Tabla N° 4.4 se presentan los valores obtenidos para las 27 fuentes sismogénicas, para ser utilizadas en el programa de cómputo RISK. Se incluye también las profundidades focales representativas de cada fuente obtenidas del análisis de la frecuencia de profundidades hipocentrales, debiendo indicar que estas profundidades deben ser refinadas según el lugar de interés.

Los valores obtenidos en el presente estudio a ser utilizados en el programa RISK para evaluar el riesgo sísmico del

departamento de Ancash se presentan en la Tabla N° 4.5 . Se presentan también, en la Tabla N° 4.6, los valores obtenidos por Casaverde y Vargas (1982) para las mismas fuentes.

4.7 LEYES DE ATENUACION

La atenuación de la energía sísmica constituye el elemento más importante en el análisis del riesgo sísmico.

El problema de la atenuación a nivel mundial ha sido tratado por varios autores como Schnabel y Seed (1973), Trifunac y Brady (1975) y otros, quienes consideran que la aceleración registrada en un punto está en función de la magnitud del sismo y de la distancia hipocentral. Los mencionados autores y otros derivaron ecuaciones de atenuación generales con información disponible a nivel mundial cuyas constantes han venido reajustándose conforme se han incrementado el número de observaciones.

No obstante la acumulación de acelerogramas, las aceleraciones registradas en el Perú, departen apreciablemente del valor medio a nivel mundial, observándose que para una distancia determinada, las aceleraciones en el Perú son mayores y por lo tanto ecuaciones derivadas con información de otros países no son válidas para el Perú.

En la revisión de estudios de riesgo sísmico realizados, en el Perú, presentados en el capítulo II, varios autores han propuesto leyes de atenuación basadas en registros tomados en el Perú. La mayoría de ellas son atenuaciones de acele-

raciones, pero también se han determinado atenuaciones de velocidades, de desplazamiento y de intensidades (MM).

En el presente estudio, se utilizaron las leyes de atenuación propuestas por Casaverde y Vargas (1980). Estos autores determinaron atenuaciones para la aceleración, la velocidad y el desplazamiento del suelo, pero para el presente estudio solo se utilizó la atenuación de la aceleración en el cálculo del riesgo sísmico de Ancash.

Las ecuaciones de estas leyes, presentadas ya en el capítulo II (Figuras 2.6.3, 2.6.4 y 2.6.5) son las siguientes :

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

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

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

donde :

a aceleración en cm/seg²

v velocidad en cm/seg

d desplazamiento en cms

Ms magnitud expresada en ondas de superficie

R distancia hipocentral en Kms

Estas leyes están basadas en los registros de acelerógrafos de las componentes horizontales de 10 sismos peruanos (Brady y Pérez, 1977, Alva Hurtado y Chang, 1978) registrados en Lima y alrededores : local del Instituto Geológico en la Plaza Habich, el Instituto Geofísico en la Av. Arequipa y en Zárate, la casa del Dr. Huaco en las Gardenias y en la Molina.

Hubiera sido deseable establecer una ley de atenuación más representativa para el lugar en estudio; lamentablemente - los datos registrados en Lima son los únicos con que se cuenta en el Perú.

4.7.1 DESVIACION STANDARD DE LA ATENUACION

La desviación standard (σ_1) de la atenuación constituye también un parámetro de entrada para el programa RISK y es denotado por la variable SIG. σ_1 expresa la dispersión de los residuos respecto a la media, y generalmente es tomado como un valor constante, esto es, independientemente de la magnitud y la distancia epicentral ó hipocentral. Como la función de atenuación es desarrollada en una distribución logarítmica, σ_1 viene a ser la desviación standard del logaritmo de la atenuación.

El valor de SIG considerado para la atenuación utilizada - en el presente estudio es de 0.7 . Cuando no se desea una dispersión de residuos, se debe utilizar un valor muy pequeño de SIG (mayor que exactamente 0.00), de lo contrario el programa se detendrá inmediatamente.

4.8 EVALUACION DEL RIESGO SISMICO

Finalmente se evalúa el riesgo sísmico para el departamento de Ancash utilizando el programa de cómputo RISK, desarrollado por McGuire (1976).

Como ya se mencionó, la salida del programa RISK muestra - los valores obtenidos de riesgo sísmico anual y el valor es

perado anual para varias intensidades especificadas; también muestra las intensidades obtenidas para varios niveles de riesgo anual especificados.

En el presente estudio se han considerado como intensidades especificadas : 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 y 1000 cm/se^2 (aceleraciones) y como niveles de riesgo anual especificados, los valores de 0.1, 0.05, 0.033, 0.02, 0.01, 0.005, 0.002 y 0.001 .

El riesgo sísmico es evaluado para todo el área de Ancash, comprendida entre las coordenadas 76.8° a 78.6° de longitud oeste y entre 8.1° a 10.7° de latitud sur, usando intervalos de 0.2° tanto para la longitud como para la latitud. Se han realizado los cálculos utilizando dos conjuntos de datos de recurrencia sísmica : los obtenidos en el presente estudio (Tabla N° 4.5) y los datos obtenidos por Casaverde y Vargas, 1982 (Tabla N° 4.6), empleándose para ambos casos las mismas fuentes sismogénicas y la misma ley de atenuación.

Con los valores obtenidos en el cómputo se confeccionaron mapas de iso-aceleraciones para períodos de retorno de 30, 50 y 100 años. Esos mapas son presentados en los Planos 4.1, 4.2 y 4.3 (usando parámetros obtenidos en el presente estudio) y en los Planos 4.4, 4.5 y 4.6 (usando parámetros Casaverde y Vargas, 1982).

Adicionalmente se ha evaluado el riesgo sísmico de las ciudades de Huaraz y Chimbote utilizando también ambos conjuntos de datos.

Los resultados son mostrados en el Anexo 3 y los gráficos correspondientes de riesgo anual vs aceleraciones se muestran en las Figuras 4.20 y 4.21 (Huaraz y Chimbote respectivamente).

4.9 CONCLUSIONES

El riesgo sísmico para el departamento de Ancash fue evaluado utilizando el programa de cómputo RISK implementado por McGuire (1976). El programa es muy utilizado cuando las fuentes sismogénicas son modeladas como áreas, presentando dificultades cuando se trata de fuentes lineales (fallas).

El riesgo sísmico fue evaluado utilizando las fuentes sismogénicas establecidas por Casaverde y Vargas(1980), estas fuentes que fueron modeladas como áreas al no contarse con datos suficientes como para modelar fuentes lineales (caso de fallas).

De acuerdo a la revisión sismotectónica de la región - en estudio, se considera muy necesario la delineación de la falla de la Cordillera Blanca como una fuente sismogénica lineal independiente con parámetros propios de recurrencia y tasa de actividad sísmica, para de esta manera estudiar su efecto en el riesgo sísmico de Ancash.

Se ha utilizado la aceleración como parámetro de intensidad en el cálculo realizado. Sin embargo, la metodología es aplicable para utilizar cualquier otro parámetro

tro como velocidad, desplazamiento, intensidad (MM), etc.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que el mayor riesgo sísmico se concentra en la Costa y va disminuyendo conforme se avanza hacia el Continente. Esto se debe principalmente a que la mayor sismicidad corresponde a la interacción de las placas Nazca y Sudamericana (fuentes 1 y 2).

Los parámetros de recurrencia sísmica calculados en este estudio son más elevados que los obtenidos por Casaverde y Vargas (1982), conllevando a que los resultados de riesgo sísmico sean también más altos. La diferencia entre ambos juegos de parámetros de recurrencia no se debe principalmente a la cantidad de datos utilizados, sino a la interpretación de ellos en el análisis de la distribución de magnitudes.

Con las curvas de riesgo anual versus aceleraciones del programa RISK, se pueden determinar las aceleraciones para niveles de confianza y tiempo de exposición sísmica deseadas.

Adicionalmente se ha utilizado el catálogo de hipocentros ECOSIS-UNI, implementado en la UNI, como fuente de datos para el análisis. Los resultados obtenidos son bastante similares a los determinados con el catálogo de hipocentros de la NOAA.

TABLA N° 4.1 (c)

FRECUENCIA SISMICA DE LAS MAGNITUDES

Fuente de datos : Catálogo NOAA (1963-1981)

mb	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27
4.0	5			1	1	8	90
4.1	4	1		1		11	127
4.2	11	1	1			18	98
4.3	8		2	1		26	113
4.4	18		1			24	124
4.5	12	1				27	113
4.6	19	2	1			34	113
4.7	15	5				20	119
4.8	12	2	1			21	81
4.9	16	3		1		13	71
5.0	12	1				16	48
5.1	12					20	50
5.2	8	1				16	37
5.3	5	3				3	40
5.4		1				10	36
5.5	2	1				11	22
5.6	2	3				7	12
5.7						2	8
5.8	3	1				3	7
5.9		2				3	1
6.0	2				1	1	
6.1		1				1	4
6.2		1				1	2
6.3						1	2
6.4							2
6.5							1
6.6							
6.7							
6.8						1	

TABLA N° 4.2 (c)

FRECUENCIA ACUMULATIVA DE LAS MAGNITUDES

Fuente de datos		Catálogo NOAA (1963-1981)					
mb	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27
4.0	166	30	6	4	2	298	1321
4.1	161	30	6	3		290	1231
4.2	157	29	6	2		279	1104
4.3	146	28	5			261	1006
4.4	138	28	3			235	893
4.5	120	28	2			211	769
4.6	108	27		1		184	656
4.7	89	25	1			150	543
4.8	74	20				130	424
4.9	62	18				109	343
5.0	46	15			1	96	272
5.1	34	14				80	224
5.2	22					60	174
5.3	14	13				44	137
5.4	9	10				41	97
5.5		9				31	61
5.6	7	8				20	39
5.7	5	5				13	27
5.8						11	19
5.9	2	4				8	12
6.0		2				5	11
6.1						4	
6.2		1				3	7
6.3						2	5
6.4							3
6.5							1
6.6						1	

TABLA Nº 4.3

PARAMETROS DE RECURRENCIA SISMICA, PROYECTO ECOSIS-UNI 1984

Catálogo Utilizado: NOAA
 Período Sísmico 1963-1981 (T=18.28 años)

FUENTE		Tasa= 10^a Mb ¹ /T		a	r ²
F-1	4.9	2.666	1.299	8.053	0.991
F-2	4.8	8.702	1.193	7.928	0.996
F-3	4.9	3.828	1.690	10.126	0.981
F-4	4.8	2.448	1.729	9.950	0.986
F-5	4.9	3.437	1.332	8.325	0.985
F-6	4.5	1.360	1.041	6.080	0.979
F-7	4.9	4.233	1.506	9.268	0.988
F-8	4.6	1.125	1.198	6.824	0.973
F-9	4.7	1.068	0.765	4.886	0.987
F-10	4.2	4.811	0.854	5.531	0.983
F-11	4.5	3.516	1.056	6.560	0.992
F-12	4.5	1.219	1.742	9.187	0.983
F-13	4.1	1.243	0.724	4.325	0.983
F-14	4.7	3.563	1.286	7.858	0.994
F-15	4.2	1.131	1.117	6.007	0.982
F-16	4.5	2.529	1.270	7.380	0.995
F-17	4.5	3.377	1.121	6.835	0.990
F-18	4.5	7.517	1.028	6.764	0.989
F-19	4.4	4.018	1.140	6.882	0.989
F-20	4.6	1.799	1.070	6.439	0.991
F-21	4.8	4.345	1.355	8.404	0.995
F-22	4.7	1.664	0.810	5.290	0.955
F-23	4.0	0.631	0.757	4.090	0.990
F-24	4.0	0.631	0.757	4.090	0.990
F-25	4.0	0.631	0.757	4.090	0.990
F-26	5.0	6.181	1.302	8.563	0.997
F-27	5.0	18.240	1.503	10.038	0.990

TABLA N° 4.4

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA RISK

(Proyecto ECOSIS-UNI, 1984)

FUENTE	MO	MI	BETA	RATE	PROFUNDIDAD
F-1	5.0	7.38	1.9143	0.8060	25-50
F-2	5.0	7.60	1.7581	2.2036	30-60
F-3	5.0	8.10	2.4905	0.8073	30-50
F-4	5.0	5.90	2.5479	0.3344	30-50
F-5	5.0	7.50	1.9629	1.0079	130-180
F-6	5.0	7.30	1.5341	0.1999	35
F-7	5.0	7.00	2.2193	1.0574	90-120
F-8	5.0	7.40	1.7654	0.1630	35
F-9	5.0	6.40	1.1273	0.3711	5
F-10	5.0	6.75	1.2585	0.5531	70-110
F-11	5.0	8.00	1.5562	0.5026	25-50
F-12	5.0	6.50	2.5671	0.0493	90
F-13	5.0	7.00	1.0669	0.1682	35
F-14	5.0	7.60	1.8951	0.6029	30-60
F-15	5.0	6.90	1.6461	0.0668	80
F-16	5.0	8.30	1.8715	0.2438	40
F-17	5.0	7.30	1.6520	0.4283	30-50
F-18	5.0	7.50	1.5149	1.1314	120-170
F-19	5.0	6.90	1.6800	0.3785	30-50
F-20	5.0	6.90	1.5768	0.3206	35
F-21	5.0	6.75	1.9968	0.9131	130-160
F-22	5.0	7.50	1.1937	0.5433	600
F-23	5.0	7.10	1.1156	0.0654	35
F-24	5.0	7.00	1.1156	0.0654	120
F-25	5.0	7.50	1.1156	0.0654	600
F-26	5.0	7.75	1.9187	2.5143	20-50
F-27	5.0	8.30	2.2149	6.4584	100-180

TABLA N° 4.5

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA RISK

ZONA : DEPARTAMENTO DE ANCASH

(Proyecto ECOSIS-UNI 1984)

FUENTE	MO	MI	BETA	RATE	PROFUNDIDADES
F-1	5.0	7.38	1.9143	0.8060	25-50
F-2	5.0	7.60	1.7581	2.2036	20-30-40-50-60
F-9	5.0	6.40	1.1273	0.3711	5
F-10	5.0	6.75	1.2585	0.5531	90
F-11	5.0	8.00	1.5562	0.5026	25-50
F-12	5.0	6.50	2.5671	0.0493	90
F-13	5.0	7.00	1.0669	0.1682	35
F-17	5.0	7.30	1.6520	0.4283	30-50
F-18	5.0	7.50	1.5149	1.1314	120
F-19	5.0	6.90	1.6800	0.3785	30
F-20	5.0	6.90	1.5768	0.3206	35
F-21	5.0	6.75	1.9968	0.9131	130

TABLA N° 4.6

PARAMETROS UTILIZADOS EN EL PROGRAMA RISK

ZONA : DEPARTAMENTO DE ANCASH

(Casaverde y Vargas, 1982)

FUENTE	MO	MI	BETA	RATE	PROFUNDIDADES
F-1	5.0	7.38	1.0328	0.5030	25
F-2	5.0	7.60	1.4318	0.9690	10-20-30-40-50
F-9	5.0	5.60	1.3636	0.1500	5
F-10	5.0	7.00	1.1025	0.4210	70-100
F-11	5.0	7.25	1.5754	0.1500	25-35-45
F-12	5.0	6.50	1.7553	0.0270	70
F-13	5.0	7.00	1.1054	1.1000	25
F-17	5.0	7.30	1.0764	0.3744	25
F-18	5.0	7.90	0.9719	0.8870	70
F-19	5.0	7.50	1.3636	0.2110	5
F-20	5.0	7.30	1.0009	0.2557	25
F-21	5.0	6.75	1.2040	0.6153	70

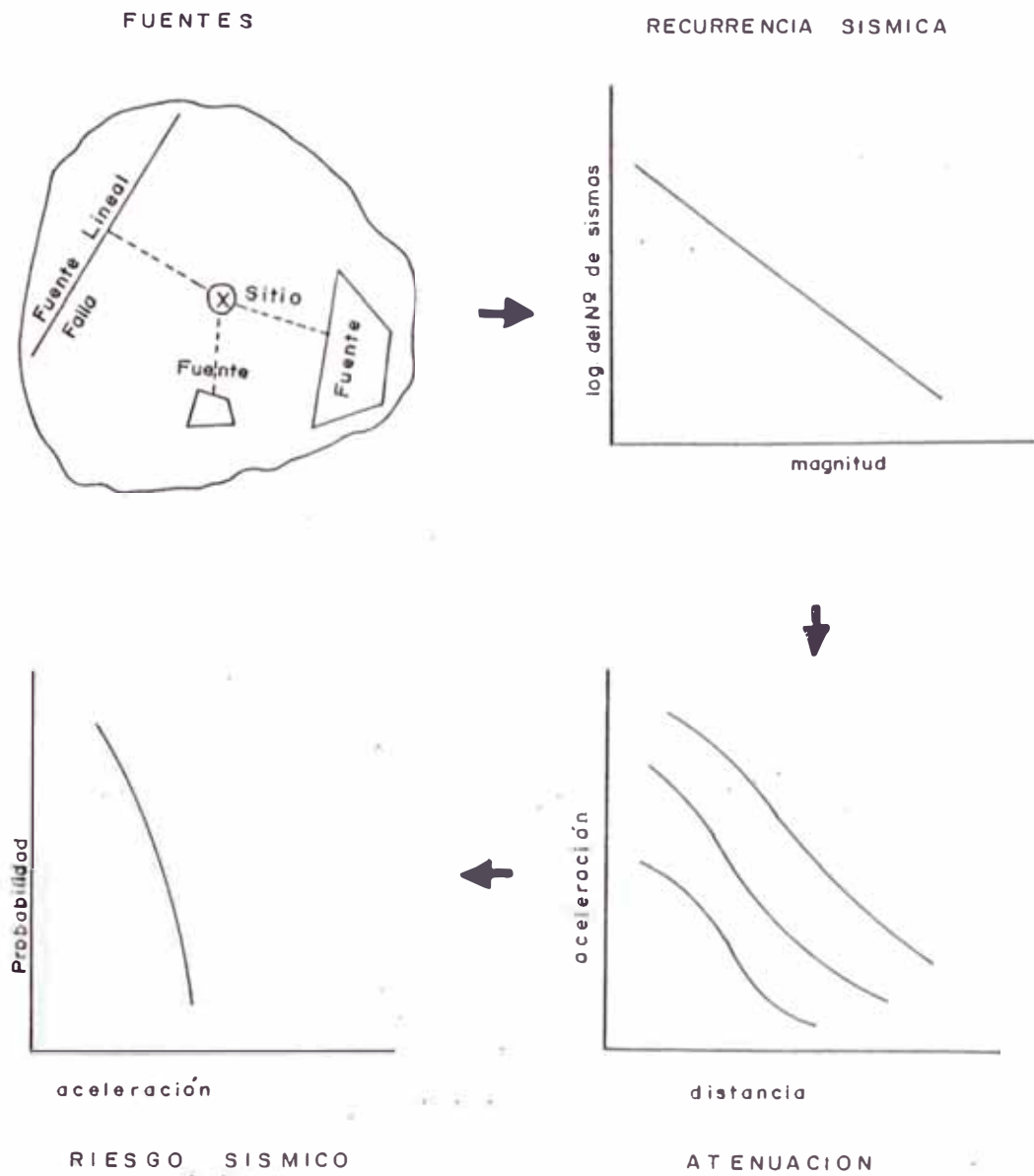


Fig. 4.1 SECUENCIA SEGUIDA EN LA EVALUACION DEL RIESGO SISMICO

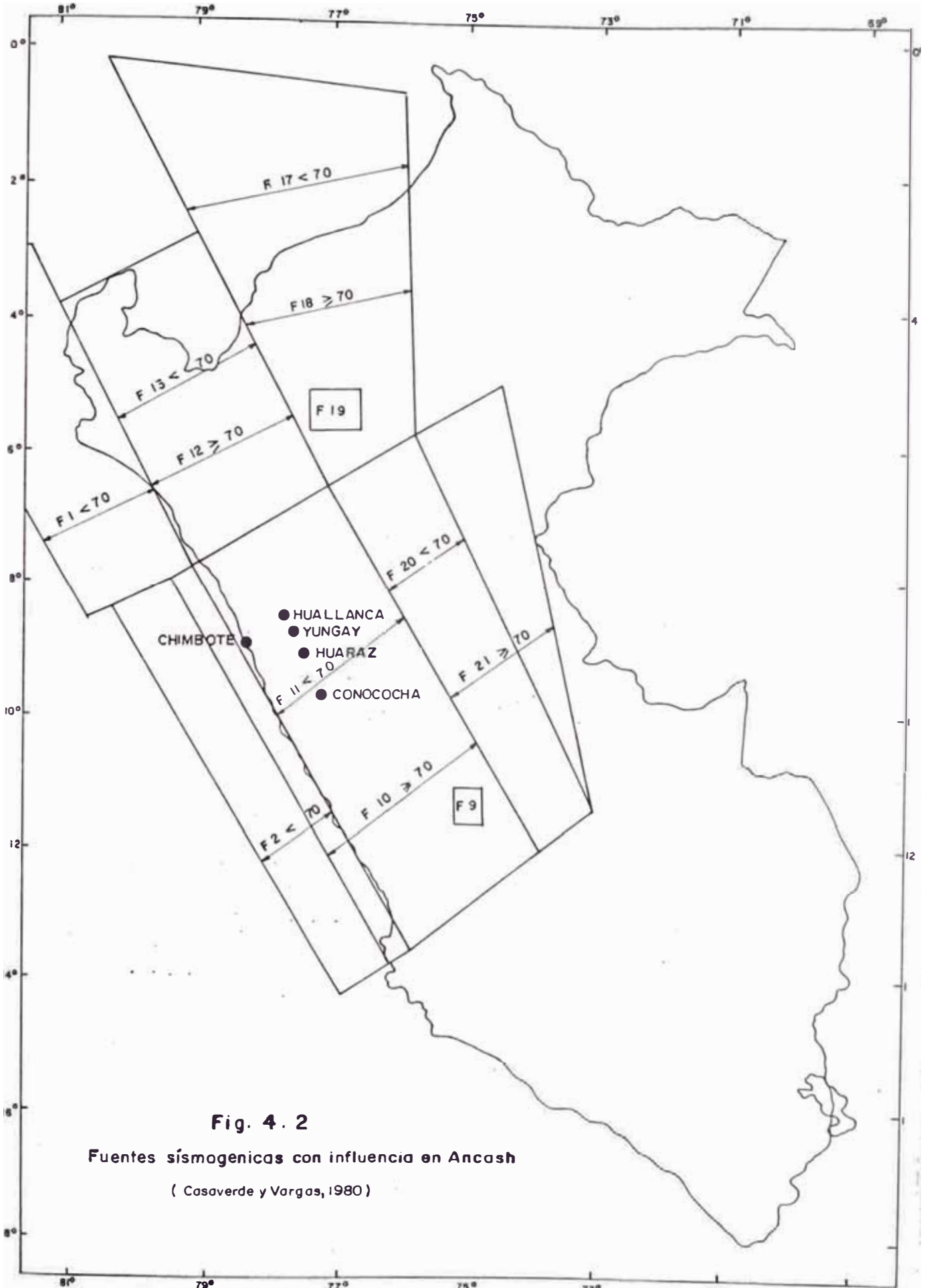


Fig. 4. 2

Fuentes sísmogenicas con influencia en Ancash

(Casaverde y Vargas, 1980)

Fig. 4.3 RELACION DE LA LEY DE RECURRENCIA SISMICA

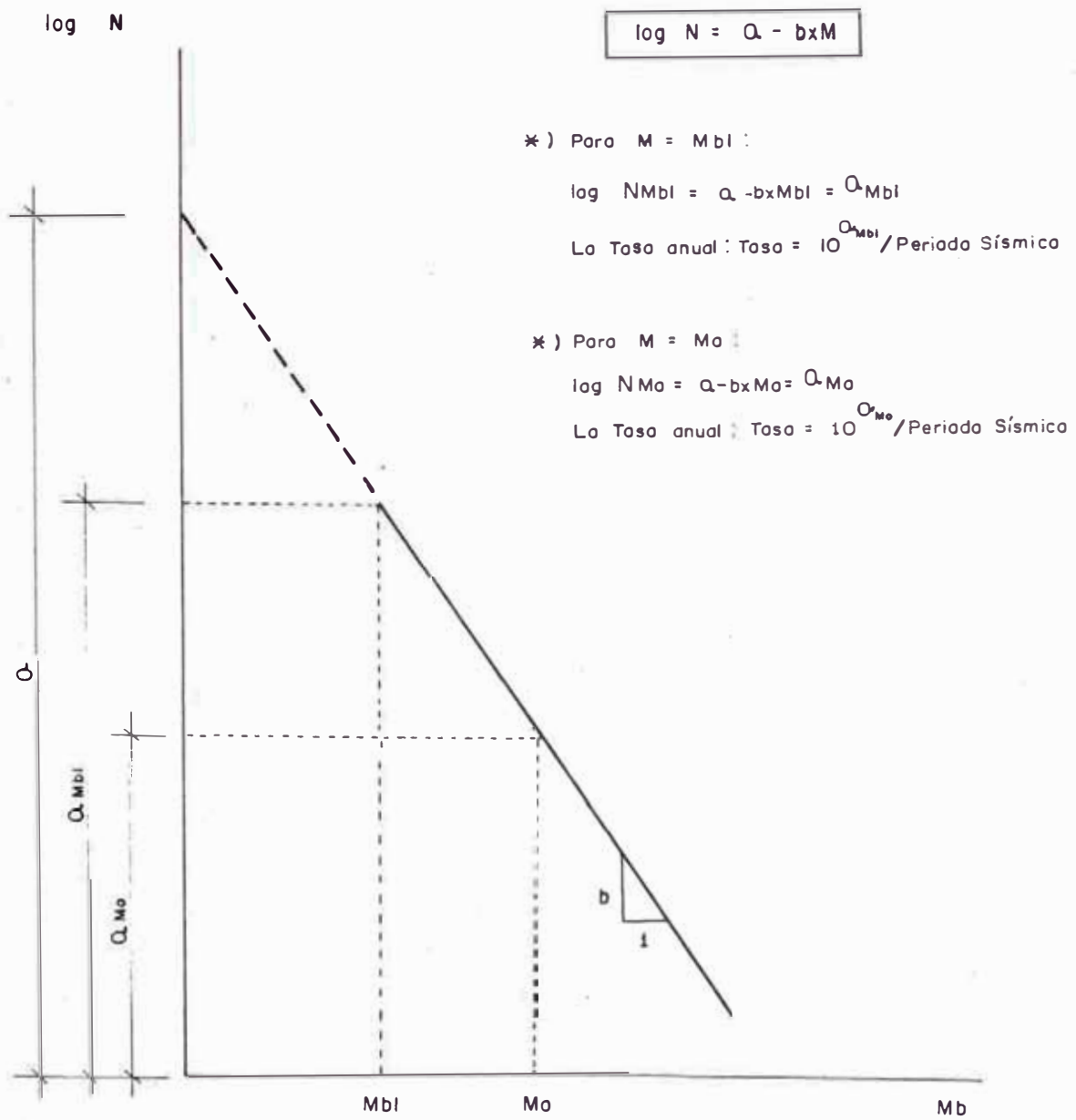


Fig. 4.4 CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA

Fuente : 1, 2 y 3

Proyecto : ECOSIS-UNI (1984)

Fuente de datos : Catálogos NOAA (1963-1981)

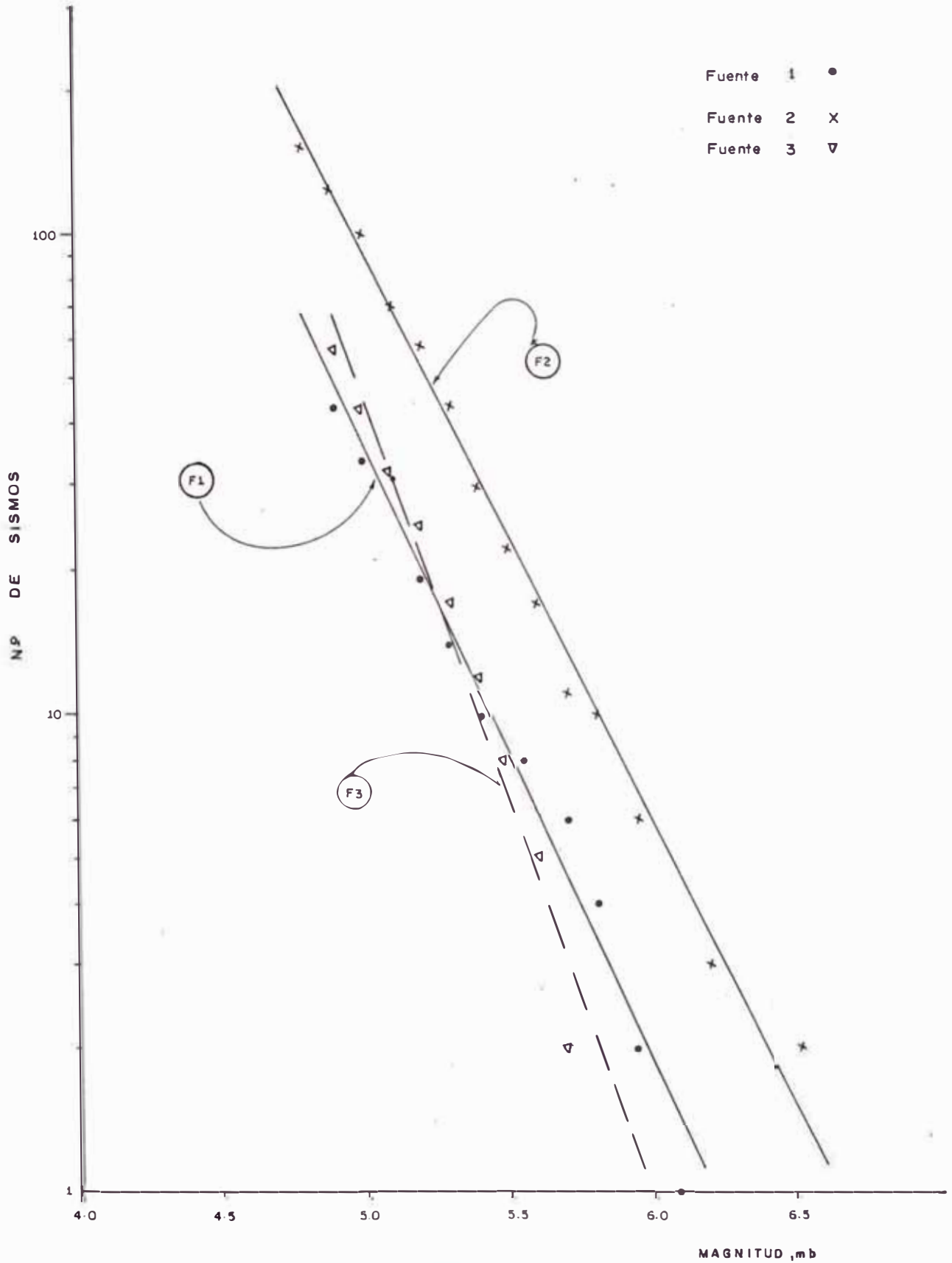


Fig. 4.5 CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA

Fuentes : 4, 5 y 6

Proyecto : ECOSIS -UNI (1984)

Fuente de datos : Catálogo NOAA (1963-1981)

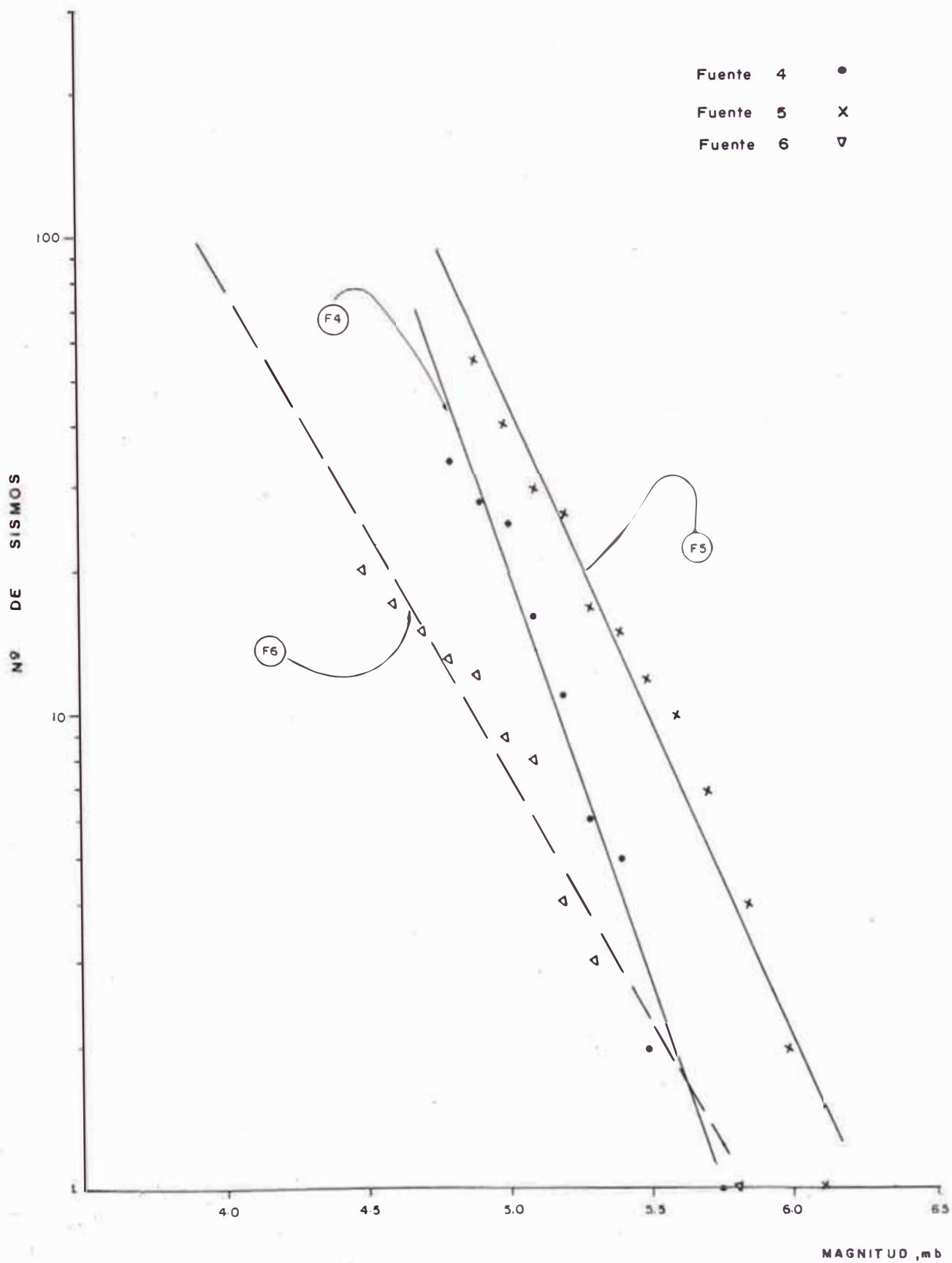


Fig. 4·6 CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA

Fuentes : 7, 8, 9 y 10

Proyecto : ECOSIS-UNI (1984)

Fuente de datos : Catálogo NOAA (1963-1981)

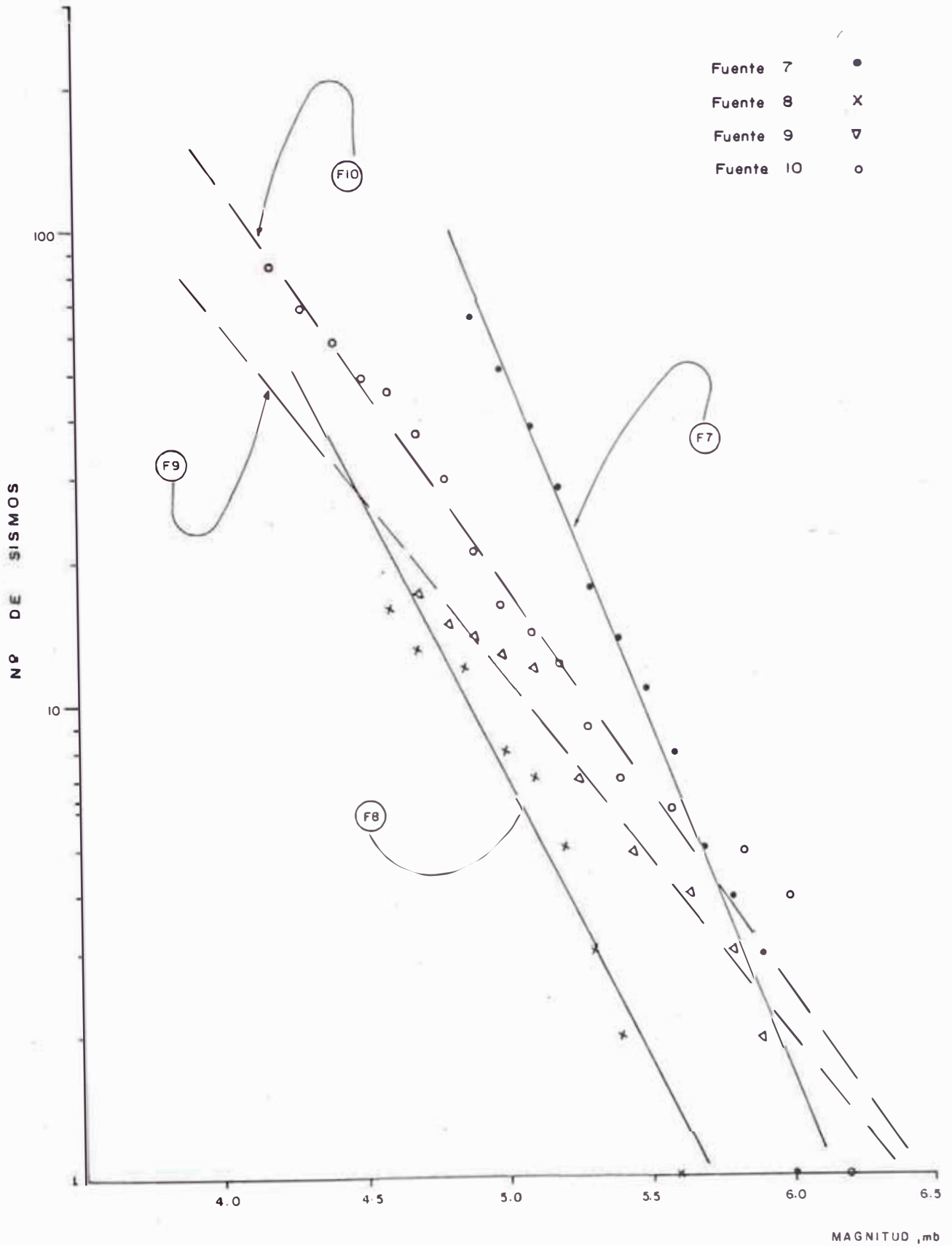


Fig. 4.7 CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA

Fuentes : II, 12 y 13

Proyecto : ECOSIS - UNI (1984)

Fuente de dato : Catálogo NOAA (1963-1981)

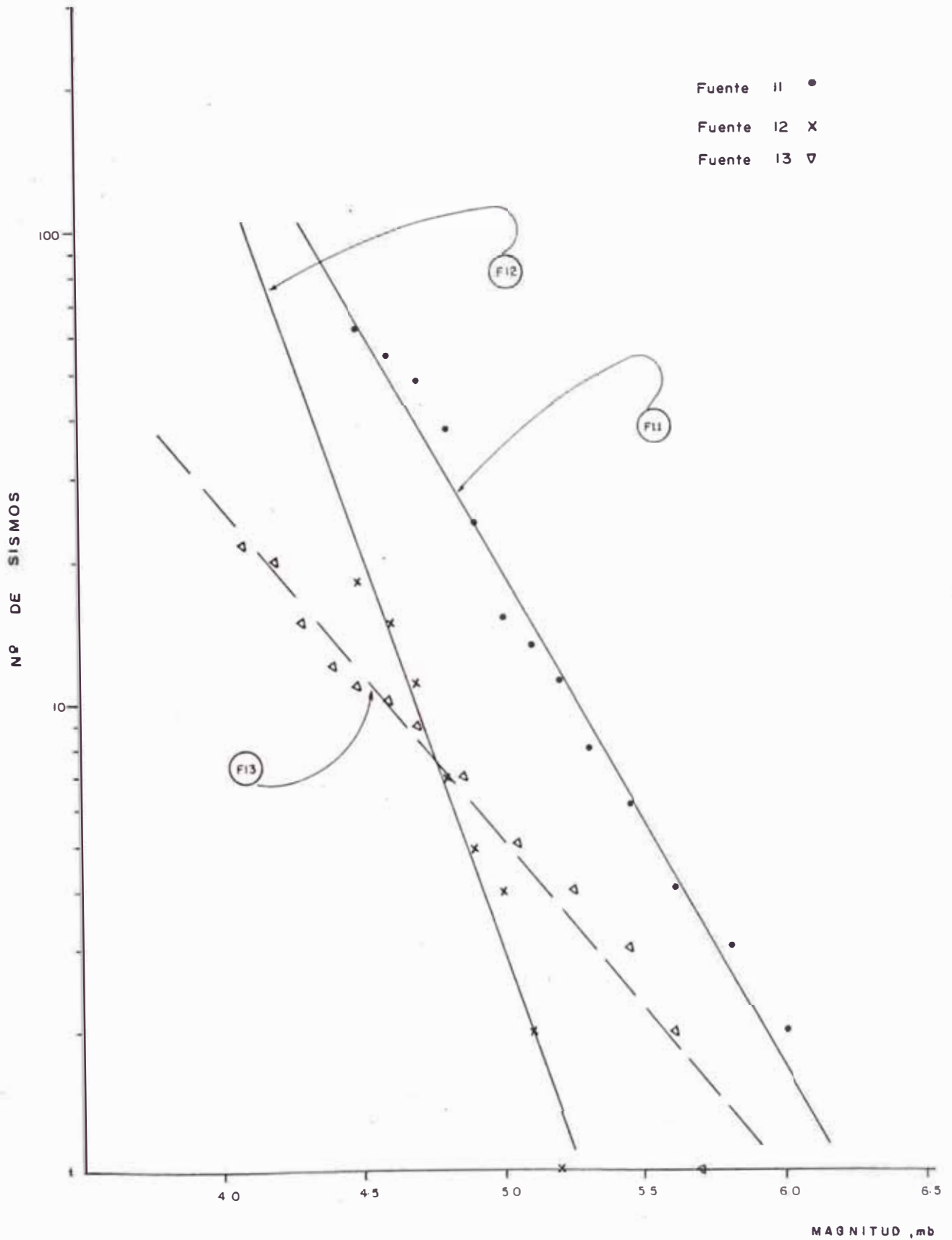


Fig. 4.8 CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA

Fuentes : 14, 15 y 16

Proyecto : ECOSIS -UNI (1984)

Fuente de datos : Catálogo NOAA (1963-1981)

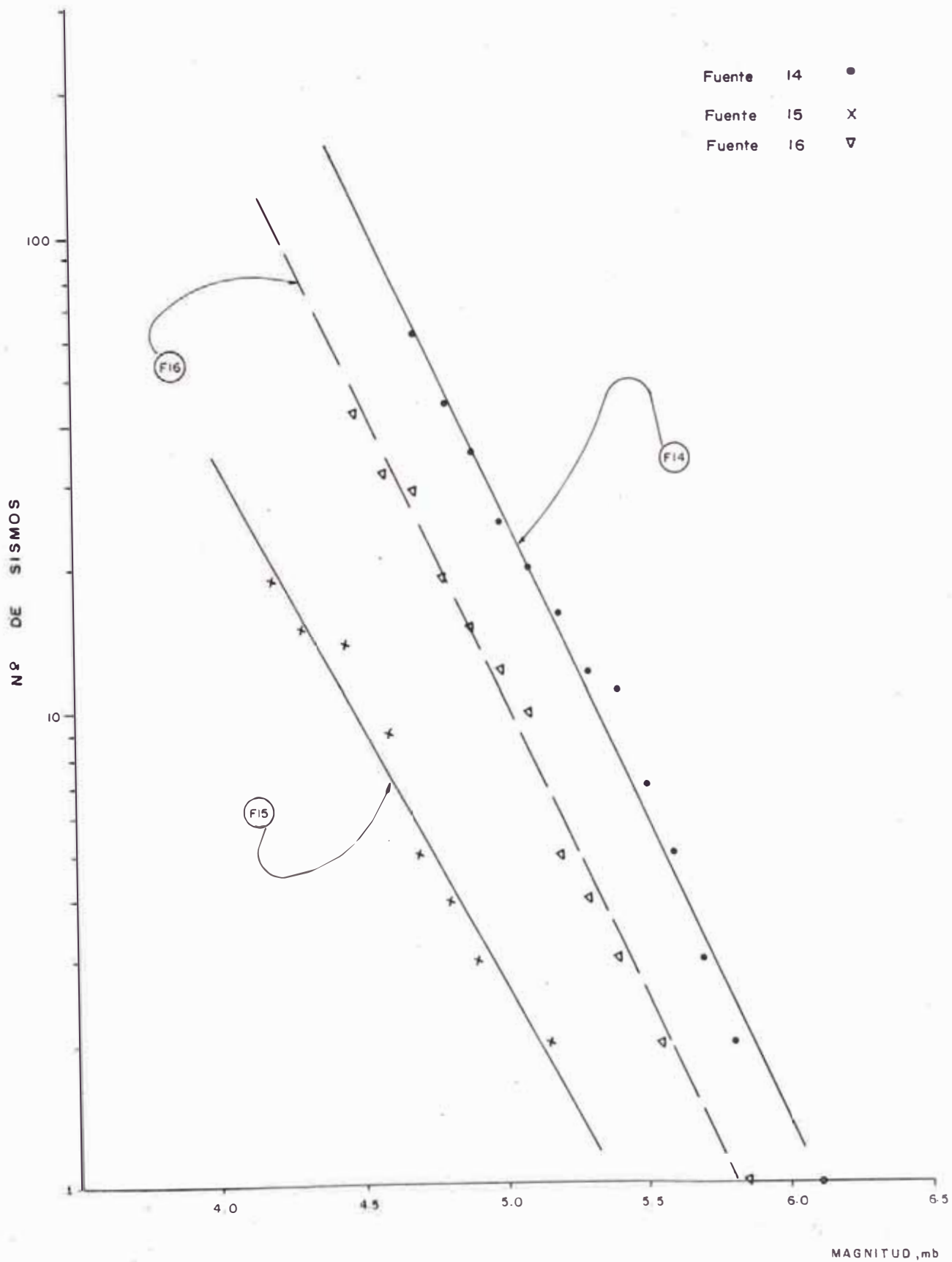


Fig. 4-9 CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA

Fuentes : 17, 18 y 20

Proyecto : ECOSIS - UNI (1984)

Fuente de datos : Catálogo NOAA (1963-1981)

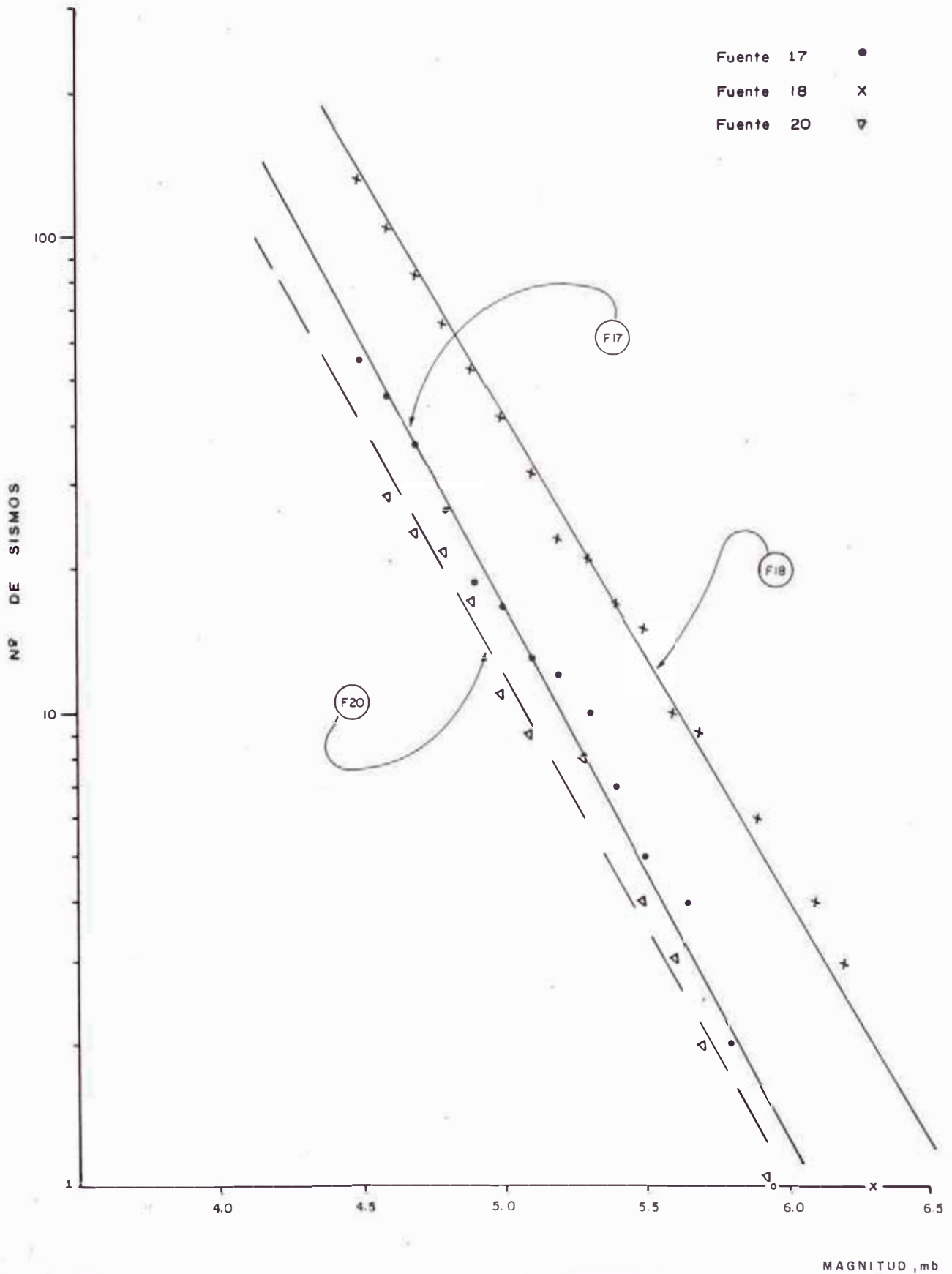


Fig. 4.10 CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA

Fuente : 19, 21, 22, 23, 24 y 25

Proyecto : ECOSIS - UNI (1984)

Fuente de datos : Catálogo NOAA (1963 - 1981)

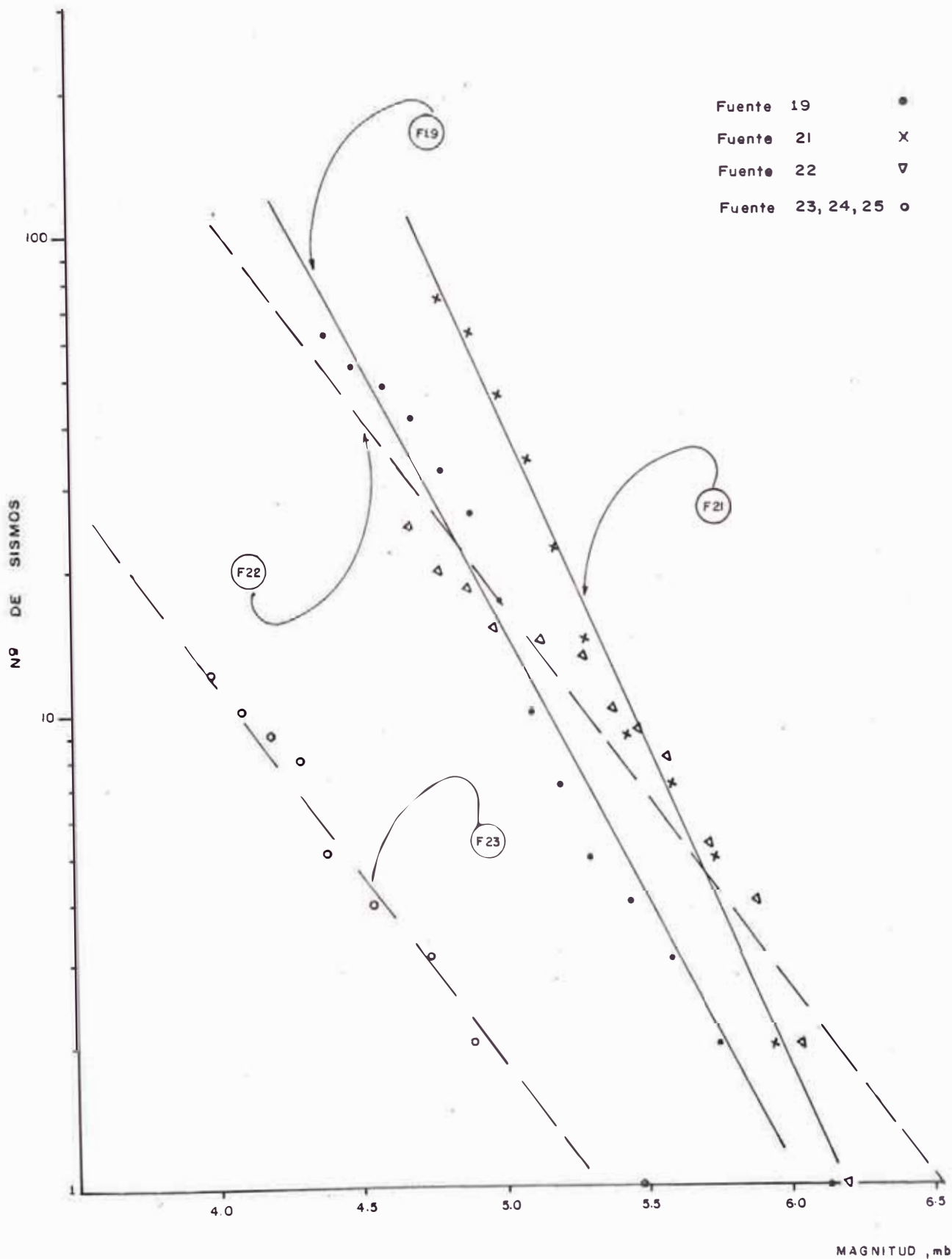


Fig. 4.11 CURVAS DE RECURRENCIA SISMICA

Fuente: 26 y 27

Proyecto: ECOSIS - UNI (1984)

Fuente de datos: Catálogo NOAA (1963-1981)

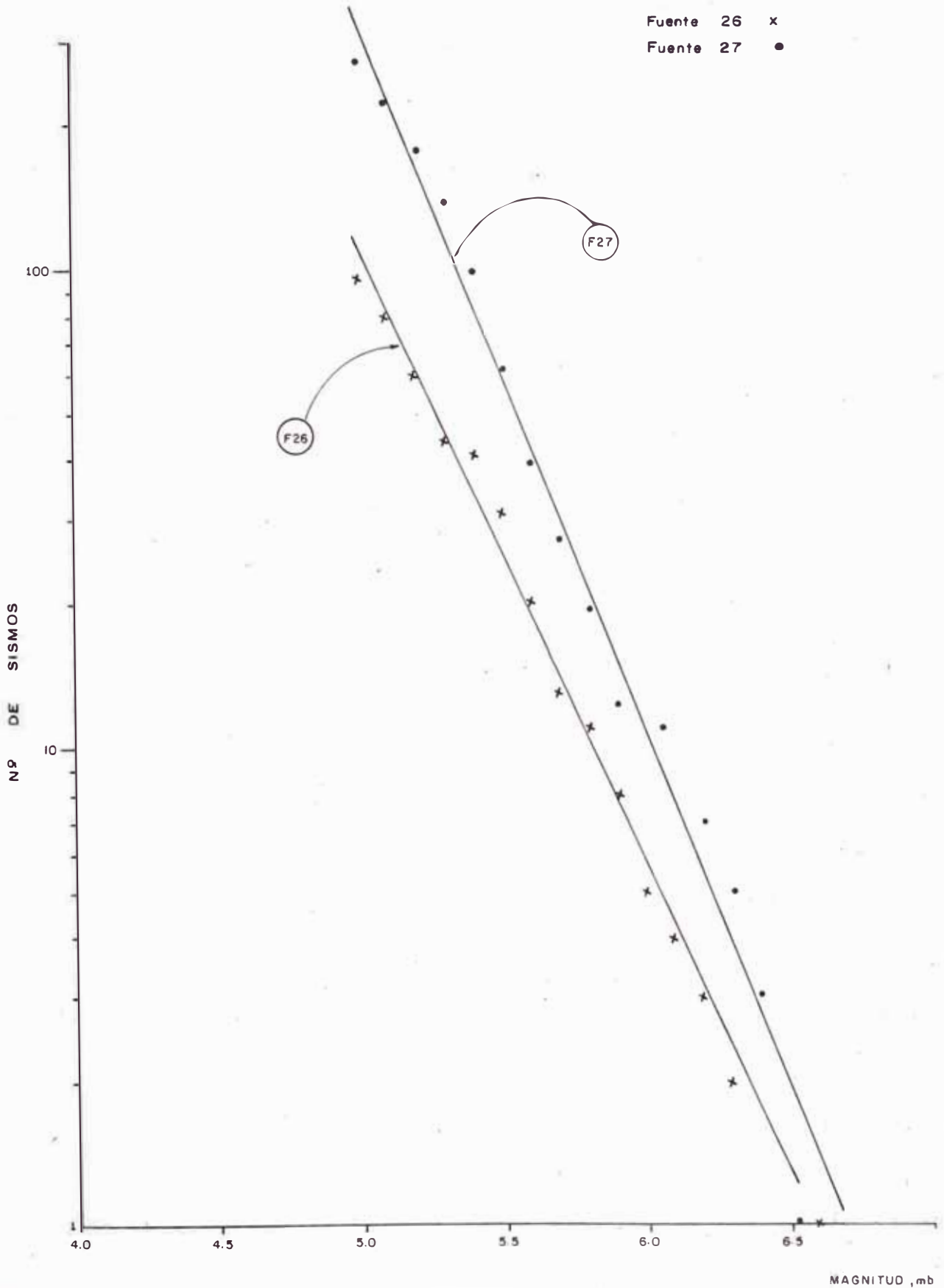


Fig. 4.12 DISTRIBUCION DE PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES, PROYECTO ECOSIS-UNI 1984

Fuentes Sismogénicos : F1, F2, F3 y F4
 Fuente de Datos : Catálogo de la NOAA (1963 - 1981)

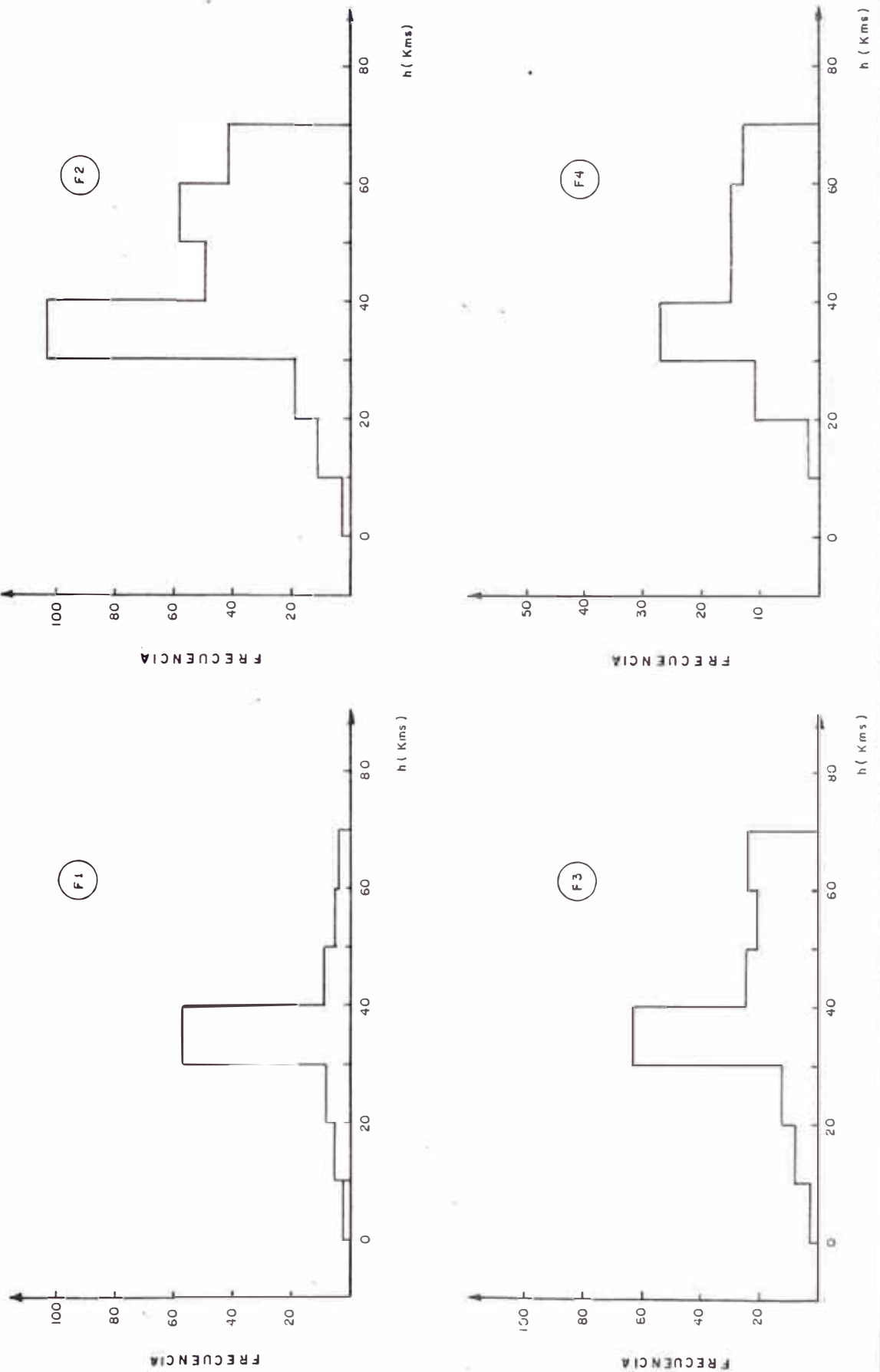


Fig. 4.13 DISTRIBUCCION DE PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES, PROYECTO ECOSIS - UNI 1984

Fuentes Sismogénicas F 5, F6 y F7
Fuente de Datos Catálogo de la NOAA (1963-1981)

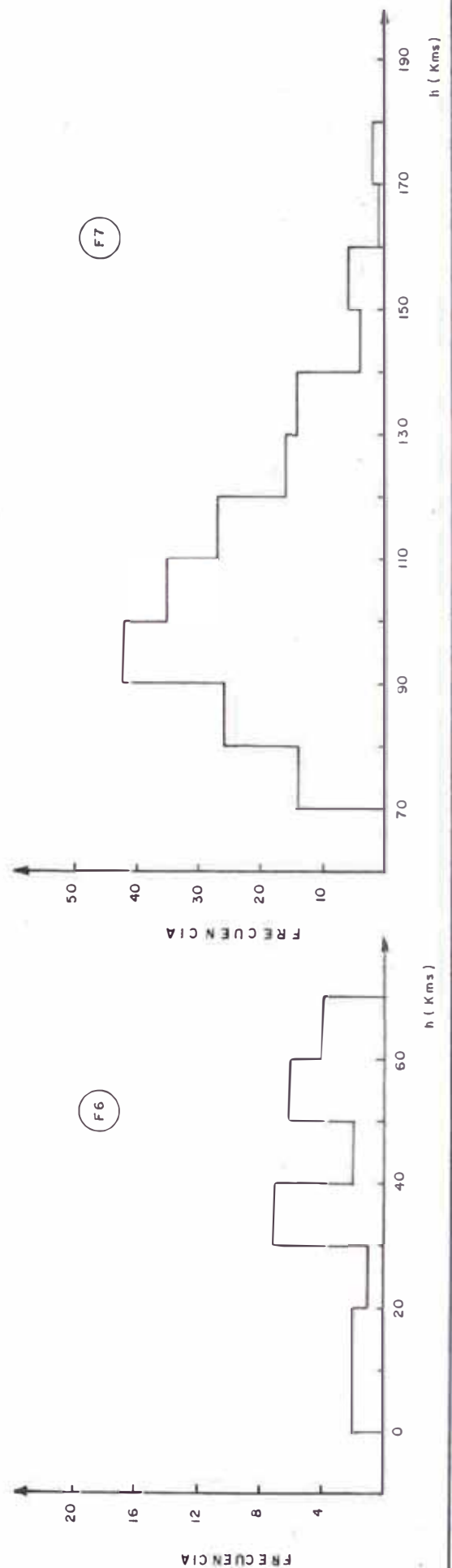
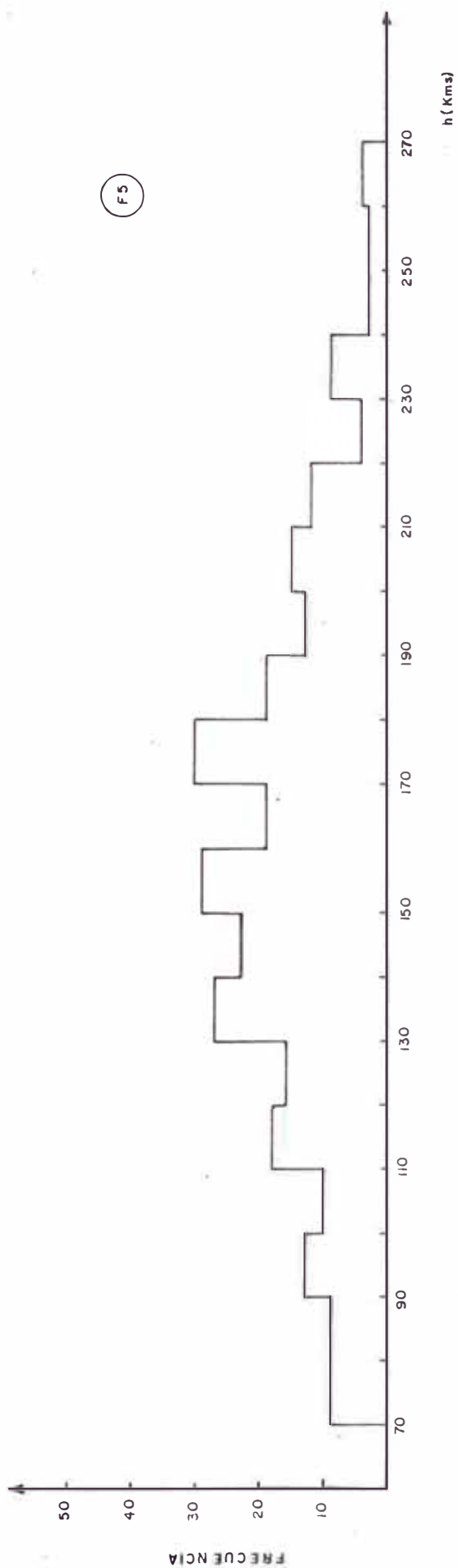


Fig. 4.14 DISTRIBUCION DE PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES, PROYECTO ECOSIS -UNI 1984

Fuentes Sismogenicos F 8, F 9, F 10 y F 11

Fuente de Datos Catálogo de la NOAA (1963-1981)

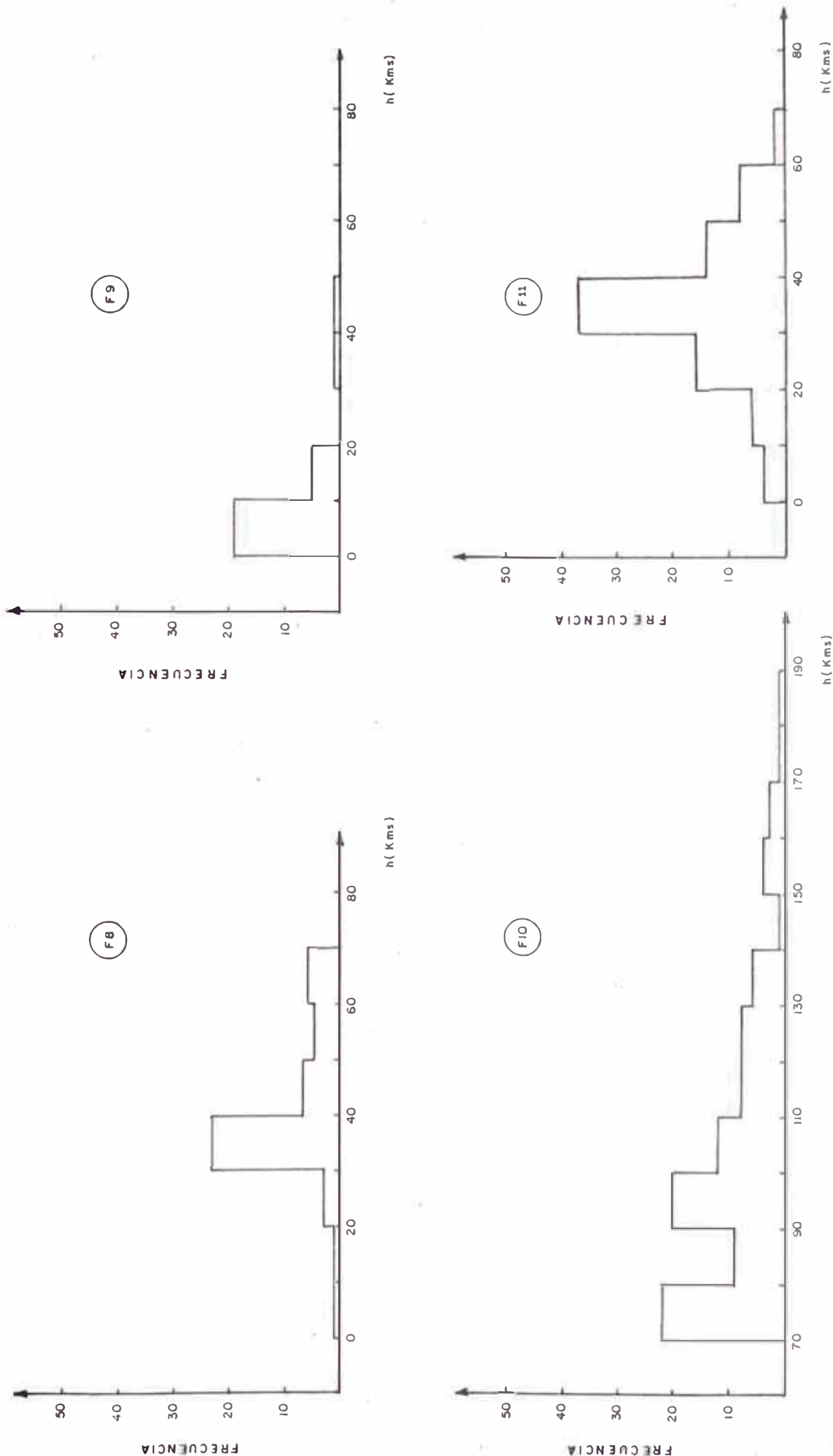


Fig. 4.15 DISTRIBUCION DE PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES, PROYECTO ECOSIS - UNI 1984

Fuentes Sismogénicas : F12, F13, F14 y F15

Fuente de Datos : Catálogo de la NOAA (1963-1981)

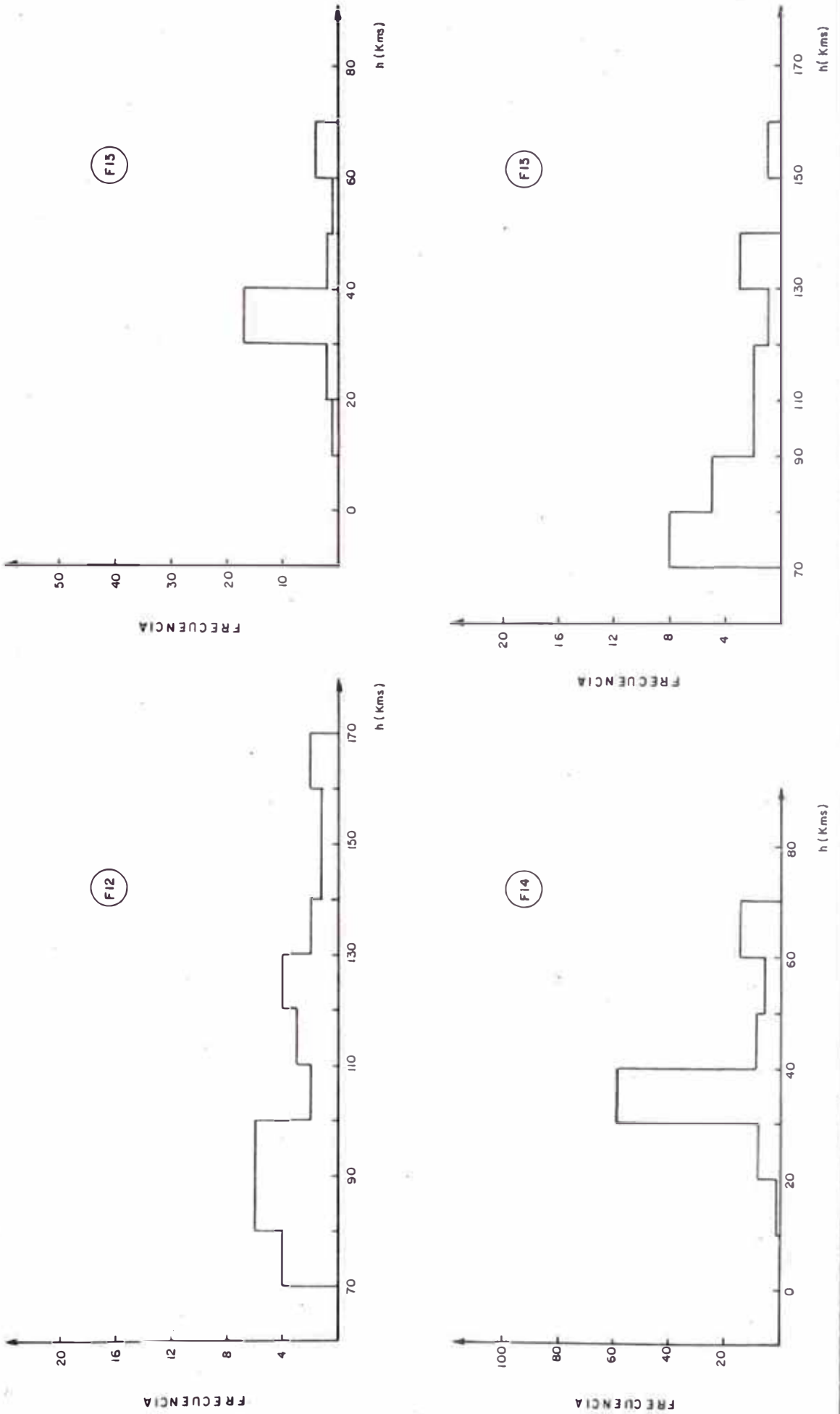


Fig. 4.16 DISTRIBUCION DE PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES, PROYECTO ECOSIS -UNI 1984

Fuentes Sismogénicos F 16, F 17, F 18 y F 19

Fuente de Datos Catálogo de la NOAA (1963 -1981)

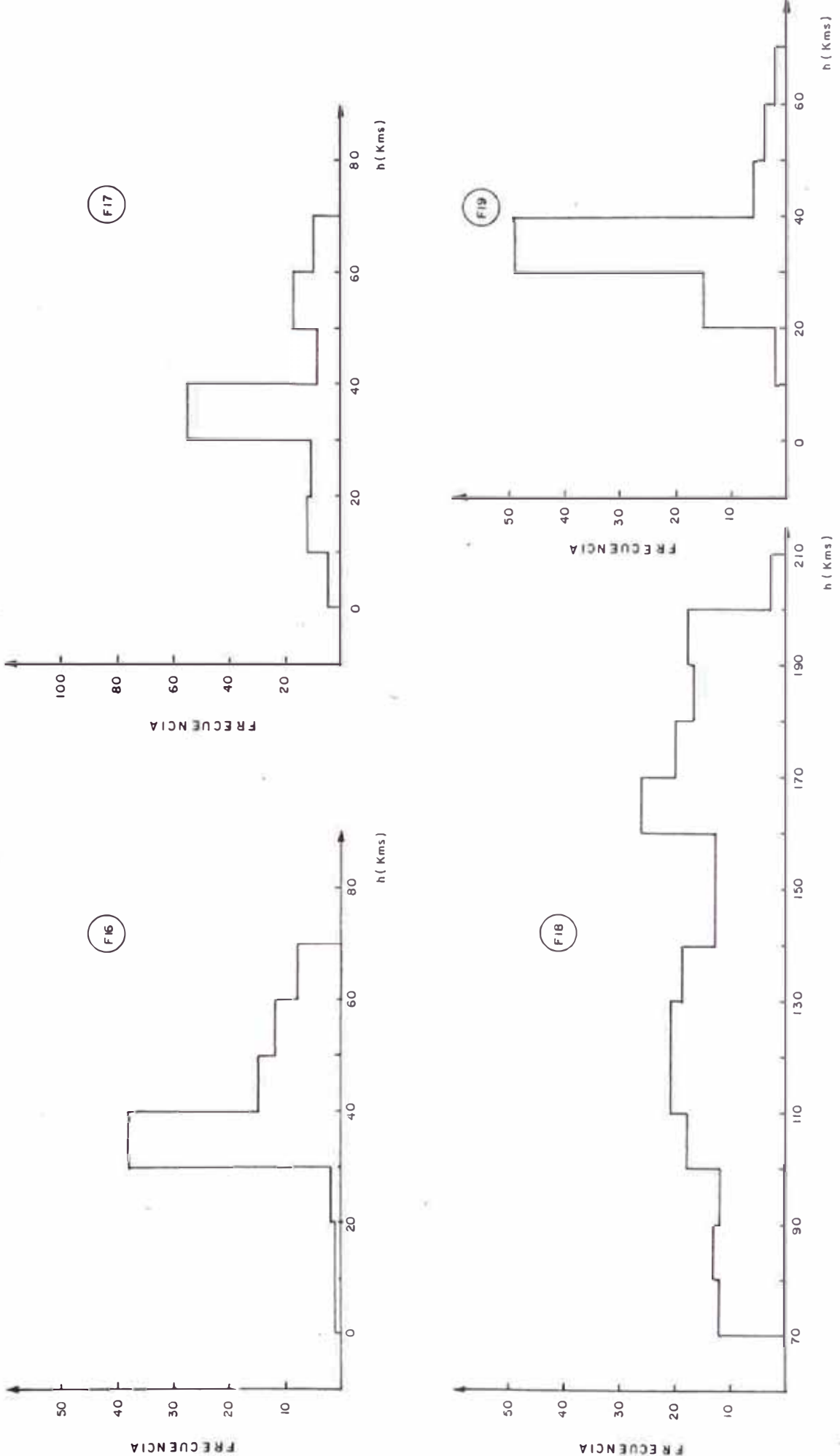


Fig. 4.17 DISTRIBUCION DE PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES, PROYECTO ECOSIS-UNI 1984

Fuentes Sismogénicas : F 20, F 21 y F 22

Fuente de Datos : Catálogo de lo NOAA (1963 - 1981)

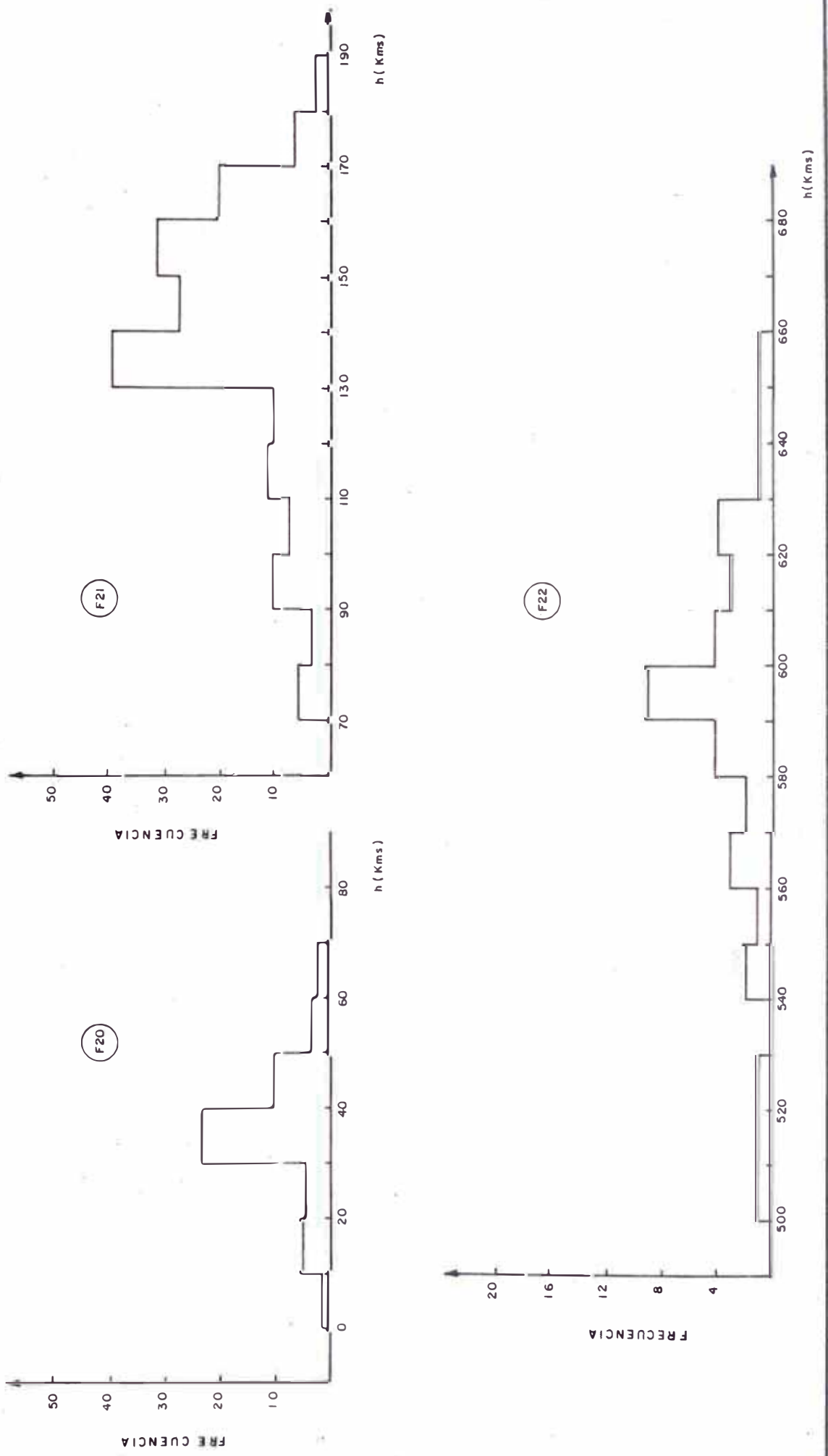


Fig. 4.18 DISTRIBUCION DE PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES, PROYECTO ECOSIS - UNI 1981

Fuentes Sismogénicas : F23, F24, F25 y F26

Fuente de Datos : Catálogo de lo NOAA (1963-1981)

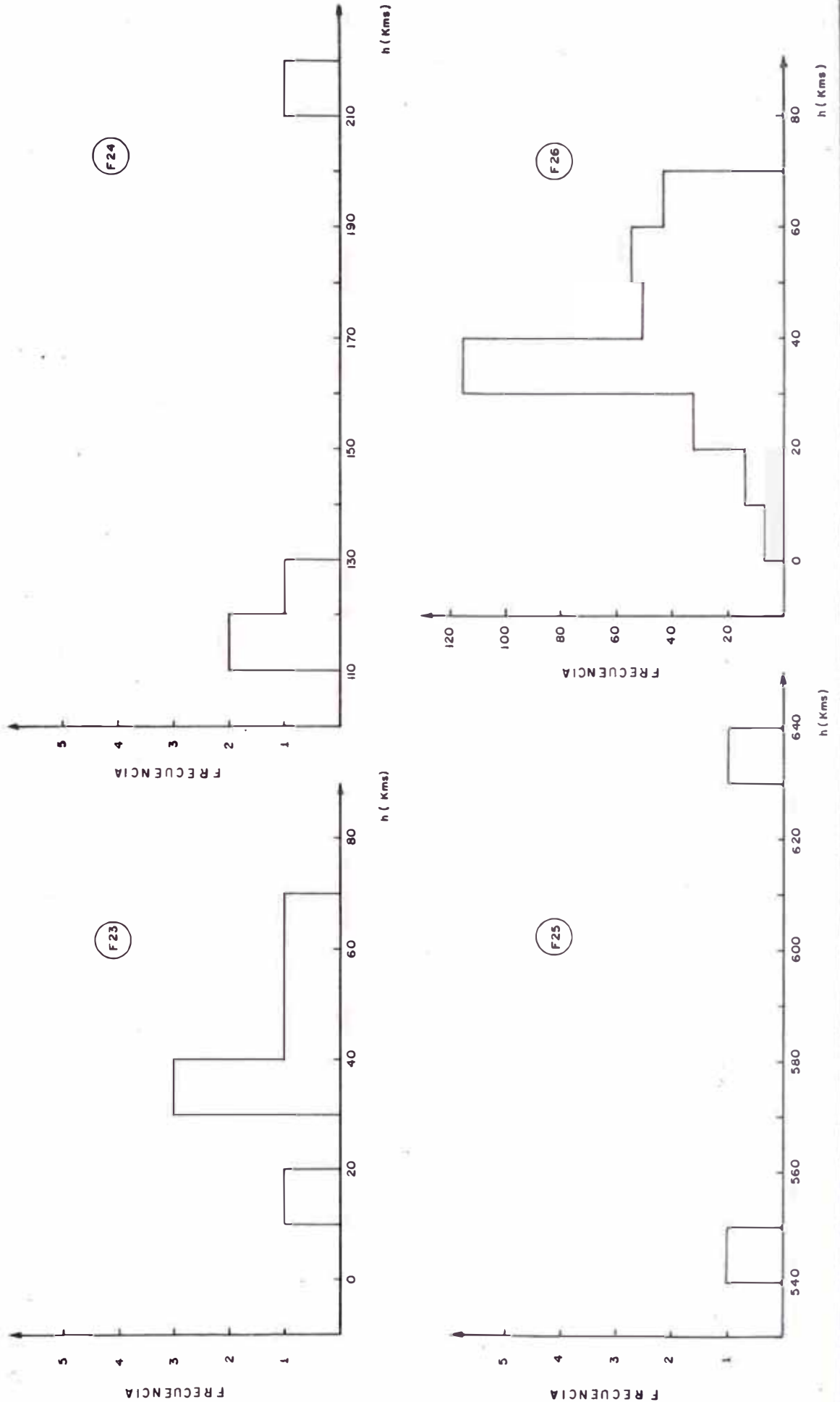


Fig. 4.19 DISTRIBUCION DE PROFUNDIDADES HIPOCENTRALES, PROYECTO ECOSIS-UNI 1984

Fuentes Sismogenicas : F 27

Fuente de Datos : Catálogo de la NOAA (1963-1981)

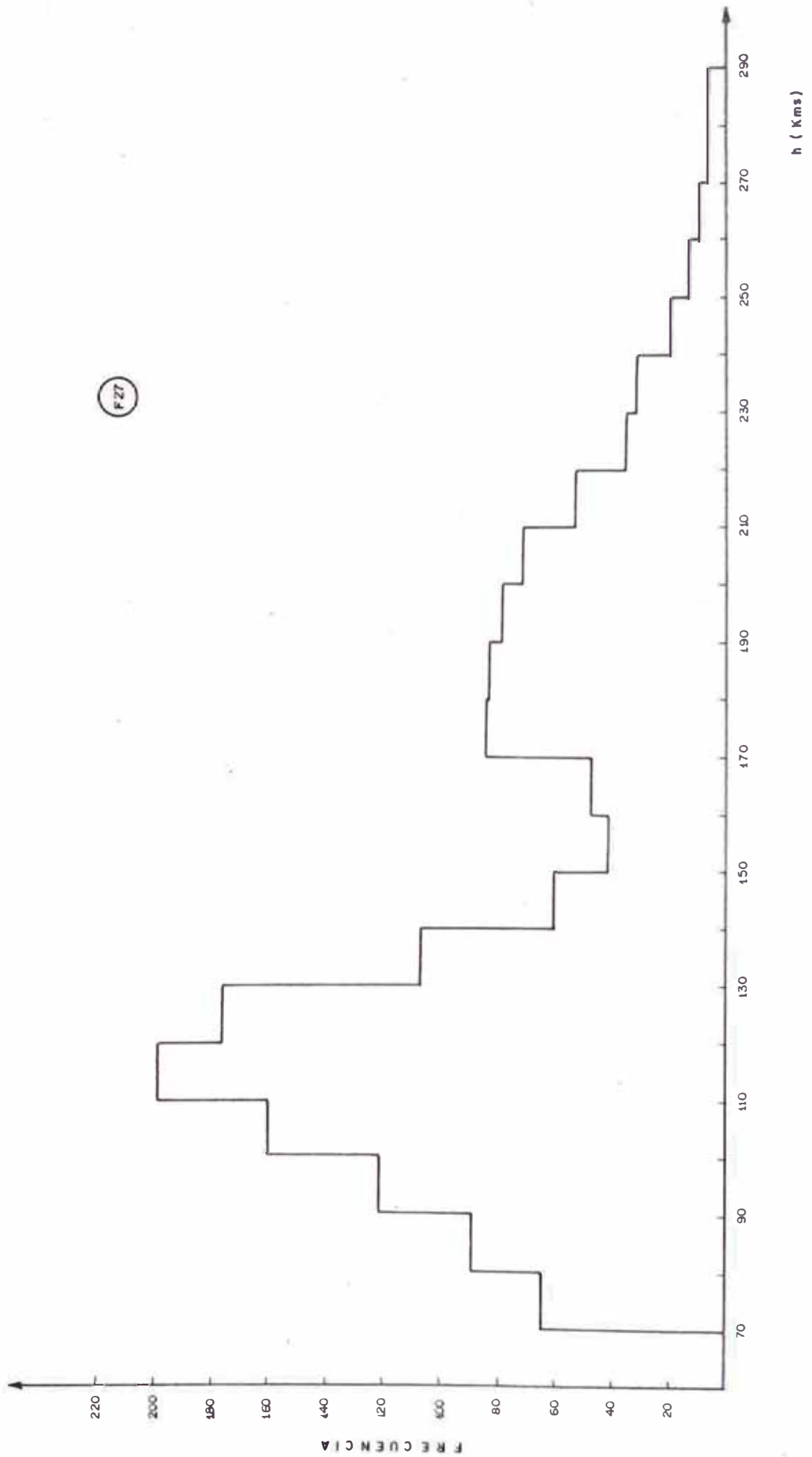


Fig. 4.20

RESULTADOS DE RIESGO SISMICO ANUAL PARA LA CIUDAD DE
HUARAZ (77.53° W, 9.53° S).

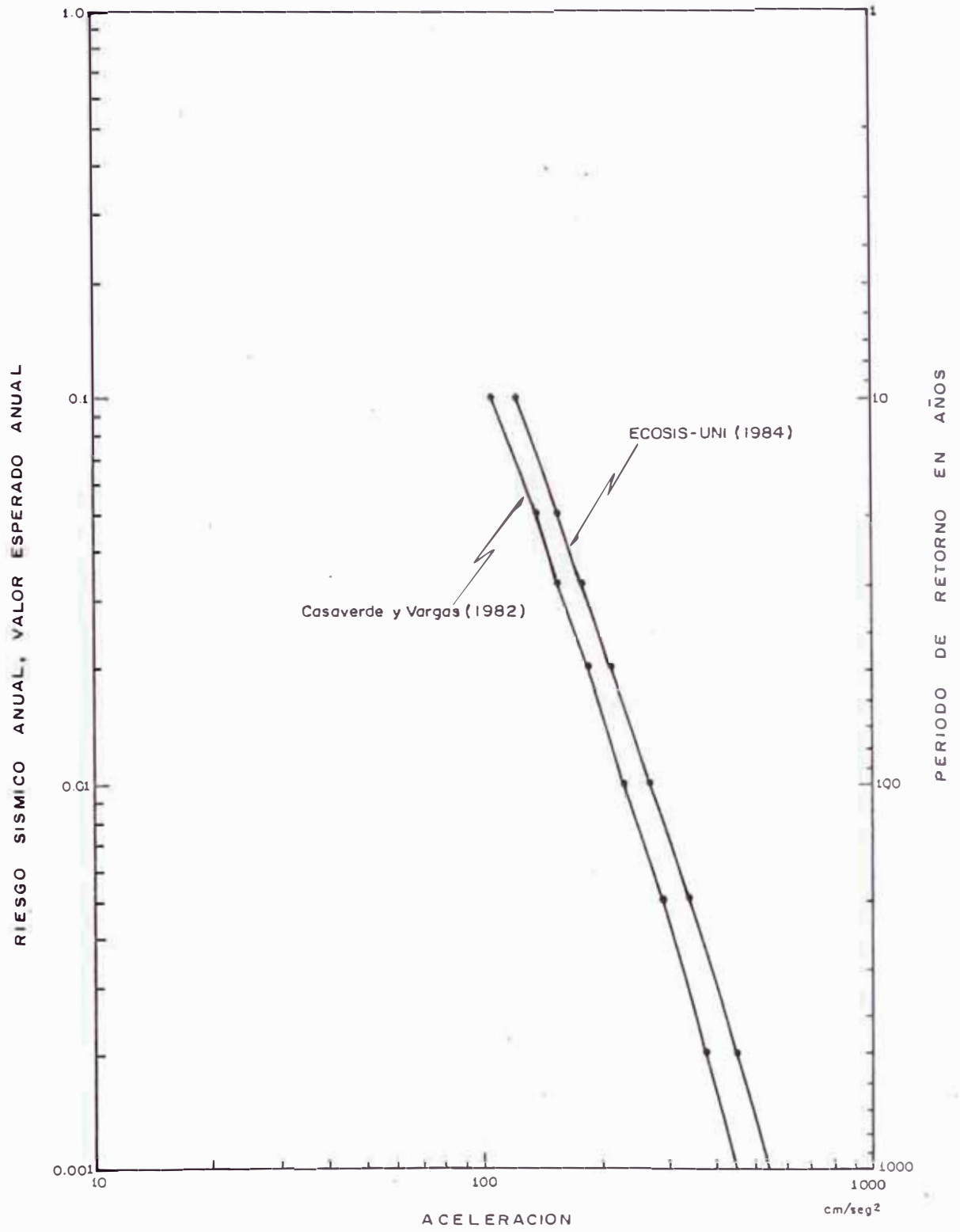
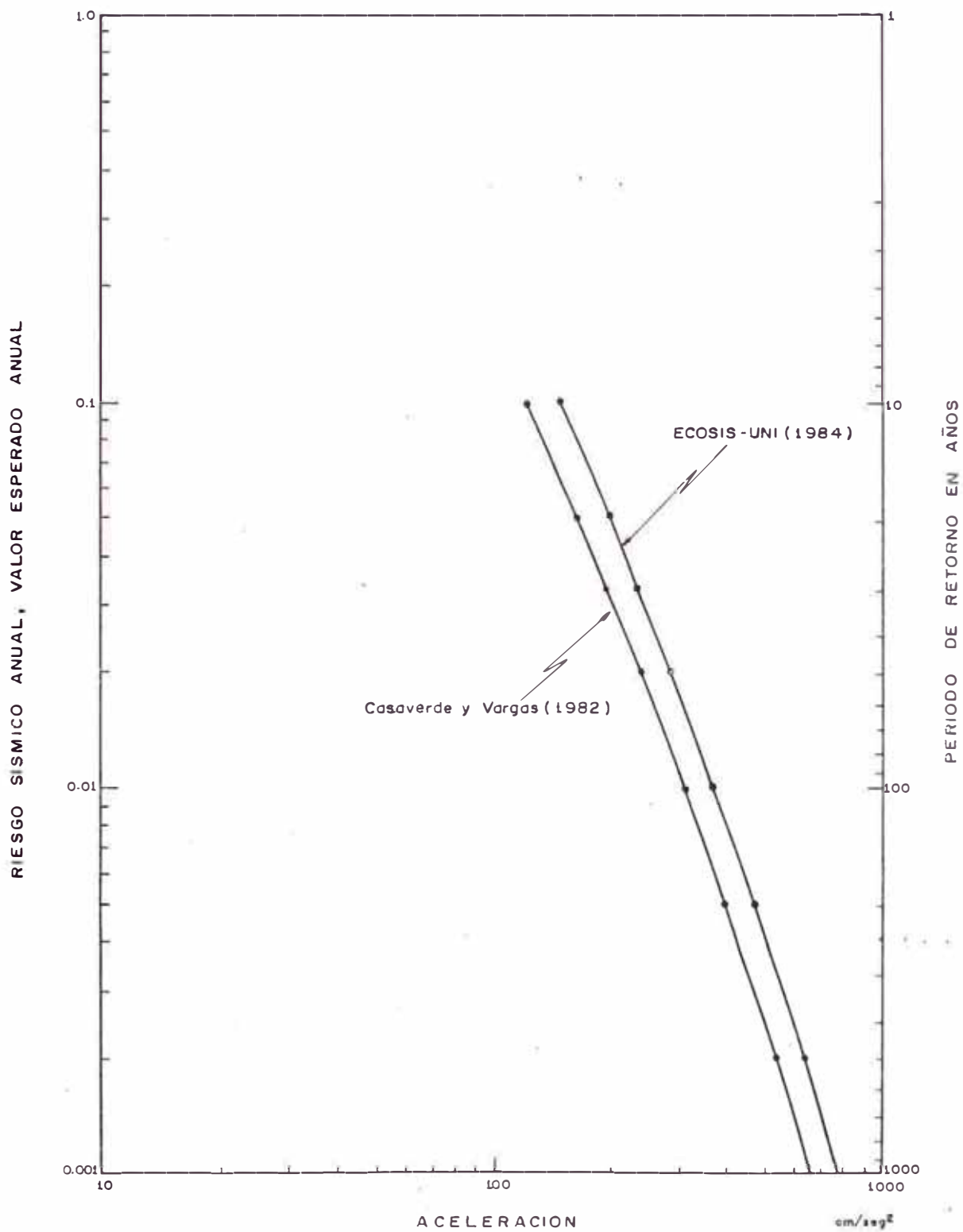


Fig - 4.21

RESULTADOS DE RIESGO SISMICO ANUAL PARA LA CIUDAD DE
CHIMBOTE (78.58 W, 9.08° S)



CAPITULO V

ESTUDIO DEL POTENCIAL SISMICO DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

- 5.1 INTRODUCCION
- 5.2 GENERALIDADES
- 5.3 TIPOS DE FALLAS
- 5.4 ACTIVIDAD DE UNA FALLA
- 5.5 CLASIFICACION DE LAS FALLAS SEGUN SU ACTIVIDAD
- 5.6 RELACIONES PARA ESTIMAR LAS MAGNITUDES SISMICAS MAXIMAS DE UNA FALLA
- 5.7 CARACTERISTICAS FISICAS DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA
- 5.8 INVESTIGACIONES SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA
- 5.9 RESULTADO DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA
- 5.10 GRADO DE ACTIVIDAD DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA
- 5.11 CALCULO DE LAS MAGNITUDES MAXIMAS PARA LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA
- 5.12 CONCLUSIONES

5.1 INTRODUCCION

El estudio de las Fallas Activas juega un papel preponderante en la determinación de la factibilidad de las obras de Ingeniería Civil, afectadas de una u otra forma por estas fallas geológicas.

En nuestro país estos estudios están en una fase inicial y sólo se han limitado a realizar descripciones de las características de las rupturas en superficie y de los sismos que éstas originaron (Salazar et al, 1984).

El objetivo del presente capítulo es el de evaluar el grado de actividad de la falla de la Cordillera Blanca, localizada en el departamento de Ancash (zona de interés del presente trabajo), y determinar los valores de los parámetros más representativos de esta falla. Para ello se ha considerado casi en su integridad, el estudio que recientemente ha realizado sobre esta falla, la compañía consultora Woodward-Clyde (1984) para ELECTROPERU como parte de un proyecto integral para evaluar el aprovechamiento hidroenergético del río Santa. Se ha considerado estos estudios por cuanto constituyen los más completos realizados hasta ahora.

Para el desarrollo del presente capítulo se ha considerado necesario presentar en su primera parte un resumen general acerca de las definiciones, tipo y clase de fallas, así como una información detallada sobre los métodos de evaluación del potencial sísmico de una falla (longitud de ruptura, área de ruptura, períodos de retorno, magnitu

des máximas y otros).

En su segunda parte el estudio se centra exclusivamente en la falla de la Cordillera Blanca, en donde se presentan sus características físicas y sobretodo los resultados obtenidos de las investigaciones realizadas por Woodward-Clyde (1984) para la evaluación del potencial sísmico de esta falla.

5.2 GENERALIDADES

Una falla es una superficie de fractura con respecto a la cual las rocas se han desplazado relativamente. Se conocen desplazamientos en la vertical de más de mil metros y otras horizontales de varios kilómetros; pero en ningún caso hay razón para suponer que este fenómeno se haya debido producirse forzosamente en una conmovición catastrófica única. Los terremotos resultan ordinariamente de movimientos repentinos a lo largo de las fallas que se encuentran en actividad, pero estos movimientos rara vez sobrepasan un metro de amplitud. Las fallas geológicas son pues accidentes tectónicos de gran importancia en la ejecución de proyectos de ingeniería civil, debido a los problemas sísmicos que puedan generar. Bonilla (1970) resume estos problemas en tres tipos :

- . daños ó destrucción de las estructuras construídas sobre fallas
- generación de terremotos a lo largo de las mismas
- cambios en las propiedades geotécnicas del terreno disminuyendo su resistencia, modificando su permeabilidad

dad, poniendo en contacto formaciones litológicas diferentes y activando la erosión diferencial.

Para determinar el peligro que pueden representar el emplazamiento de una falla, es necesario realizar una evaluación que considere sus características más importantes tales como : emplazamiento, geometría, desplazamientos, antigüedad, sismicidad asociada, etc. en base a una exhaustiva recopilación y análisis de informaciones geológicas, sismológicas e históricas. La identificación preliminar de una falla se realiza mediante la utilización de fotografías aéreas con escalas entre 1:30,000 y 1:60,000; estudios más detallados se realizan con escalas entre 1:12,000 y 1:20,000 con traslapes del 60% y utilizando vistas estereoscópicas (Cluff et al, 1974). Exploraciones de campo permiten definir completamente el emplazamiento de una falla.

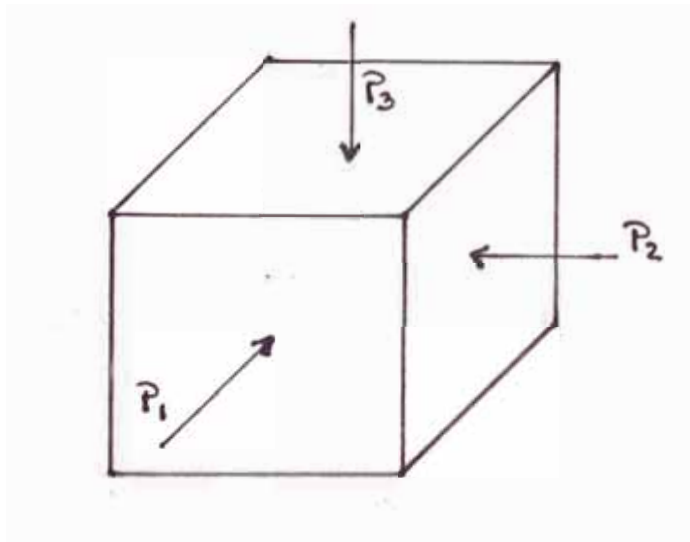
La antigüedad de una falla está relacionada a la edad de las formaciones geológicas que desplaza ó cruza. Adicionalmente dataciones radiométricas de los perfiles estratigráficos que contengan restos carbonosos ó relaciones históricas de vestigios culturales permiten corroborar la antigüedad del último evento de una falla.

Estudios de sismicidad asociada a las fallas son también muy importantes, como localizaciones de epicentros e hipocentros, evaluación de la sismicidad histórica, mecanismos focales y estudios de microsismos. Estudios complementarios basados en la instrumentación del área de falla para realizar mediciones de cambios geodésicos y desplazamientos son

también relevantes.

5.3 TIPOS DE FALLAS

Toda masa rocosa de la superficie terrestre está sometida a la gravedad y a la presión. Las tensiones resultantes se pueden representar en todo momento por tres fuerzas principales que actúan perpendicularmente entre sí: P_1 , la menor de ellas (que comprende la tensión propiamente dicha); P_2 , intermedia, y P_3 , la mayor. Generalmente una de las tres es vertical y las otras dos horizontales



Si la máxima diferencia entre estas fuerzas $P_3 - P_1$ excede a la resistencia de la roca, ésta se deforma entonces, rompiéndose si es quebradiza ó cambiando de forma ó tamaño si es plástica. Cerca de la superficie las rocas ceden principalmente por fractura, pero a mayores profundidades varían según la naturaleza de la roca; el cambio de forma se produce por un flujo ó deslizamiento sólido, es decir, por un flujo plástico cuyos movimientos son facilitados por fracturas microscópicas, seguidas ó no de la recristalización de la masa

Los diversos tipos de fallas dependen de las relaciones que existen entre estas tres fuerzas, suponiendo, como es natural, que en las circunstancias de cada caso la diferencia - entre las presiones sea suficiente para llevar a cabo la fractura y el movimiento.

La fuerza vertical puede ser debido a la acción de la gravedad ó a la presión magmática, y las fuerzas horizontales a la compresión o tracción de la tierra.

Los tipos de fallas generados como resultado del desequilibrio entre estas fuerzas se diferencian según la dirección del desplazamiento (ver Figura 5.1). Los más comunes son

a) Fallas Normales:

La fuerza vertical es la mayor de las tres, produciéndose esfuerzos tensionales. Se les reconoce porque el "bloque techo" baja. La fractura resultante está generalmente inclinada, pudiendo estar el plano correspondiente entre 45° de inclinación y la vertical.

b) Fallas Inversas:

La fuerza vertical es la menor de las tres, produciéndose esfuerzos compresionales. Se les reconoce porque el "bloque techo" sube. La fractura resultante está inclinada, estando el plano de falla entre 45° de inclinación y la horizontal comunmente, pudiendo el ángulo ser más elevado.

c) Fallas Horizontales:

La fuerza vertical es intermedia entre las fuerzas horizontales máxima y mínima, produciéndose esfuerzos cortan

tes horizontales. El movimiento resultante es preferentemente horizontal, siendo la fractura vertical ó casi vertical.

d) Fallas Oblicuas:

Estas fallas son generadas por la superposición de esfuerzos tensionales ó compresionales con los cortantes.

5.4 ACTIVIDAD DE UNA FALLA

No hay una definición universalmente aceptada para decir cual falla es activa y cual no lo es. El amplio rango para la identificación de una falla "activa" varía, desde aquellos basados en intervalos cortos de recurrencia de la actividad de la falla, utilizados para proyectos de reactores nucleares ó de similar importancia, hasta aquellos basados en intervalos largos de recurrencia para proyectos de menor importancia. Aunque las definiciones varían considerablemente, los siguientes elementos aparecen en la mayoría de las definiciones

las fallas activas se diferencian de las "no activas" en que tienen un potencial de reactivación de procesos tectónicos recientes y están prestas a producir terremotos dañinos en el futuro.

la evidencia de actividad puede ser proporcionada por documentación histórica de desplazamientos de fallas, ó evidencias geológicas de actividad en la historia geológica reciente (en el Holoceno ó en algún lugar del Cuaternario).

197-198

. evidencias sismológicas o geofísicas de deformaciones tectónicas recientes en las fallas.

Slemmons y McKinney (1977) evaluaron las definiciones de fallas activas realizadas hasta esa fecha por autores y organismos importantes y resumen: "una falla activa es cuando ha tenido desplazamiento durante el presente régimen sismotectónico y por consiguiente está dispuesta a tener nuevos desplazamientos en el futuro". Se considera como el presente régimen sismotectónico a la edad holocénica (últimos 10,000 años).

En la actualidad, la actividad de las fallas son reconocidas principalmente en base a tres tipos de evidencias (Cluff y otros, 1972) : históricas, sismológicas y geológicas.

Las investigaciones históricas se refieren a la recopilación e interpretación de datos históricos a través de crónicas, manuscritos, diarios ó libros pasados; entre las investigaciones sismológicas se tiene la localización precisa de epicentros e hipocentros, el cálculo de mecanismo focales, detección microsísmica y prospecciones geofísicas; y como investigaciones geológicas: la interpretación de la geomorfología y tectónica regional, interpretación fotogeológica, exploración local mediante trincheras y sondeos, datación geocronológica mediante radiometría, paleontología, arqueología u otras.

En la Tabla N°5.1 se presenta un resumen de las características de cada una de estas evidencias.

5.5. CLASIFICACION DE LAS FALLAS SEGUN SU ACTIVIDAD

En términos generales una falla activa es una falla en la cual puede ocurrir un terremoto bajo las condiciones presentes de esfuerzo tectónico. Sin embargo, debido a que la definición de una falla como activa ó no activa se ha tornado paulatinamente importante, ha sido necesario que varias instituciones gubernamentales, así como diversos investigadores adoptaran definiciones muy específicas al respecto. Entre las definiciones más importantes se pueden mencionar las siguientes :

5.5.1 CRITERIOS DE LAS DIFERENTES ORGANIZACIONES GUBERNAMENTALES

El criterio adoptado por las distintas organizaciones americanas sobre la actividad de una falla varía, dependiendo de las consecuencias del colapso de una estructura dada. La antigüedad del desplazamiento evalúa el grado de actividad de una falla, considerando que cuanto más reciente haya ocurrido el último evento, mayor será la posibilidad de que ocurra un nuevo movimiento. A continuación se presenta un resumen de los criterios propuestos por las diferentes entidades gubernamentales americanas

a) Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos (U.S. Nuclear Regulatory Commission) N.R.C.

La NRC aprueba todas las plantas nucleares, privadas ó estatales en los Estados Unidos, y ha adoptado el criterio para fallas activas más conservador que haya re

gido hasta hoy. El criterio utilizado por la NRC ha sido adoptado, con pequeñas modificaciones, por la Organización Internacional de Energía Atómica (IAEO) en lo que concierne a sitios de plantas nucleares en áreas sísmicamente activas alrededor del mundo.

La NRC define a una falla como activa a una falla que ha evidenciado una ó más de las siguientes características:

movimiento en la superficie del terreno ó cerca del mismo, por lo menos una vez en los últimos 35,000 años, ó más de una vez en los últimos 500,000 años. Es generalmente imposible indicar con seguridad que un desplazamiento cualquiera en unidades geológicas de 500,000 años ó más recientes, haya sido causado por un solo evento; por consiguiente, cualquier falla provoque un desplazamiento en una unidad geológica con 500,000 años ó menos, es considerada activa. macrosismicidad instrumentalmente bien determinada en fallas.

una relación con una falla activa con las características arriba mencionadas, de tal manera que podría concluirse razonablemente que un movimiento en una de ellas estaría acompañado por un movimiento en la otra.

b) U.S. Bureau of Reclamation (USBR)

El USBR es una de las mayores organizaciones en los Estados Unidos involucrada en el diseño y construcción de presas. Este organismo ha adoptado un criterio de fallas activas que es utilizado para el diseño sísmico de sus presas. El criterio de fallas activas del USBR

es el siguiente :

- falla activa : una falla que demuestre evidencias de desplazamiento en los últimos 100,000 años.
- falla inactiva una falla que claramente no demuestre evidencia de desplazamiento en los últimos 100,000 años.
- falla indeterminada : una falla que no puede ser considerada activa ó inactiva en base a los datos disponibles; en el caso de que la falla sea importante para el diseño sísmico, debe ser considerada como activa.

c) U.S. Army Corps of Engineers (USACE)

El cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos también ha establecido un criterio para usarlo en el diseño de presas y estructuras anexas. Las fallas se definen como activa o inactiva. Se considera que una falla es activa cuando presenta un potencial para generar un terremoto (y un potencial para fallamiento de superficie) en el caso de exhibir una ó más de las siguientes características :

movimiento cerca ó en la superficie del terreno, por lo menos una vez en los últimos 35,000 años.

macrosismicidad (terremoto de magnitud 3 ó superior) instrumentalmente localizada, con registro de precisión suficiente para demostrar una relación directa con la falla.

. Una relación estructural con una falla activa, de

tal manera que un movimiento en una de las fallas po
dría probablemente causar un movimiento en la otra.

d) Estado de California

El Estado de California ha establecido criterios para la clasificación de las fallas para obras críticas, como lo son las presas, hospitales y escuelas.

El grupo estatal de Minería y Geología (State Mining and Geology Board) en su política y criterios (1973) ha definido las fallas como activas, potencialmente activas, ó inactivas :

d1) activa : es una falla que ha presentado desplazamiento en los últimos 10,000 años (Holoceno).

d2) potencialmente activa : es una falla que ha presen
tado desplazamiento en los últimos 3 millones de a
ños (Cuaternario).

d3) inactiva : fallas que no están consideradas ni en (d1) ni en (d2). Una falla potencialmente activa puede considerarse como inactiva en caso que la e
videncia directa haya demostrado que no ha experimentado desplazamientos en los últimos 10,000 años.

Un resumen de los criterios establecidos por estas cuatro organizaciones para la actividad de una falla se presenta en la Tabla N° 5.2 .

5.5.2 CRITERIOS CONSIDERADOS POR CLUFF Y OTROS (1972)

Basados en las evidencias históricas, sismológicas y geol
gicas, estos autores clasificaron la actividad de una falla

en cuatro categorías principales : activa, potencialmente activa, actividad incierta e inactiva.

- a) activa: una falla tectónica con historia de fuertes terremotos ó fallas superficiales, ó una falla con un período corto de recurrencia relativo a la vida útil de las estructuras de ingeniería. El período de recurrencia utilizado para definir la tasa de actividad puede variar de acuerdo con la importancia de la actividad.
- b) potencialmente activa : una falla tectónica sin historia de fallas superficiales ó de terremotos fuertes pero con un período de recurrencia que puede ser suficientemente corto para ser significativo para un proyecto en particular.
- c) Actividad incierta una falla con insuficientes evidencias para definir actividad en el pasado ó períodos de recurrencia. Las siguientes clasificaciones pueden ser usadas hasta que los resultados de estudios adicionales proporcionen evidencias definitivas
 - c1) tentativamente activa : la evidencia predominante sugiere que la falla puede ser activa a pesar que su período de recurrencia es muy largo ó pobremente definido.
 - c2) tentativamente inactiva : la evidencia predominante sugiere que la falla no es activa.
- d) inactiva : una falla en el cual se puede demostrar que a lo largo de ella no han ocurrido fallas superficiales durante el pasado reciente, y cuyos período de re

torno es suficientemente largo para no ser significativo en el diseño de los proyectos.

Esta clasificación propuesta por estos autores se presenta sintetizada en la Tabla N°5.3 .

5.5.3 CRITERIOS CONSIDERADOS POR SLEMMONS Y OTROS (1977)

a) Considerando las definiciones dadas por diversos autores e instituciones

Slemmons resume los principales criterios considerados por distintos autores e instituciones para definir la actividad de una falla. Basado en ello, el autor clasifica a las fallas como activas, capaces y muertas.

a1) activas : es una falla que ha presentado desplazamientos ya sea históricas ó en un tiempo geológico reciente y está propensa a desplazarse nuevamente en el futuro. La actividad de la falla es indicada por evidencias históricas, sismológicas ó geológicas presentándose con tasas de actividad que varían desde las más bajas, con un período de retorno largo, hasta las más altas, con un período de retorno corto. La actividad de los volcanes activos, los cuales pueden mostrar actividad reciente ó en el pasado; o ser durmientes, pero que tienen el potencial de reactivación en el futuro.

a2) capaces : la definición para fallas capaces es la definida por el U.S. Atomic Energy Commission (ac-

tualmente designado como el Energy Research and Development Agency, ERDA) y el International Atomic Energy Agency (ver acápite 5.5.1).

a3)muerta : es una falla que fue activa durante los tempranos períodos orogénicos, pero no es activa dentro del presente proceso tectónico.

b) Considerando la razón de desplazamiento (Slip Rate):
La razón de desplazamiento viene dada por la expresión:

$$S = D/T$$

donde Srazón de desplazamiento en mm/año ó
cm/año

D ... desplazamiento en mm o cm

T ... edad del desplazamiento en años

y viene a ser un índice comparativo que da una idea de cuanto es el monto del desplazamiento referido a un período de tiempo establecido. Esta razón de desplazamiento diferencia la actividad de la falla en varios grados: muy alta actividad, alta actividad, moderada actividad, baja actividad y extremadamente baja actividad. Matsuda (1977) divide las razones de desplazamiento en varios tipos : A, B, C y D.

b1) actividad muy alta (Matsuda tipo AA) : las zonas de mayor actividad son aquellas que están dentro - de un rango de magnitud de las tasas altas observadas en los límites de las placas tectónicas importantes.

b2) actividad alta (Matsuda tipo A): la clasificación para tasas entre 1 cm/año y 0.1 cm/año compatibili

za con la definición de "alta" dada por el International Atomic Agency. Este rango de tasas caracteriza a muchas fallas importantes tanto de moderadas como de muy grandes longitudes y generalmente son definidas por rasgos geomórficos que caracterizan a las fallas activas. El período de recurrencia para sismos de magnitud 7.0 en un punto dado de la falla es generalmente medido en cientos o miles de años. Tales tasas altas generalmente deberían ser consideradas para la gran parte de las estructuras de ingeniería, aún cuando el período de recurrencia sea mucho mayor que la vida útil de la estructura.

b3) actividad moderada (Matsuda tipo B) el rango de la tasa está entre 0.1 y 0.01 cm/año. Este rango incluye fallas que generalmente han presentado evidencias geomórficas de actividad. El período de recurrencia para desplazamientos a lo largo de estas fallas y la generación de sismos de magnitud 7.0 o mayor, es generalmente medido desde miles hasta varias decenas de miles de años para un punto dado de la falla. Este período moderado de recurrencia es mucho mayor que la vida útil de muchas estructuras de ingeniería, pero deberían ser consideradas para gran parte de ellas.

b4) actividad baja (Matsuda tipo C): el rango de la tasa está entre 0.01 y 0.001 cm/año. Las fallas de

este tipo presentan escasas ó inconclusas evidencias geomórficas de actividad. El período de recurrencia para sismos de magnitud 7.0 ó mayores está generalmente entre las varias decenas de miles hasta los cientos de miles de años. Consideraciones de ingeniería de fallas en este rango de actividad está generalmente restringida a importantes estructuras tales como los reactores nucleares y presas.

- b5) actividad extremadamente baja ó inactiva: este rango de actividad, que considera tasas menores que 0.001 cm/año, representa tasas de deformación de cuatro a más niveles de magnitud más bajas que para aquellas zonas de muy alta actividad, e incluye fallas que tienen tasas muy bajas de actividad y/o fallas que son geológicamente inactivas. En realidad resulta generalmente dificultoso evaluar la inactividad ó la tasa muy baja de estas fallas. Desde que los depósitos de comienzo y mitad del Cuaternario ó de fines del Terciario son comunmente ausentes, la oportunidad de encontrar evidencias directas para medir ó distinguir estas tasas muy bajas puede ser escasa, impidiendo definir en forma precisa la actividad de estas fallas. Fallas de este tipo pueden estar presentes en las partes menos activas de regiones con fallas activas.

Para la mayoría de las estructuras de ingeniería, estas fallas pueden estar agrupadas como "probables

mente ó prácticamente inactivas" pero deben ser consideradas para estructuras de extrema importancia - como los son los reactores nucleares, grandes presas y diques que son requeridos para proteger áreas de gran densidad poblacional, donde el fracaso de ellas podríán afectar la seguridad, bienestar y funciones vitales gubernamentales de un gran número de personas.

En la Figura 5.2 se resume la clasificación dada por Slemons (1977). Se indica además la clasificación dada por Matsuda (1979); así como también las consideraciones de actividad según la antigüedad de los desplazamientos.

5.6 RELACIONES PARA ESTIMAR LAS MAGNITUDES SISMICAS MAXIMAS DE UNA FALLA

En la actualidad no existe un parámetro único aceptado para asignar magnitudes máximas a una falla. Las diversas investigaciones sobre este aspecto, han sido generalmente desarrollados de relaciones empíricas entre la magnitud y los parámetros de fallas más importantes que son: la longitud de ruptura, el máximo desplazamiento superficial, la ruptura de área, la razón de desplazamiento y el momento sísmico.

a) Longitud de Ruptura versus Magnitud

La aproximación más común para estimar la máxima magnitud es a través de la relación entre la longitud de ruptura de falla y la magnitud sísmica.

Slemmons (1982) propone relaciones para los tres tipos de fallas más comunes :

: falla normal $M_s = 0.809 + 1.341 \log L \dots (1)$

falla inversa $M_s = 2.021 + 1.142 \log L \dots (2)$

falla horizontal $M_s = 1.404 + 1.169 \log L \dots (3)$

donde M_s es la magnitud en función de las ondas de superficie y L es la longitud de ruptura en metros.

Para la aplicación de esta relación, una longitud de ruptura de la falla debe ser estimada ya sea por evidencias directas ó por evidencias indirectas. La longitud de ruptura ocurrida por sismos en el pasado puede constituir una evidencia directa; en ausencia de este tipo de evidencia existe formas indirectas de estimar la longitud de ruptura tales como las investigaciones geomorfológicas, que pueden identificar discontinuidades en la superficie de la falla a lo largo de su longitud y que pueden ser usados para segmentar la falla. Los segmentos individuales identificados en esta forma pueden representar segmentos de ruptura cuyas longitudes pueden ser usadas para calcular la magnitud.

Otro método indirecto para estimar la longitud de ruptura está basado en la suposición de que una fracción del total de la longitud de la falla se romperá durante un terremoto dado. Slemmons ha desarrollado un relación entre la longitud total y el porcentaje de ruptura para fallas horizontales importantes; esta relación sugiere que el porcentaje de ruptura decrece con el

crecimiento de la longitud total. El rango de porcentaje de ruptura de la longitud total es del 17 al 38% para longitudes totales entre 300 a 1300 kilómetros. Relaciones similares no han sido desarrolladas para fallas más cortas ó fallas de otro tipo (normal ó inversa). La práctica más común ha sido asumir que la mitad de la longitud de la falla puede ser la longitud de ruptura en un evento dado (Schwartz et al, 1984). Esta suposición propuesta por Wentworth y otros (1969) está basada en roturas de superficie observadas en el Sur de California; sin embargo los terremotos históricos en el norte de los Estados Unidos han sido asociados con superficies de ruptura en el rango del 2 al 75% de la longitud total de la falla.

Se aprecia pues que el rango de porcentajes de ruptura es muy disperso y siendo además dificultoso determinar la longitud total de la falla, este método indirecto - para estimar la longitud de ruptura solamente debería ser usado cuando no existan evidencias directas.

b) Area de Ruptura versus Magnitud :

Debido a que la energía liberada durante un terremoto está relacionada al tamaño de la superficie de ruptura de la fuente, el área de ruptura de la falla (definida como el producto de la longitud de ruptura por la profundidad del desplazamiento de la falla) está relacionada más cercanamente a la magnitud que la longitud de ruptura misma.

Para una longitud de ruptura dada, diferentes profundidades de falla pueden romperse dependiendo del tipo de falla.

La relación entre el área de ruptura y la magnitud desarrollada por Wyss (1979) para todo tipo de fallas es:

$$M_s = 4.15 + \text{Log } A \dots\dots\dots (4)$$

donde M_s es la magnitud en función de ondas superficiales y A es el área de superficie de ruptura de la falla en Km^2 .

c) Desplazamiento versus Magnitud :

El desplazamiento máximo observado ha sido también empíricamente relacionado con la magnitud de sismos históricos en fallas superficiales. Esta relación tiene particular interés porque varios estudios geológicos recientes han demostrado que los desplazamientos prehistóricos en una falla pueden ser medidos; estos valores de desplazamiento pueden entonces ser usados para estimar las magnitudes de terremotos.

La mayor incertidumbre en esta relación está asociada con la variabilidad en la calidad y uniformidad de las medidas del desplazamiento en el campo.

Las relaciones entre el máximo desplazamiento y la magnitud propuestas por Slemmons (1982) son :

$$\text{falla normal} \quad M_s = 6.668 + 0.750 \log D \quad (5)$$

$$\text{falla inversa} \quad M_s = 6.793 + 1.306 \log D \quad (6)$$

$$\text{falla horizontal:} \quad M_s = 6.974 + 0.804 \log D \quad (7)$$

donde M_s es la magnitud en función de ondas de superficie y D es el desplazamiento superficial máximo en metros.

d) Momento Sísmico versus Magnitud Momento

Debido a que las magnitudes de ondas de superficie (M_s) se saturan aproximadamente para el valor 7.5, el momento sísmico (M_o) es una mejor aproximación de medida del total de energía liberada durante terremotos grandes.

El momento sísmico representa la resistencia que ofrece el material por donde pasa la falla y que se puede cuantificar por la rigidez de la corteza terrestre. Su valor puede ser determinado directamente en base a la lectura de las ondas sísmicas de período largo, ó indirectamente, como una relación entre el desplazamiento y el área de ruptura de la falla mediante la expresión:

$$M_o = A \times D \times \mu \quad \dots\dots\dots (8)$$

donde. A ... área de ruptura superficial de la falla en cm^2 .

D ... promedio de desplazamiento de la falla en cms

μ ... rigidez de la corteza (usualmente tomado como $3 \times 10^6 \text{ dyn/cm}^2$)

Las relaciones entre el momento sísmico y la magnitud han sido derivados en base a la información sobre sismos ocurridos en diferentes partes del mundo. Kanamori

(1977) define una escala de magnitud, M_w , que no se satura para niveles altos de magnitud y es equivalente a la magnitud M_s en el rango de 6.0 a 8.0; M_w puede de esta forma ser considerada como continuación de la esca-la M_s para grandes terremotos. Para M_w mayores que 7.5 y M_s mayores que 5.0 pero menores que 7.5, Hanks y Kanamori (1979) definen una escala de magnitud momento M_w , la cual está relacionada al momento sísmico por la expresión :

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 10.7 \dots\dots\dots(9)$$

e) Razón de Desplazamiento (slip rate) versus Magnitud :

La posibilidad que la razón de desplazamiento a través de una falla sea proporcional al sismo máximo fue sugerida por Smith (1976). Smith relaciona los desplaza-mientos totales en el Holoceno y el área de la falla, con el momento sísmico total en la falla, y luego uti-liza relaciones empíricas entre el momento sísmico y la magnitud para estimar el terremoto máximo correspondiente.

Slemmons (1977) relaciona la razón de desplazamientos y el período de retorno, con la magnitud.

En la comparación de razones de desplazamiento y terremotos históricos máximos, se observó que un nivel máximo parece existir en las magnitudes máximas para una razón de desplazamiento dada en fallas horizontales. Tales razones de desplazamientos pueden proporcionar una pauta para estimar magnitudes máximas para estos casos.

Análisis preliminares indican una aparente correlación débil entre la magnitud y las razones de desplazamiento para fallas normales e inversas.

La relación siguiente para fallas horizontales fue desarrollada por Woodward-Clyde Consultants (1979)

$$M_s = 7.223 + 1.263 \log S \quad (10)$$

donde M_s es la magnitud en función de ondas de superficie y S es la razón de desplazamientos en mm/año.

5.6.1 OTRAS RELACIONES EMPIRICAS

a) Bonilla (1970) propone :

a1) relación entre el desplazamiento ó salto y magnitud sísmica en la escala de Richter

$$\log D = 0.57M - 3.39$$

$$\log D = 0.57M - 2.67$$

$$\log D = 0.57M - 4.11$$

Estas tres expresiones han sido ajustados para efectos orientativos, donde D es el salto en pies y M la magnitud Richter.

a2) relación entre el salto y la longitud de la falla

$$\log D = 0.86 \log L - 0.46$$

donde L es la longitud en millas y D el salto en pies.

b) El Grupo de Investigaciones de Fallas Activas en el Japón (1980) de la Universidad de Tokyo propone

b1) relación entre la magnitud (M) y la longitud total del sistema de fallas

$$\log L = 0.6M - 2.9$$

donde L está dado en Kms.

b2) relación entre el desplazamiento y la magnitud

$$\log D = 0.6M - 4.0$$

donde el desplazamiento D está dado en metros.

5.7 CARACTERISTICAS FISICAS DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

La falla de la Cordillera Blanca, definida como una falla normal activa, constituye la falla de mayor importancia dentro de los Andes en el norte del Perú. Esta falla fue estudiada por ELECTROPERU para determinar su influencia en los proyectos hidroenergéticos que se emplazan en la cuenca superior del río Santa, involucrada dentro de la zona de falla.

Dicha falla se extiende en el flanco occidental de la Cordillera Blanca (margen derecha del río Santa) en una longitud aproximada de 200 kilómetros, abarcando desde la localidad de Chiquián hasta la de Corongo, afectando depósitos inconsolidados geológicamente jóvenes (14,000-1500 años) de origen glacial, fluvio-glacial, lacustre, abanicos aluviales, etc.

La traza de la falla presenta dos sectores: el sector norte caracterizado por ser una traza casi continua y el sec

tor sur que es del tipo "echelón" (trazas individuales).

El rumbo de esta falla varía entre 25°N - 50°N , su buzamiento varía de 45° a 60° al SO y su desplazamiento tectónico vertical neto (DTVN) acumulativo varía de 7.5 a 30 metros.

En base a la distribución geométrica de su traza y al tipo de materiales que son afectadas, se han propuesto cuatro segmentos en toda la falla (De la Torre y Orihuela, - 1984)

- . segmento Chiquián - Pumapampa, de aproximadamente 25Kms
- . segmento Pumapampa - Pariac, de aproximadamente 42Kms
- . segmento Pariac - Santa Cruz, de aproximadamente 80Kms
- . segmento Santa Cruz - Corongo, de aproximadamente 50Kms

La traza de esta falla, así como los segmentos definidos son mostrados en la Figura 5.3 .

5.8 INVESTIGACIONES SOBRE LA ACTIVIDAD DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

Como parte del proyecto hidroenergético desarrollado por ELECTROPERU en la zona de la falla, la compañía consultora Woodward-Clyde realizó una evaluación del potencial de la falla de la Cordillera Blanca (1984). Basado en observaciones de campo tanto en el sector norte (en Pachma) como en el sector sur (en la Quebrada de Querococha) además de el reconocimiento de otras localidades a lo largo de la zona de falla, el reporte presenta conclusiones concernientes a los parámetros representativos de esta falla.

Las investigaciones de campo fueron realizadas a lo largo de la zona de falla entre el 14 y 29 de Octubre de 1983. Un segmento de 4 Kms de la falla ubicado en Pachma Bajo (sector norte de la falla) fue observado en detalle para evaluar las características geomórficas de la escarpa de falla y de las relaciones entre la falla y depósitos del Cuaternario.

Dos trincheras de exploración fueron excavadas para evaluar la recurrencia y el desplazamiento por evento y los perfiles topográficos de la escarpa de falla fueron confeccionados para medir las alturas de la escarpa. La falla fue observada también en la ruinas de Colcas.

El sector sur de la falla fue observada en morrenas a lo largo de la Quebrada de Jeulesh; en morrenas, depósitos fluviales y lacustres en la Quebrada de Querococha; en banicos y depósitos lacustres en la Quebrada de Uquián.

En la Quebrada de Querococha se excavaron trincheras a través de la escarpa y se confeccionaron perfiles topográficos para evaluar el desplazamiento tectónico acumulativo, desplazamiento por evento y la recurrencia sísmica. Además, perfiles de escarpas fueron realizados en la Quebrada Jeulesh, Quebrada Tuco y Quebrada Uquián.

Finalmente se tomaron muestras representativas para la determinación de sus edades (dataciones de radio-carbono).

5.9 RESULTADO DE LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS EN LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

a) Sobre los desplazamientos

Las investigaciones en el sector norte de la falla (Pachma) comprobaron la existencia de dos eventos (fallamientos). Las mediciones en la trinchera P-1 mostraron que los desplazamientos durante el más reciente evento (MRE) fue de 3 mts como mínimo y el desplazamiento más antiguo fue de 2.1 mts. En la trinchera P-2, el desplazamiento durante el MRE fue al menos de 2.2 mts y posiblemente mayor que 3.2 mts; el desplazamiento durante el evento más antiguo fue como mínimo de 2.3 mts.

Las investigaciones en el sector sur de la falla (Quebrada Querococha) comprobaron la existencia de varios eventos. Las mediciones en la trinchera Q-1 mostraron que el desplazamiento durante el MRE fue de aproximadamente 2 mts; el desplazamiento promedio para cada uno de los pasados tres eventos en este lugar fue de 2.5 mts. Además las evidencias geológicas y neotectónicas permiten estimar más de 2 ó 3 eventos adicionales. En la Quebrada de Querococha el número total de eventos detectados es de 5 a 7, con un desplazamiento promedio de 2 a 3 mts. por evento.

Estas observaciones en el sector norte y sur de la falla indican pues que desplazamientos en un rango de 2 a mayor que 3 mts son característicos en la zona de falla de la Cordillera Blanca y son esperados durante futuras fallas sísmicas superficiales.

b) Sobre el Período de Retorno

Observaciones geomorfológicas, perfiles topográficos de escarpas y trincheras en la Quebrada de Querococha (sector sur) sugieren que han ocurrido entre 5 y 7 eventos durante los últimos 13,000 a 14,000 años. Considerando la incertidumbre en el número de eventos y en la edad de los desplazamientos de las morrenas, el rango de los promedios de los períodos de recurrencia es estimado entre 1,900 a 2,800 años en esta localización, con un promedio preferencial de $2,350 \pm 450$ años.

En la zona de Pachma (sector norte) no fueron detectadas evidencias directas para el cálculo del período de retorno; pero las características geomorfológicas de la escarpa es típica de fallas normales existentes en otros lugares del mundo, donde los desplazamientos se repiten en un rango de 1,000 a 3,000 años. De esta manera, el período de retorno obtenido para la Quebrada de Querococha puede ser extrapolado para el segmento de la falla en Pachma.

c) Sobre el MRE (más reciente evento)

El evento más reciente ocurrido en el área de la falla del sector norte (Pachma) tiene una edad mínima comprendida entre 1,600 a 2,200 años. Esta edad es deducida por evaluación arqueológica, ya que ruinas pre-incaicas ubicadas directamente sobre la zona de falla y que tiene la edad arriba mencionada no han sido afectadas por

fallamientos.

En la Quebrada de Querococha, las dataciones ejecutadas por radiocarbono (Carbono 14) permiten concluir que el evento más reciente ha ocurrido entre 2,680 a 695 años antes del presente. Para este sitio las relaciones estratigráficas de campo sugieren una edad de 1,500 años para el tiempo transcurrido desde el último evento.

d) Sobre la Razón de Desplazamiento (Slip Rate)

En la Quebrada de Querococha esta razón de desplazamiento está basada en el desplazamiento de una morrena durante los pasados 13,000 años. En esta morrena la altura de la escarpa es de 25 metros pero el desplazamiento tectónico vertical neto es solamente de 12 a 15 mts. Estos valores acompañados de la incertidumbre en la edad de la morrena, da un valor de 0.86 a 1.1 mm/año (razón de desplazamiento) para los pasados 13,000 a 14,000 años.

Estos valores son consistentes con el desplazamiento promedio por evento y el número de eventos observados en este sector (5 a 7 eventos a razón de 2 a 3 metros por evento). Este valor es además consistente con los obtenidos para distintas fallas en el mundo.

Dado que el valor de 1 mm/año es considerado como el de mayor valor observado para fallas normales, el valor calculado para la Quebrada de Querococha es considerado representativo para toda la falla de la Cordillera Blan

ca.

e) Sobre la Longitud de Ruptura

Aunque las investigaciones presentes sobre la falla de la Cordillera Blanca no son suficientes para identificar en forma precisa su segmentación, los autores propusieron cinco posibles segmentos de ruptura.

En el sector sur de la falla identificaron dos segmentos; el primero de aproximadamente 35 kms que se extiende desde el sur de Chiquián hasta el norte de la Quebrada de Jeulesh y el segundo que se extiende desde 15 kms al sur de la Quebrada de Querococha hasta la latitud de la ciudad de Huaraz, abarcando una distancia de 45 kms aproximadamente.

En el sector norte de la falla no hay una base física para definir los segmentos. Una saliente en el recorrido de la falla que se presenta en el noroeste de Carhuaz y un cambio de rumbo de la falla de $N 50^{\circ}0$ a $N 10^{\circ}0$ en Colcas, permitiría distinguir tres posibles segmentos de ruptura, haciendo mención que se necesitarían estudios más precisos para corroborar estas consideraciones. De acuerdo a ello, el segmento Huaraz-Carhuaz tiene una longitud de 35 kms, el segmento Carhuaz-Colcas, 40 kms y el segmento Colcas-Corongo, mayor ó igual a 45 kms.

En resumen serían cinco posibles longitudes de ruptura que presentaría la falla de la Cordillera Blanca, va

riando desde los 35 kms hasta los 45 kms, pero como existe la posibilidad que la ruptura de un segmento durante un evento podría involucrar al segmento adyacente, la longitud de ruptura estimada por los autores sería de 85 kms.

5.9.1 ESTUDIOS DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA REALIZADA POR OTROS INVESTIGADORES

Yonekura y otros (1979) estudiaron también la falla de la Cordillera Blanca e hicieron estimaciones de algunos parámetros representativos de la falla.

Así podemos mencionar que estos autores estimaron una razón de desplazamiento (slip rate) de 2 a 3 mm/año basados en desplazamientos de morrenas en la Quebrada Querococha y Quebrada Tuco. Sugirieron además un posible sismo máximo de magnitud 8 para la falla, asumiendo una longitud de ruptura de 200 kms (toda la falla) con una profundidad focal de 40 kms.

5.10 GRADO DE ACTIVIDAD DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

En base a las investigaciones realizadas por la compañía consultora Woodward-Clyde (1984), la falla de la Cordillera Blanca resulta ser activa de acuerdo a los diferentes criterios dados por los distintos investigadores e instituciones sobre la actividad de una falla.

a) Según criterio de las diferentes organizaciones gubernamentales americanas

Estas organizaciones evalúan la actividad de una falla de acuerdo a la antigüedad del más reciente evento (MRE) ocurrido en el área.

De acuerdo a los estudios realizados, el MRE ocurrió - en el sector norte de la falla (en Pachma) con una edad mínima de 1,600 a 2,200 años. Esto clasifica a la falla de la Cordillera Blanca como activa bajo todos los criterios existentes (ver Tabla N° 5.2).

b) Según criterio de Cluff y otros (1972)

Estos autores establecen diferentes grados de actividad de una falla basados en evidencias históricas, sismológicas y geológicas.

De acuerdo a ello, la falla de la Cordillera Blanca ha sido considerada activa por evidencias geológicas y sismológicas (ver Tabla N° 5.3).

Como evidencias geológicas se puede mencionar la presencia de escarpas frescas de desplazamientos en depósitos cuaternarios recientes y la presencia de terrazas tectónicas erosivas.

Como evidencias sismológicas podemos mencionar que durante los años 1977 a 1979 se detectaron en la cuenca del río Santa sismos de hipocentros superficiales (12-13 kms) y magnitudes pequeñas (3.1-4.9), cuyos epicentros están aparentemente asociados a la falla; así tam

bién, existe información microsísmica registrada por una estación sísmica en Huaraz durante los años 1972 y 1973. Respecto a las evidencias históricas no se cuentan con informes confiables sobre fallamiento en superficie.

c) Según criterio de Slemmons (1977) y otros

Slemmons establece grados de actividad de acuerdo al valor de la razón de desplazamiento (slip rate).

La razón de desplazamiento de la falla de la Cordillera Blanca varía entre 0.086 a 0.11 cm/año, lo que la asigna a ser considerada falla activa clase A ó falla de actividad moderada clase B (ver Figura 5.2).

5.11 CALCULO DE LAS MAGNITUDES MAXIMAS PARA LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

El estudio realizado por la compañía consultora Woodward-Clyde (1984) sobre la falla de la Cordillera Blanca comprendió también el cálculo de las magnitudes máximas de acuerdo a las relaciones empíricas desarrolladas por diferentes autores y expuestas en el acápite 5.6 . Se han utilizado las cuatro relaciones más comunes: longitud de ruptura versus magnitud, área de ruptura versus magnitud, desplazamiento - versus magnitud y momento sísmico versus magnitud momento.

a) Longitud de Ruptura versus Magnitud

Considerando la longitud de ruptura mínima de 35 kms y la máxima de 85 kms y utilizando la expresión (1) para

fallas normales, obtenemos valores de magnitud M_s igual a 6.9 y 7.4 respectivamente.

b) Area de Ruptura versus Magnitud

Para determinar la profundidad de ruptura se consideró que los sismos ocurren a profundidades entre los 10 y 15 kms. Las inclinaciones observadas en las trincheras van de 60 a 70 grados hacia el Oeste y a lo largo del segmento de falla en Pachma se presenta una inclinación de 45 grados aproximadamente hacia el oeste. Estos valores son típicos de fallas normales y definen un razonable rango de inclinaciones para este análisis. Una profundidad de 10 kms y una inclinación de 60 grados da una profundidad vertical máxima de 21.2 kms.

Estos valores últimos multiplicados por las longitudes de ruptura determinadas (35 y 85 kms), se obtiene un área mínima de ruptura de 406 km² y una máxima de 1800

Con estos valores de área de ruptura y utilizando la expresión (4) obtenemos magnitudes M_s de 6.75 y 7.4

c) Desplazamiento versus Magnitud

Considerando desplazamientos de 2 y 3 mts y utilizando la expresión (5) para fallas normales obtenemos valores de magnitud M_s igual a 6.89 y 7.0 respectivamente.

d) Momento Sísmico versus Magnitud Momento

El área mínima de ruptura es 406 km² y el desplazamiento mínimo es de 2 mts; utilizando la expresión (8) resulta un momento sísmico de 2.31×10^{26} dyn/cm².

El área máxima de ruptura es 1800 km² y el desplazamiento máximo es de 3 mts; utilizando la expresión (8) resulta un momento sísmico de 1.6×10^{27} dyn/cm².

Con estos valores de momento sísmico y utilizando la expresión (9) obtenemos valores de magnitud momento de 6.87 y 7.4 para cada caso.

En resumen, se puede concluir que el rango de máximas magnitudes sísmicas máxima calculado para la falla de la Cordillera Blanca usando las diferentes relaciones empíricas es de 6.75 Ms a 7.4 Ms.

5.12 CONCLUSIONES

El estudio sobre las características de la falla de la Cordillera Blanca desarrollado en este capítulo, se ha basado casi en su integridad a los estudios realizados recientemente por la Compañía Consultora Woodward-Clyde (1984) para ELECTROPERU en su proyecto "Estudio Integral para el Aprovechamiento de la Cuenca del Río Santa".

Los estudios realizados por dicha compañía representan las más completas realizadas hasta ahora, cuyos resultados muestran que la falla de la Cordillera Blanca es altamente activa con período de retorno corto siendo ca -

paz de generar sismos de gran magnitud.

Las evidencias que han servido para evaluar la falla de la Cordillera Blanca han sido en su mayoría evidencias geológicas, tales como la presencia de escarpas frescas, de desplazamientos en depósitos cuaternarios recientes y presencia de terrazas tectónicas.

Entre los resultados más importantes de estas investigaciones se puede mencionar que desplazamientos del orden de 2 a 3 mts pueden ser esperados en el caso de fallas con ruptura en superficie a lo largo de todo el sistema de fallas activas de la Cordillera Blanca, con un rango del período de retorno estimado entre 1900 y 2800 años con un promedio esperado de 2350 ± 450 años. Sismos originados por esta falla podrán tener magnitudes (Ms) del orden de 6.75 y 7.4

Desde el punto de vista del aprovechamiento hidroenergético del río Santa, la actividad de la falla tiene efectos adversos para su ejecución, ya que encuadra dentro de los criterios usualmente utilizados en proyectos hidroeléctricos que indican que una falla con movimiento comprobado en los últimos 10,000 años no aconseja a ser cruzada por obras de ingeniería importantes.

Dado el grado de actividad de la falla de la Cordillera Blanca, es recomendable evaluar la falla como una fuente sismogénica con características propias de recurrencia y determinar el riesgo sísmico que representa en la zona.

TABLA N° 5.1

CRITERIOS PARA EL RECONOCIMIENTO DE UNA FALLA ACTIVA
(Cluff y Otros, 1972)

<u>Fuente de Datos</u>	<u>Criterios Específicos</u>
Geológicos	<p>Características geomórficas recientes tales como: escarpas de falla, facetas triangulares, graben de falla, colinas - desplazadas, superficies estriadas, cauces desplazados, depresiones alineadas, valles desplazados, laguna desplazada laderas desplazadas, depresiones desplazadas. Características en el terreno tales como: fisuras abiertas, huellas y surcos de tipo alargado, arroyos rejuvenecidos, plegaduras o pandeo de depósitos recientes, fallas escalonadas en echelon en depósitos aluviales, y trazas de fallas de superficie jóvenes.</p> <p>Usualmente una combinación de estas características es generada por movimientos de falla hasta la superficie.</p> <p>Los rasgos erosionales no son indicativos de fallas activas, pero pueden estar asociadas con algunas fallas activas. Los saltos estratigráficos de depósitos cuaternarios son indicativos de una falla activa.</p>
Sismológicos	<p>Sismos de gran magnitud y microsismos, los cuales bien localizados instrumentalmente, pueden indicar una falla activa. La ausencia de sismos, sin embargo, no asegura que una falla es inactiva.</p>
Históricos	<p>Manuscritos históricos, crónicas, diarios personales, y libros pueden describir sismos pasados, fallamiento en superficie, deslizamiento del terreno fisuras y otros fenómenos relacionados con sismos pasados. Usualmente para un sismo grande habrán varios informes en el registro histórico. Puede haber indicación de la evidencia de deslizamiento por falla o movimiento geodésicos..</p>

TABLA N° 5.2

CRITERIOS PARA LA DETERMINACION DE FALLAS ACTIVAS Y ULTIMO EVENTO DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA (Sector Pashma)

TIEMPO PRESENTE (CERO AÑOS)	COMISION DE ENERGIA ATOMICA DE LOS ESTADOS UNIDOS (N.R.C.)	U.S BUREAU OF RECLAMTION (U.S.B.R.)	U.S ARMY CORPS OF ENGINEERS (U.S.A.C.E.E.)	ESTADO DE CALIFORNIA
<p>FALLA CORDILLERA BLANCA</p> <p>ULTIMO EVENTO DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA</p> <p>1,600 a 2,200 años</p>	<p>1,600 - 2,200 años</p> <p>FALLA ACTIVA</p> <p>500,000 años*</p>	<p>FALLA ACTIVA</p> <p>100,000 años*</p> <p>FALLA INACTIVA</p>	<p>FALLA ACTIVA</p> <p>35,000 años*</p>	<p>FALLA ACTIVA</p> <p>10,000 años*</p> <p>POTENCIALMENTE ACTIVA</p> <p>3,000,000 años*</p> <p>FALLA INACTIVA</p>

* Indica que la falla tiene evidencias de por lo menos un movimiento en el período de años indicado.

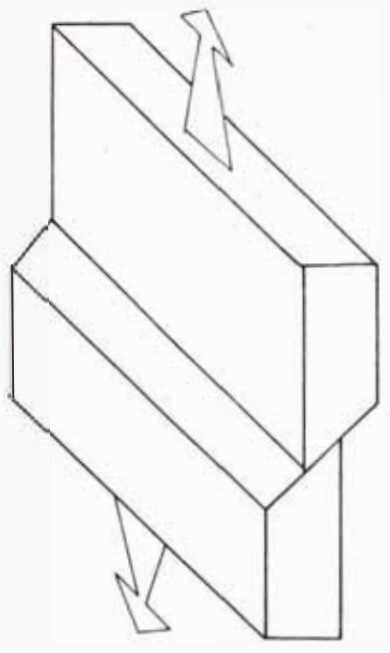
TABLA N° 5.3

CLASIFICACION DE FALLAS SEGUN SU ACTIVIDAD (Cluff y Otros 1972)

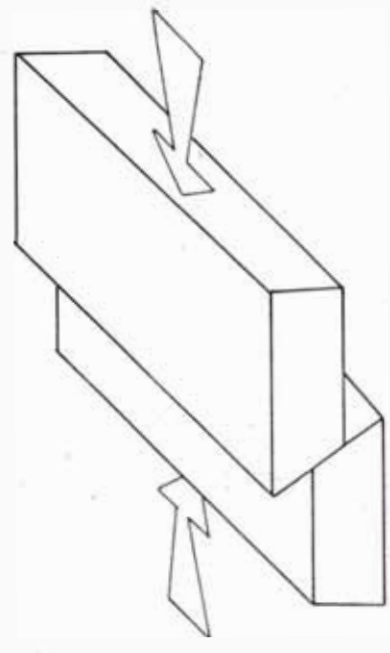
FALLAS EVIDENCIAS	ACTIVA	F.A C.B	POTENCIALMENTE ACTIVA	ACTIVIDAD INCIERTA	INACTIVA
Histórica	Fallamiento en la superficie asociados con sismos fuertes. Progresión de falla tectónica o indicaciones geodésicas del movimiento.	No	No hay informes confiables sobre fallamiento superficial - histórico		No hay actividad histórica.
Geológica	Depósitos generalmente jóvenes han sido desplazados o cortados por el fallamiento. Rasgos geomórficos frescos característicos de zonas de falla activa están presentes a lo largo de la traza de la falla.	No	Rasgos geomórficos característicos de zonas de falla activa están atenuados, erosionados y discontinuos	La información disponible no satisfice suficientes criterios para establecer la actividad de la falla.	Los rasgos geomórficos característicos de zonas con fallas activas no se encuentran presentes y existe evidencia geológica que indica que la falla no se ha desplazado en el pasado reciente.
Sismológica	Barreras físicas de agua subterránea en depósitos geológicamente jóvenes. Se asignan los epicentros sísmicos a fallas individuales con un alto grado de confianza.	Si	Barreras de agua se pueden encontrar en materiales más antiguos. El escenario geológico en el cual la relación geomórfica a fallas activas o potencialmente activas sugiere niveles superiores de actividad. Hay alineamiento de algunos epicentros sísmicos a lo largo de la traza de la falla, pero las localizaciones tienen un bajo grado de confianza.	Si la falla está cerca del sitio se hacen necesarios estudios adicionales	No se le reconoce como fuente de sismos.

F.A.C.B. = Falla Activa Cordillera Blanca!

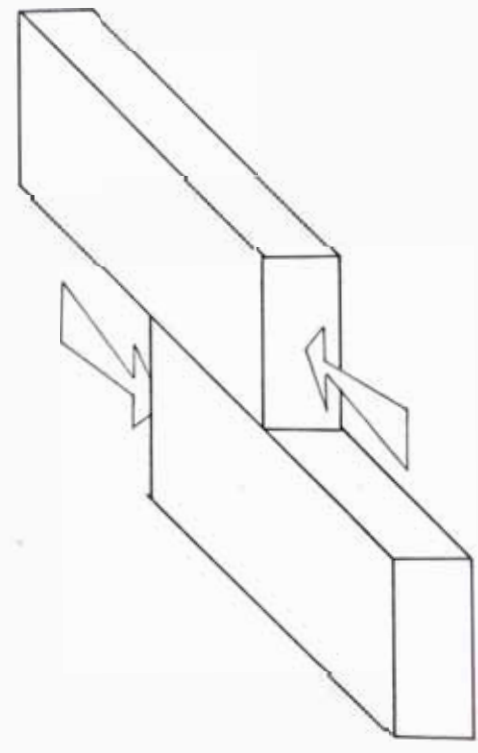
Fig. 5.1 Tipos de fallas según la dirección del deslizamiento



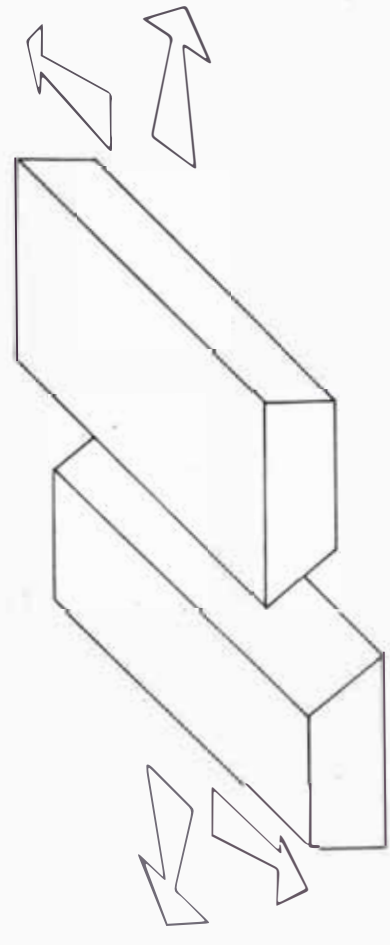
a) NORMAL



b) INVERSA

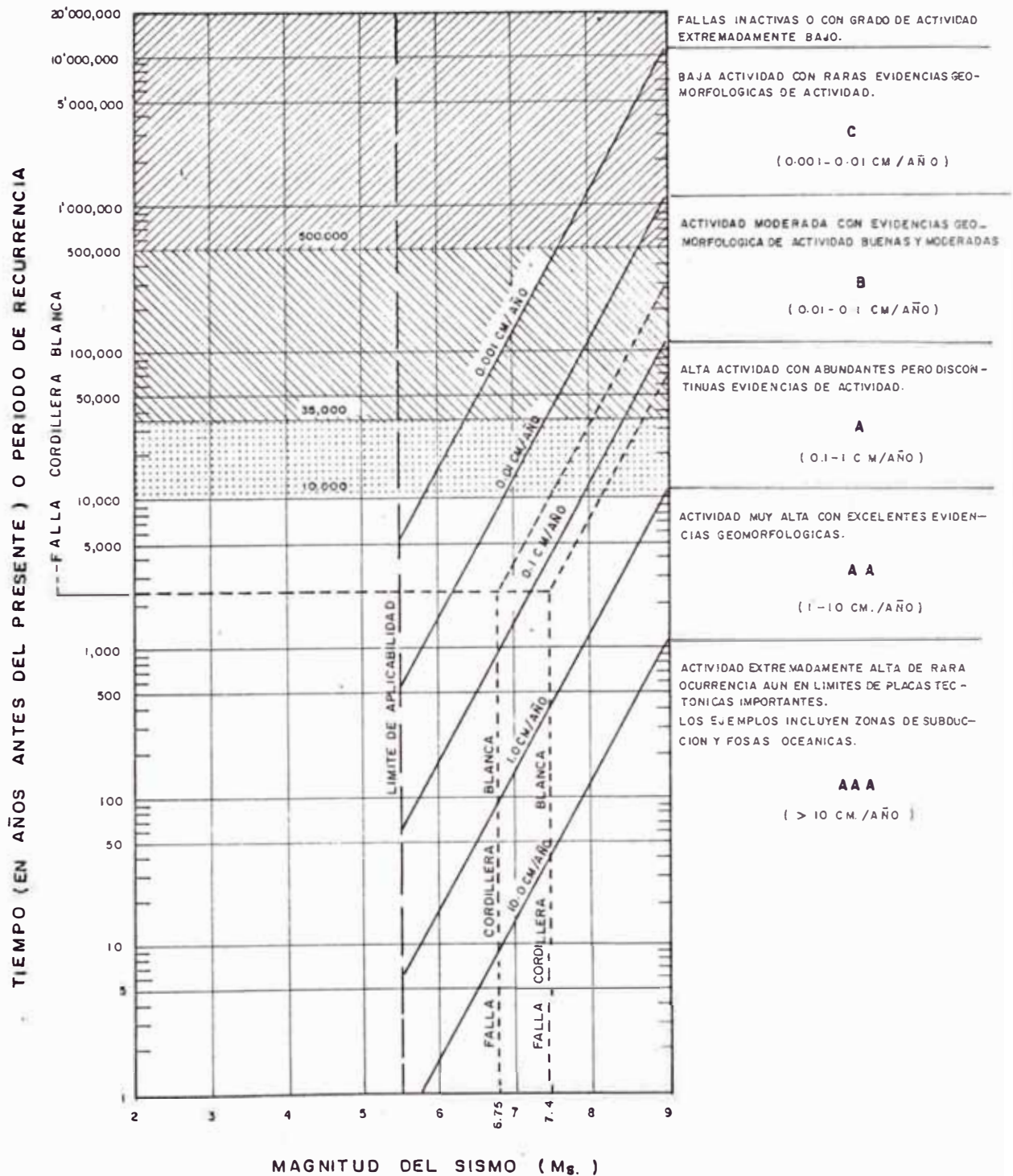


c) HORIZONTAL



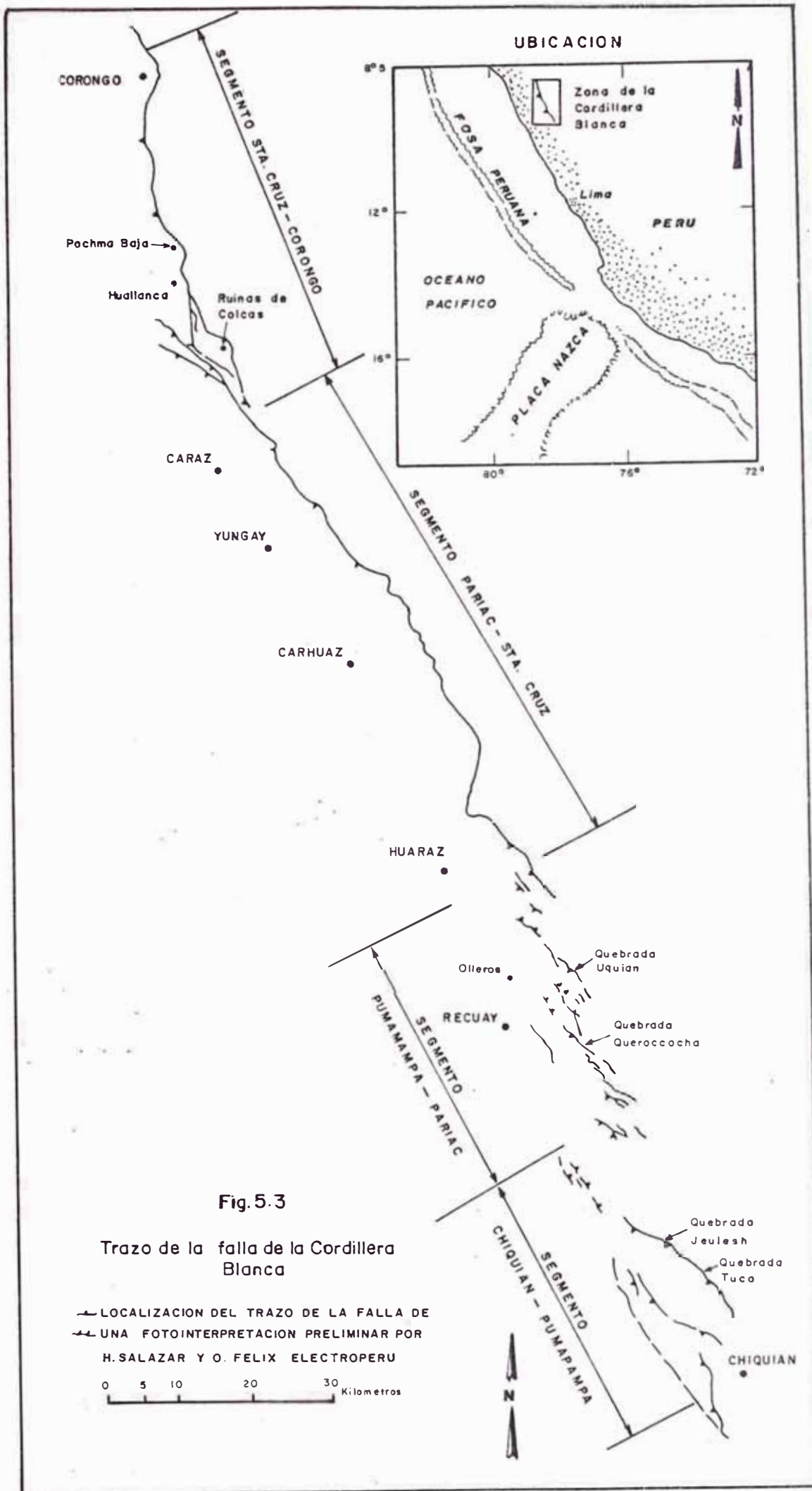
d) OBLICUA

FIGURA 5.2



Relación Magnitud del Sismo vs Periodo de Recurrencia vs Coeficiente de Desplazamiento (Slip-Rate) indicando valores para la Falla Cordillera Blanca. (Matsuda clasifica el grado de actividad por las letras en el lado derecho del diagrama : A, AA, etc).

(Stemmons, 1977)



CAPITULO VI

INFLUENCIA DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA EN EL RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE ANCASH

- 6.1 INTRODUCCION
- 6.2 PROGRAMA DE COMPUTO FRISK
- 6.3 EVALUACION DE LA FALLA DE LA CORDILLERA
BLANCA COMO FUENTE SISMOGENICA LINEAL
- 6.4 LONGITUD DE RUPTURA
- 6.5 LEY DE ATENUACION
- 6.6 EVALUACION DEL RIESGO SISMICO
- 6.7 CONCLUSIONES

6.1 INTRODUCCION

El presente capítulo tiene por finalidad evaluar la falla de la Cordillera Blanca como una fuente sismogénica lineal y determinar su efecto en los resultados del riesgo sísmico. Para evaluar el riesgo sísmico producido por fallas lineales, se ha utilizado el programa de cómputo FRISK(falla RISK) desarrollado por McGuire (1978).

El programa FRISK, al igual que el programa RISK, involucra la determinación de fuentes sismogénicas (fuentes lineales) con parámetros de recurrencia sísmica propias y de leyes de atenuación de la energía sísmica. De acuerdo a ello, la falla de la Cordillera Blanca ha sido delineada como una fuente lineal representada por un sólo segmento para toda su longitud; para la obtención de sus parámetros de recurrencia sísmica se ha seguido la misma metodología empleada en el capítulo IV para el análisis estadístico de las fuentes sismogénicas consideradas; la ley de atenuación de aceleraciones utilizada es la propuesta por McGuire (1974).

El riesgo sísmico fue evaluado para todo el departamento de Ancash, adicionalmente se evalúa el riesgo de las ciudades de Huaraz y Chimbote. Asimismo se determinó para estas mismas ciudades el riesgo sísmico total (debido a todas las fuentes sismogénicas con influencia en el lugar, incluyendo la falla de la Cordillera Blanca) sumando los valores obtenidos en el presente capítulo y los obtenidos en el capítulo IV.

6.2 PROGRAMA DE COMPUTO FRISK

El programa de cómputo FRISK (Falla RISK) realiza cálculos probabilísticos de riesgo sísmico para lugares afectados - por sismos que ocurren sobre fallas. Las fallas son definidas por el usuario como una serie de segmentos lineales, y la longitud de ruptura de la falla es definida como una función de la magnitud. El movimiento del terreno en el sitio estudiado es determinado usando la magnitud del sismo y la cercanía del sitio a la zona de ruptura.

Se ha reconocido actualmente que la longitud de ruptura de una falla es un parámetro de gran importancia en los cálculos de riesgo sísmico; dado ello, el programa considera este parámetro en su desarrollo. El programa toma también en cuenta importantes incertidumbres tales como: incertidumbre en las magnitudes de futuros sismos, en la posible máxima magnitud en una falla, en la localización de la zona de ruptura sobre la falla y en la intensidad en el lugar de interés dado el sismo, su tamaño, su longitud de ruptura y su localización en la falla.

6.2.1 FUNDAMENTO TEORICO

Métodos probabilísticos de análisis de riesgo sísmico han sido desarrollados y documentados en la década pasada (ver a Cornell, 1968, 1971; McGuire, 1974, 1976; Der Kiureghian, y Ang, 1975, 1977).

Para el desarrollo del programa FRISK, el término "falla"

se refiere a una zona definida en el lugar de ruptura de la corteza terrestre, el cual puede ser la fuente de futuros sismos; el término "ruptura" se refiere a la sección de la falla que se rompe durante un sismo específico. Las fallas son definidas como una serie de segmentos lineales conectados y los sismos ocurren aleatoriamente en cualquier lugar de estos segmentos. Las localizaciones, tamaños y otros parámetros de sucesivos sismos son mutuamente independientes.

El programa FRISK al igual que el RISK calcula la probabilidad que una específica intensidad sea excedida en el sitio de estudio ante la ocurrencia de un sismo. En general se hace extensivo el término intensidad a cualquier otra característica del movimiento del suelo tal como la aceleración máxima, el valor espectral de la velocidad, el valor espectral del desplazamiento, la intensidad en la escala Mercalli Modificada u otro parámetro. Este cálculo es realizado mediante la integración numérica del "Teorema de la Probabilidad Total". Específicamente, la probabilidad que una intensidad sea excedida dado un evento (de tamaño, longitud de ruptura y localización aleatoria) en una falla es :

$$P(\text{intensidad } z \text{ sea excedida}) = \iiint P[\text{intensidad } z \text{ sea excedida} / m, l_r(m), X] \cdot f_M(m) \cdot f_{L_r}(l_r) \cdot f_X(X) \cdot dm \cdot dl_r \cdot dx \dots (1)$$

donde: M es magnitud, L_r es la longitud de ruptura, y X indica localización de ruptura en la falla. Dado la localización y longitud de ruptura, la distancia más cercana

de la ruptura al sitio es calculada, y la probabilidad en la integral es evaluada. La integración sobre M , L_r y X da la probabilidad total que la intensidad z sea excedida ante un evento dado de L_r y X aleatorio. Para calcular el número de eventos esperados, esta probabilidad es multiplicada por la principal tasa activa para el tiempo de interés.

El número total de eventos esperados es calculado como la suma de los números esperados de cada falla; y el riesgo en el sitio para la intensidad z (esto es, la probabilidad que z sea excedido) es calculado según la relación de Poisson, mediante la expresión

$$\text{RISK}_z = 1 - e^{-\text{valor esperado}} \dots\dots (2)$$

El programa usa un intervalo truncado de distribución exponencial para la magnitud sísmica, una distribución lognormal para la longitud de ruptura dada la magnitud, una distribución uniforme para la localización de ruptura sobre la falla, y una distribución lognormal de la intensidad del sitio dada la magnitud del sismo y la distancia de la zona de ruptura al sitio de interés.

La distribución de magnitudes sísmicas en cada falla es modelada por una distribución exponencial truncada la cual es :

$$f_M(m) = k \beta e^{-(m-m_0)} \quad m_0 \leq m \leq M_1 \dots(3)$$

donde f_M es la función densidad de magnitud, m es la magnitud del sismo, m_0 y M_1 son las magnitudes mínima y máxima, β es la pendiente (Beta) y k es:

$$k = [1 - e^{-(M_1 - m_0)}]^{-1}$$

La longitud de ruptura de un sismo es una incertidumbre; la distribución de la longitud de ruptura es tomada logarítmicamente. El principal valor del logaritmo de la longitud de ruptura l_r es considerado como una función lineal de la magnitud :

$$\log_{10} l_r = a_1 - b_1 m \dots\dots\dots (4)$$

donde a_1 y b_1 son constantes. Este valor principal y la desviación standar $\sigma_{\log_{10} l_r}$ son suficiente para definir la distribución de la longitud de ruptura para una magnitud m .

La localización de la longitud de ruptura es asumida para que ocurra de igual forma en cualquier lugar de la falla. Computacionalmente, el centro de energía es definido como el punto sobre la longitud de ruptura equidistante de dos puntos extremos del segmento, y su localización es asumida a ser uniformemente distribuída en cualquier lugar de la falla excepto a $l_r/2$ de los extremos de la falla. Esta última restricción significa que la ruptura no puede pasarse del extremo de la falla. Es posible introducir suposiciones alternativas sobre localización de ruptura pero puede ser más fácil y más apropiado dividir la falla en varias fallas con diferentes tasas de actividad. Nótese sin embargo, que una longitud de falla no puede ser representado exactamente como varias fallas unidas de extremo a extremo, porque la ruptura no puede pasar el extremo de cada falla.

6.2.2 OPERACION DEL PROGRAMA

El programa FRISK, al igual que el RISK, evalúa numéricamente la integral de la ecuación (1) obteniendo para cada intensidad dada el número de eventos esperados (valor esperado) anuales en cada falla; el número total de eventos ó valores esperados que causan intensidad mayor que la especificada en el lugar de interés se obtiene de la sumatoria de los eventos esperados anuales de cada falla. Si este total es menor que 0.1, este número es aproximadamente igual al riesgo asociado con ese nivel de intensidad. El riesgo anual es finalmente calculado asumiendo que los sismos siguen la relación de Poisson (ecuación 2).

En el programa FRISK tanto el riesgo sísmico anual como el número de eventos esperados son resultados correspondientes a varias intensidades dadas. Adicionalmente, el programa calcula valores de intensidad para valores de riesgo deseados.

Estas intensidades son determinadas por interpolación utilizando los riesgos calculados (el siguiente más alto y el siguiente más bajo) y las intensidades asociadas. La interpolación es efectuada logarítmicamente tanto para las intensidades como para los riesgos ya que los riesgos usualmente decrecen casi linealmente con la intensidad cuando se plotean en papel logarítmico.

6.3 EVALUACION DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA COMO FUENTE SISMOGENICA LINEAL

Evaluar la falla de la Cordillera Blanca como una fuente sismogénica lineal equivale a determinar principalmente - sus parámetros de recurrencia sísmica: tasa de actividad sísmica (TASA) y de recurrencia (BETA), en base a los datos disponibles en un período observado. Involucra también la determinación de la profundidad focal.

Se definió primeramente la segmentación de la falla considerando la como un sólo segmento comprendido entre las coordenadas (8.54S , 78.05W) y (10.15S , 77.17W).

Para el análisis estadístico de recurrencia se han considerado la información proporcionada por dos fuentes :

a) Catálogo ECOSIS-UNI, 1984 :

Basados en los datos de este catálogo, se ha considerado en el período instrumental (sismos que ocurrieron a partir de 1963) sismos que posiblemente estén asociados con la falla de la Cordillera Blanca, correspondiendo a un período sísmico de 19.6 años. La relación de estos sismos se presenta en la Tabla N° 6.1 .

b) Informe de la compañía consultora Woodward-Clyde(1984):

Basado en los resultados obtenidos de los estudios realizados por esta consultora sobre las magnitudes máximas de la falla de la Cordillera Blanca y los períodos de retorno, se ha considerado un sismo histórico para el análisis estadístico :

. la magnitud máxima promedio de la falla es de 7.14 Ms
(6.87 \leq Ms $<$ 7.4).

. este sismo retorna aproximadamente cada 2,350 años.

Con los sismos instrumentales presentados en la Tabla N°6.1 y el sismo histórico determinado de investigaciones mismas en la falla, se realizó el análisis estadístico de recurrencia siguiendo la misma metodología empleada en el capítulo IV para la obtención de los parámetros de recurrencia. De acuerdo a la metodología, se ploteó en papel semilogarítmico la frecuencia acumulada de magnitudes versus la magnitud m_b y considerando como magnitud mínima de referencia $M_{bl}=4.6 m_b$, se ajustó la recta por el método de los mínimos cuadrados, obteniendo de esta forma los valores de a y b definidos anteriormente. Con estos valores y utilizando la relación de transformación de magnitudes M_s a M_b propuesta por Ordoñez (1984) se obtuvieron los parámetros a utilizarse en el programa de cómputo FRISK (BETA y RATA).

El ploteo de los datos, así como los resultados obtenidos son presentados en la Figura 6.1 .

La profundidad focal asignada a la falla se ha considerado de 30 kms, tomado como promedio de las profundidades de los sismos instrumentales considerados en el análisis estadístico.

6.4 LONGITUD DE RUPTURA

El programa FRISK considera en su desarrollo el parámetro de la longitud de ruptura de una falla, considerado actualmente como de gran importancia en los cálculos de riesgo sísmico.

Para el presente estudio se ha utilizado la relación propuesta por Slemmons (1982) para fallas normales, que es el caso de la falla de la Cordillera Blanca:

$$M_s = 0.809 + 1.341 \log L$$

donde M_s es la magnitud expresada en ondas superficiales, L es la longitud de ruptura de la falla en metros.

Como el programa FRISK considera la longitud de ruptura en kilómetros, la expresión anterior queda modificada a

$$M_s = 0.809 + 1.341 \log (L \times 10^3) \quad L \text{ en kms.}$$

despejando $\log L$ tenemos :

$$\log L = -3.603 + 0.746 M_s$$

Los datos de entrada para el FRISK serían

AL 2.397

BL 0.746

SIGL se consideró 0.65 (desviación standard)

6.5 LEY DE ATENUACION

Para evaluar las intensidades máximas, se ha utilizado la ley de atenuación para aceleraciones propuesta por Robin McGuire (1974) cuya expresión es la siguiente :

$$a = 472 \cdot 10^{0.28M} (R + 25)^{-1.3}$$

que expresada en forma logarítmica resulta :

$$\ln a = 6.156 + 0.64M - 1.30 \ln (R + 25)$$

donde

a aceleración en cm/seg^2

M magnitud M_s

R distancia hipocentral

De acuerdo a ello, los datos de la atenuación considerados para el programa FRISK son :

C1 6.156
C2 0.640
C3-1.300
RZERO..... 25
SIG 0.57 (desviación standard)

6.6 EVALUACION DEL RIESGO SISMICO

Con los parámetros de recurrencia obtenidos, la relación de longitud de ruptura y ley de atenuación presentadas, se evaluó el riesgo sísmico para todo el departamento de Ancash utilizando el programa de cómputo FRISK; el riesgo sísmico es sólo considerando la influencia de la falla de la Cordillera Blanca.

El riesgo sísmico anual es evaluado para todo el área de Ancash comprendida entre las coordenadas 76.8° a 78.6° de longitud oeste y entre 8.1° a 10.7° de latitud sur, usando intervalos de 0.2° tanto para la longitud como para la latitud ; con los valores obtenidos se confeccionaron mapas de isoaceleraciones para períodos de retorno de 30, 50 y 100 años. Estos mapas son presentados en los Planos 6.1, 6.2 y 6.3 respectivamente.

Adicionalmente se ha evaluado el riesgo sísmico de las ciudades de Huaraz y Chimbote; los resultados son mostrados en el Anexo 4 y los gráficos correspondientes de riesgo anual versus aceleraciones se muestran en la Figura 6.2 .

Finalmente se presenta en la Figura 6.3 el riesgo sísmico anual de las ciudades de Huaraz y Chimbote debido a todas las fuentes sismogénicas con influencia en el lugar, incluyendo la fuente lineal de

la falla de la Cordillera Blanca.

Estos gráficos resultan de adicionar los resultados obtenidos en este capítulo (debido sólo a la falla) a los obtenidos en el capítulo IV (debido a las otras fuentes).

6.7 CONCLUSIONES

- El riesgo sísmico debido a la falla de la Cordillera Blanca ha sido evaluado para todo el departamento de Ancash y para períodos de retorno de 30, 50 y 100 años con la finalidad de compatibilizar con los analizados en el capítulo IV. Asimismo se ha evaluado el riesgo sísmico para las ciudades de Huaraz y Chimbote.
- El potencial sísmico de la falla de la Cordillera Blanca no es significativo en el riesgo sísmico del departamento de Ancash, tal como se puede apreciar en los mapas presentados.
- Para la evaluación del riesgo sísmico, se ha considerado a la falla de la Cordillera Blanca como un sólo segmento en toda su longitud; ésto, debido a que no existe información suficiente para definir los segmentos de ruptura de esta falla y menos aún los datos para obtener los parámetros de recurrencia de cada uno de estos segmentos de ruptura.
- Los resultados del riesgo sísmico debido a la falla de la Cordillera Blanca muestran curvas de isoaceleraciones en forma elíptica con eje mayor coincidente con la traza

de la falla. Las aceleraciones máximas se concentran en la parte central de la falla y se van atenuando conforme se aleja a ambos lados de ella.

Para la determinación del riesgo sísmico total de las ciudades de Huaraz y Chimbote (debido a todas las fuentes sismogénicas incluyendo la falla) los valores obtenidos en el presente capítulo (FRISK) fueron adicionados numéricamente a los obtenidos en el capítulo IV (RISK).

TABLA N°6.1

SISMOS INSTRUMENTALES POSIBLEMENTE ASOCIADOS A LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

FUENTE: Catálogo de Hipocentros ECOSIS-UNI- 1984, Período Sísmico: 19.6 años

AÑO	FECHA		FUEN- TE	HORA		LUGAR		PROF. FOCAL	MAGNITUDES		
	MES	DIA		HORA	MIN.	SEG.	LATITUD		LONGITUD	Mb	Ms
1970	06	01	ISC	06	05	43.0	09°14'24" S	77°35'24" W	34	4.7	CGS
1970	06	01	ISC	06	11	55.4	09°09'36" S	77°32'24" W	45	4.7	CGS
1970	06	07	ISC	18	58	21.8	08°17'24" S	77°51'00" W	47	4.7	CGS
1970	09	03	ISC	09	02	32.1	08°48'00" S	78°12'00" W	65	4.2	ISC
1971	05	04	ISC	17	28	10.8	08°20'35" S	77°51'18" W	33	4.9	NEI
1973	02	28	ISC	13	36	40.9	08°59'53" S	77°29'28" W	36	4.8	NEI
1973	03	17	ISC	08	28	9.3	09°37'34" S	77°47'17" W	73	4.6	ISC
1973	10	23	ISC	14	20	55.9	08°30'22" S	78°02'02" W	72	4.8	NEI
1974	01	14	ISC	17	35	17.3	08°31'30" S	77°40'41" W	34	5.2	NEI
1976	10	17	ISC	03	58	39.3	09°56'31" S	77°29'13" W	33	4.9	ISC

Fig.6.1

Análisis de recurrencia sísmica para la falla de la Cordillera Blanca

(PERIODO SISMICO: 19.6 AÑOS)

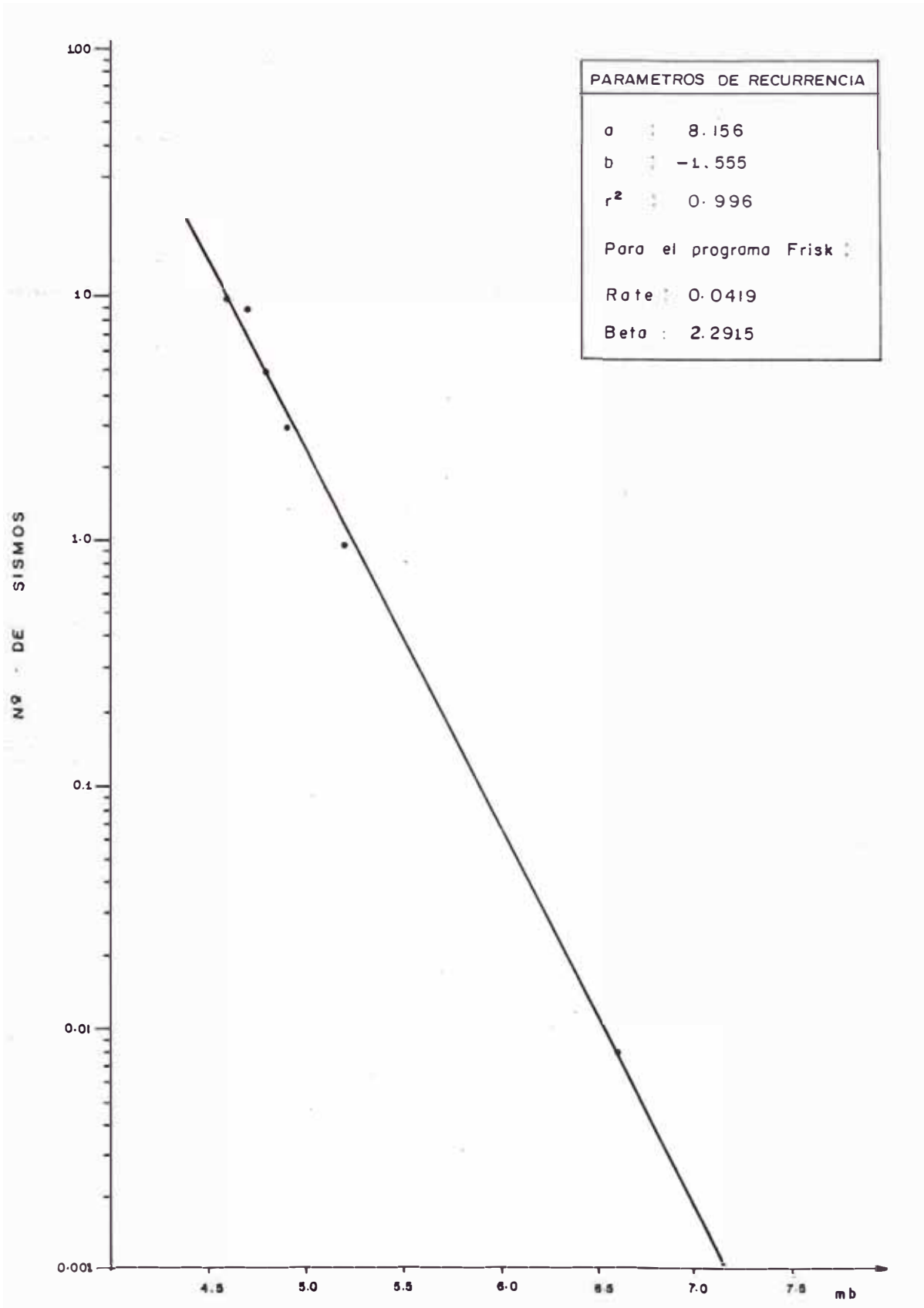


Fig. 6.2

RIESGO SISMICO ANUAL DEBIDO A LA INFLUENCIA DE LA FALLA DE LA CORDILLERA BLANCA

LUGAR : CIUDADES DE HUARAZ Y CHIMBOTE

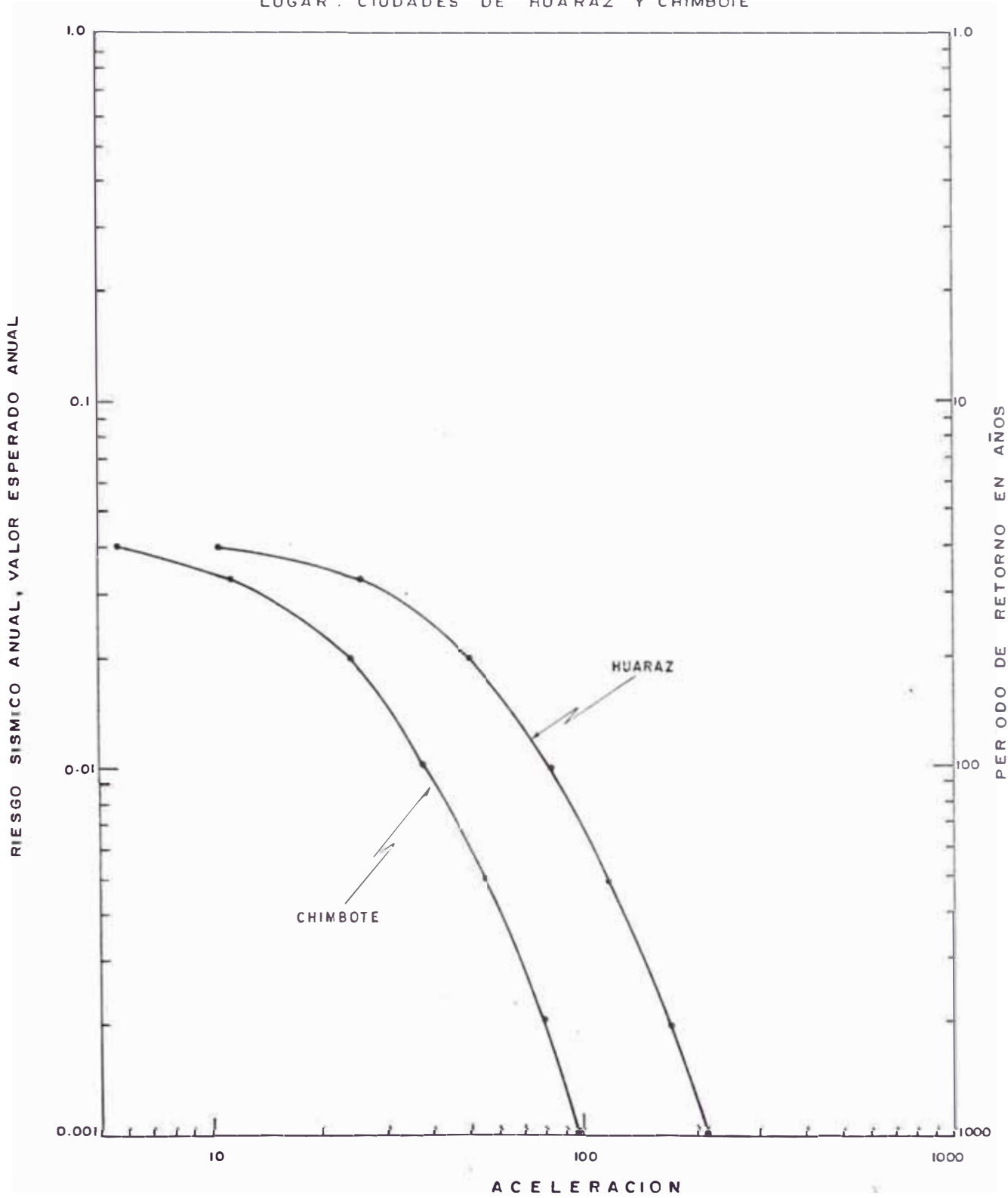
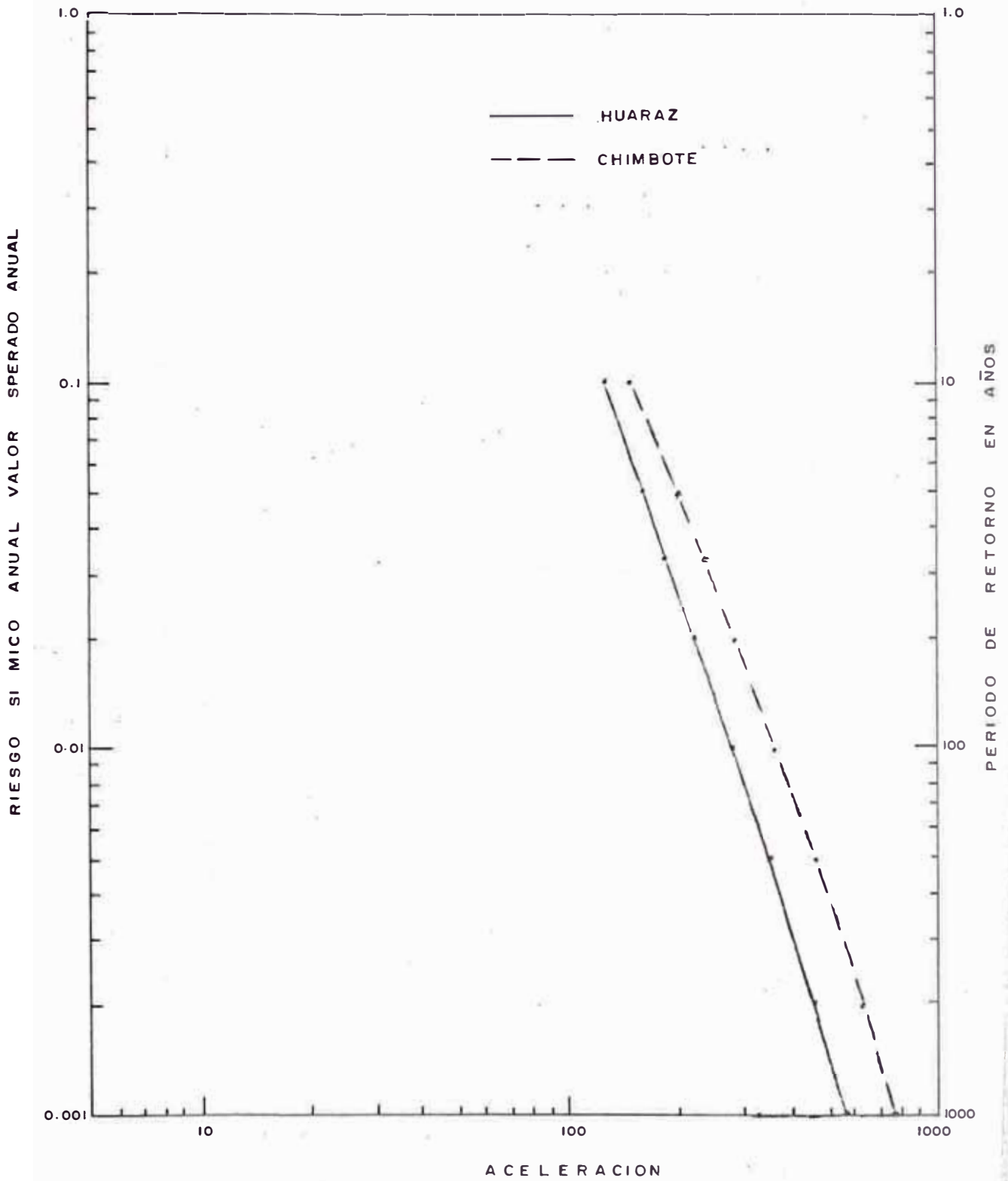


Fig. 6.3

RIESGO SISMICO ANUAL DEBIDO A LAS FUENTES SISMOGENICAS CON
INFLUENCIA EN EL LUGAR, INCLUYENDO LA FALLA DE LA CORDILLERA
BLANCA.
LUGAR : CIUDADES DE HUARAZ Y CHIMBOTE



CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 7.1 INTRODUCCION
- 7.2 CONCLUSIONES
- 7.3 RECOMENDACIONES

7.1 INTRODUCCION

La evaluación del riesgo o peligro sísmico de una zona en términos probabilísticos, es una de las formas más eficaces de diagnosticar la probable ocurrencia sísmica.

El departamento de Ancash, situado al norte del departamento de Lima, resulta ser una zona clave para el emplazamiento de obras civiles de importancia, destacando las estructuras de aprovechamiento hidroenergético y de irrigación, por lo cual un estudio de riesgo sísmico resulta indispensable.

En este capítulo se han resumido las conclusiones generales de este estudio; asimismo se indican algunas recomendaciones para trabajos futuros en esta materia.

7.2 CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos planteados para este estudio, las conclusiones principales son :

a) Sobre la Revisión de Catálogos Sísmicos

- No contamos con un catálogo sísmico único para el Perú, que puede servir de fuente de datos para la realización de estudios de sismicidad o riesgo. En este estudio se ha realizado un intento por elaborar un catálogo de hipocentros peruanos basados en la revisión efectuada a los catálogos sísmicos existentes (específicamente el de la NOAA). Este nuevo catálogo denominado "Catálogo

de Hipocentros Peruanos ECOSIS- UNI 1984", aunque no modifica sustancialmente los catálogos anteriores, presenta la ventaja de contener datos verificados y estar más actualizado.

La información proporcionada por los catálogos no es completa, por cuanto los sismos ocurridos hasta el año 1962 sólo tienen cálculos aproximados de sus parámetros, existiendo carencia de los parámetros focales más importantes tales como su magnitud en función de ondas de cuerpo (mb) y de la profundidad focal. Recién a partir de 1963 el cálculo de los sismos se hace más preciso, permitiendo conocer ya los valores de estos parámetros mencionados (magnitud mb y profundidad focal).

El catálogo de la NOAA, que fue revisado completamente como parte de este estudio, contiene en términos generales información consistente y las incorrecciones detectadas corresponden en su mayoría a los sismos históricos (los ocurridos antes del año 1963). Dado que los estudios de riesgo sísmico se basan en solo - datos instrumentales (información a partir del año 1963), este catálogo resulta competente para ser utilizado como fuente de datos.

- b) Sobre el Riesgo Sísmico del departamento de Ancash sin considerar la influencia de la Falla de la Cordillera Blanca:

Para evaluar el riesgo sísmico del departamento de An-

cash se ha utilizado como fuente de datos el catálogo de la NOAA corregido y utilizando datos a partir del año 1963 (período instrumental) correspondiendo a un período sísmico de 18.28 años. Adicionalmente se ha evaluado el riesgo **sísmico** utilizando el catálogo ECOSIS - UNI 1984, pero dado la similitud de los resultados, no se ha considerado necesario presentarlo en este estudio.

Los parámetros de recurrencia obtenidos en el presente estudio para las fuentes sismogénicas utilizadas de Casaverde y Vargas resultan ser más altos que los obtenidos por Casaverde y Vargas (1982). Esta diferencia no se debe principalmente a la cantidad de datos utilizados (aquellos autores utilizaron un catálogo con menor cantidad de sismos) sino a la interpretación de dichos datos en el análisis estadístico de las magnitudes.

Consecuentemente con lo anterior, los resultados de riesgo obtenidos en el presente estudio presentan valores más altos que aquellos utilizando los parámetros de Casaverde y Vargas (1982), aproximadamente un 10% más altos.

- Los resultados obtenidos muestran que el mayor peligro sísmico se presenta en la Costa y se va atenuando conforme se avanza hacia el Continente. Esto se debe a que la mayor actividad sísmica corresponde a la interacción de las placas de Nazca con la Sudamericana, representadas por las fuentes sismogénicas 1 y 2.

- La ley de atenuación constituye la mayor incertidumbre en el estudio del riesgo sísmico. La consistencia de ella depende de la cantidad y la calidad de los registros tomados por los acelerógrafos. Lamentablemente en el Perú pocos son los registros con que se cuenta, siendo la mayoría de ellas tomadas en Lima. La ley de atenuación utilizada en este estudio ha sido calibrada en base a estos pocos registros por lo que no constituye una ley representativa para la zona.

c) Sobre la influencia de la Falla de la Cordillera Blanca en el Riesgo Sísmico del departamento de Ancash:

- Este estudio constituye un primer intento para la modelación de fallas como fuentes sismogénicas lineales. La falla de la Cordillera Blanca, definida como una falla normal de alta actividad, constituye la falla de mayor importancia dentro de los Andes en el norte del Perú y su participación en el riesgo sísmico reflejará con mayor realismo el peligro sísmico que representa en la zona en estudio.
- La evaluación del potencial sísmico de la falla de la Cordillera Blanca fue realizado en base a los estudios que sobre ella realizó la consultora Woodward-Clyde (1984) para ELECTROPERU. Estos estudios, los más completos realizadas sobre fallas activas en el Perú, denotan la alta actividad que representa dicha falla, con período de recurrencia corto y capaz de generar sismos de gran magnitud.
- El efecto que causa la falla de la Cordillera Blanca en

el riesgo sísmico del departamento de Ancash no es tan significativo como se esperaba por cuanto su participación en el Callejón de Huaylas, (zona de emplazamiento de la falla, es sólo del orden del 4% del riesgo sísmico total (debido a todas las fuentes con influencia en el lugar) y en la Costa su participación puede considerarse nula.

El peligro que representa la falla de la Cordillera Blanca no está en las intensidades máximas que puede producir (para períodos de retorno relativamente cortos: 30, 50 y 100 años) sino en el peligro de fallamiento que puede ocurrir y dislocar cualquier estructura emplazada en su traza.

7.3 RECOMENDACIONES

Se debe hacer un esfuerzo en conjunto con las entidades pertinentes para la elaboración de un catálogo sísmico único para el Perú, cuya información servirá para los futuros estudios de sismicidad, riesgo sísmico y otros. Asimismo, el catálogo ECOSIS-UNI 1984 elaborado en la Universidad Nacional de Ingeniería puede ser actualizado con información más reciente hasta el año 1984.

Dada la gran incertidumbre que representa la atenuación en un estudio de riesgo sísmico, es recomendable que las leyes de atenuación utilizadas en el Perú sean reevaluadas. Estas leyes han sido calibradas con los pocos registros existentes y son atenuaciones isotrópicas, lo

cual no refleja la realidad en nuestro país en cuanto - existe anisotropía debido a la presencia de la Cordillera de los Andes. Se recomienda pues utilizar atenuaciones anisotrópicas para futuros estudios tomadas en base a una mayor distribución de acelerógrafos en el Perú.

De la modelación de la falla de la Cordillera Blanca como fuente sismogénica lineal, sería recomendable reevaluar las fuentes sismogénicas propuestas por Casaverde y Vargas; asimismo, dada la existencia de otras fallas en el Perú, se podría hacer estudios para intentar modelarlas. De esta manera se representaría en forma mas real el comportamiento sísmico de las distintas zonas del Perú.

Se recomienda intensificar el estudio de la falla de la Cordillera Blanca a fin de delinear con mayor precisión los posibles segmentos de ruptura que podrían presentarse. De esta forma, la modelación de la falla de la Cordillera Blanca estaría más de acuerdo con la realidad, pudiéndose determinar con mayor consistencia el peligro sísmico que dichos segmentos de ruptura de falla representaría para los proyectos de importancia a emplazarse en el lugar.