



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA

# RIESGO SISMICO

**RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE LIMA**

LUCIA CASAVARDE MENDEZ

**MONUMENTOS HISTORICOS Y RIESGO SISMICO (\*)**

JULIO VARGAS NEUMANN

(\*) TRABAJO PRESENTADO EN EL SEMINARIO SOBRE  
PROTECCION DE MONUMENTOS DE AREAS SISMICAS.  
ANTIGUA GUATEMALA, 1979

Publicación DI - 80 - 02

Serie: Difusión

Julio 1980



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA

# RIESGO SISMICO

**RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE LIMA**

LUCIA CASAVARDE MENDEZ

**MONUMENTOS HISTORICOS Y RIESGO SISMICO (\*)**

JULIO VARGAS NEUMANN

(\*) TRABAJO PRESENTADO EN EL SEMINARIO SOBRE  
PROTECCION DE MONUMENTOS DE AREAS SISMICAS.  
ANTIGUA GUATEMALA, 1979

Publicación DI - 80 - 02

Serie: Difusión

Julio 1980

## RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE LIMA

Lucía A. Casaverde Méndez

### INTRODUCCION

Es sabido que los sismos están entre los fenómenos naturales más destructivos y que traen consigo grandes saldos en pérdidas de vidas humanas y materiales que repercuten en la economía de los lugares afectados. Estos efectos son más severos en países que, como el nuestro, están en vías de desarrollo. De aquí surge la necesidad de minimizar los efectos catastróficos de estos fenómenos y uno de los aspectos más importantes se relacionan justamente con las Obras de Ingeniería, que son las más directamente afectadas por los sismos.

Este trabajo trata de proveer de los medios para efectuar el planeamiento y decisión en el diseño a través de las metodologías del riesgo sísmico. Esta técnica se utiliza con la finalidad de predecir estadísticamente las posibles aceleraciones que podrían ocurrir en un lugar determinado tomando en consideración los datos sísmicos acumulados y en base a las características tectónicas regionales y locales asociadas a la actividad sísmica.

Los valores de aceleración así obtenidos servirán como fundamento para los criterios de diseño sísmico. Básicamente dichas aceleraciones serán reducidas a información de cargas sísmicas, de tal manera que las estructuras diseñadas para estos niveles de cargas posean confiabilidad de protección de daños y una gran confiabilidad contra el colapso de la estructura.

El conocimiento del riesgo sísmico y la habilidad para diseñar de acuerdo a él, en la práctica, es tan importante como la predicción de un terremoto inminente.

Los resultados obtenidos, como en todo trabajo de este tipo, están en función directa de los datos utilizados. En el presente caso se ha usado la información que se dispone en el Instituto Geofísico del Perú. Si esta información es ampliada o mejorada, el modelo puede adaptarse y facilitar la inclusión de nuevos datos para actualizar los resultados.

## CAPITULO I

### ACTIVIDAD SISMICA DEL PERU

#### 1.1 *Características de Las Placas Tectónicas en el Perú y Sudamérica*

Los principales rasgos tectónicos de la región occidental de Sudamérica son las Cordillera de los Andes y la Fosa Oceánica Peru-Chile.

La mayor parte de la actividad tectónica del mundo: terremotos, volcanes y orogénias se concentran a lo largo de los bordes de las placas; la costa de América del Sur es uno de estos bordes.

La Placa Sudamericana, que es una parte de la Placa de las Américas, crece en la cadena meso-oceánica del Atlántico, avanzando hacia el noroeste (Wilson 1965) con una velocidad de 2 a 3 cm/año y se encuentra con la Placa Nazca en su extremo occidental que está constituido en la actualidad por la costa Sudamericana del Pacífico. La Placa Nazca crece en la cadena meso-oceánica del Pacífico Oriental, avanza hacia el Este con una velocidad de aproximadamente 5 a 10 cm/año y se consume por debajo de la Placa Sudamericana con una velocidad de convergencia de 7 a 12 cm/año. Como resultado del encuentro de las Placas Sudamericana y Nazca, y la subducción de la última, han sido formadas la cadena andina y la fosa Perú-Chile, en diferentes etapas de evolución.

El arco andino que comprende las montañas y la fosa, es un sistema vivo; es parte del "Anillo de Fuego" Circumpacífico. Los volcanes activos que se reparten por la cordillera y los devastadores terremotos, siempre nos recuerdan el hecho de que el proceso orogénico que dió origen a las cadenas montañosas andinas todavía sigue vivo en la actualidad.

#### 1.2 *Actividad Sísmica del Perú*

Es manifestación de un tectonismo profundo la fuerte actividad sísmica que se desarrolla a lo largo del gran sistema cordillerano en sus márgenes Pacífico y Oriental.

Los estudios de Gutenberg y Richter (1954) y las numerosas observaciones instrumentales obtenidas posteriormente (USCGS y IGP) nos permiten tener una mejor visión de la repartición de los focos sísmicos en territorio peruano.

Como se puede observar en el mapa de epicentros de los sismos del Perú (1900-1976) (Figura 1), se aprecian tres zonas de preponderante actividad sísmica:

Una zona paralela a toda la franja costera, que en la parte sur penetra al continente. Los sismos en esta zona son de profundidades menores de 100 Km.

La segunda zona se extiende a lo largo y al este del fallamiento subandino; en ellas los sismos son de profundidades variables.

Y la tercera zona se extiende al este de los Andes hacia territorio brasileño. Los sismos que se producen en esta zona son profundos (profundidades mayores de 500 Km).

Casi en su totalidad nuestros sismos son de origen tectónico, presentándose con mayor concentración en la costa, menor en la sierra y mucho menor en la selva.

Otros aspectos de la sismicidad que se observan (Berrocal 1976, Chávez 1975, Huaco 1973) son:

—Un sensible alineamiento de los epicentros de sismos destructores de diferentes magnitudes y profundidades que varían entre 60 y 300 Km.

—La distribución de epicentros en el norte y centro es más oceánica que en la parte sur, la cual es predominantemente continental.

—Se ha deducido que en la franja costera de alineamientos de epicentros fuertes hay mayor liberación de energía que en la franja subandina.

—Hay mayor cantidad de eventos sísmicos en el litoral que en el interior del país. Observándose una mayor concentración de sismos con profundidades mayores en 100 Km. en el interior del país.

—También se puede observar la existencia de zonas de alta actividad sísmica en contraste con zonas de actividad sísmica reducida.

La distribución de los focos sísmicos catalogados de acuerdo con su profundidad hizo postular a Benioff (1952) la existencia de un plano de falla que se inclina bajo el continente, donde los focos superficiales estarían ubicados en el lado oceánico y los profundos en el lado oriental. Sin embargo los focos de numerosos sismos destructivos ocurridos en el Perú (situados tierra adentro) escapan a esta regla general, lo cual hizo pensar que existen diferentes niveles donde tiene lugar la liberación de energía sísmica. Ocola (1966) usando el concepto área promedio de la liberación de energía sísmica ensayó el análisis de la distribución espacial de la actividad sísmica en el Perú, desde Enero 1947 a Julio 1963, encontrando tres diferentes zonas sísmicas

en el manto superior bajo los Andes Peruanos. La primera zona comprendida hasta los 300 Km. de profundidad, donde se concentra la mayor actividad sísmica; la segunda zona, donde no se registra actividad sísmica (300-500 Km. de profundidad). Y la tercera zona, con una gran actividad concentrada aproximadamente a 650 Km. de profundidad (su profundidad varía entre 550-700 Km.). (Ocola 1966)

## CAPITULO II

### SISMICIDAD DEL DEPARTAMENTO DE LIMA

Un estudio de sismicidad del área en análisis, comprendida entre las coordenadas: 8° y 17° de Latitud Sur y 71° y 81° de Longitud Oeste (Ver figura 2), otorga el medio necesario para estimar el riesgo sísmico existente en el Departamento de Lima. Para ello contamos con la sismicidad histórica y la sismicidad instrumental.

#### 2.1 *Sismicidad Histórica*

En nuestro país se tienen noticias de terremotos ocurridos desde la época del Incanato, según informaciones recogidas en las crónicas provenientes de la época de la Conquista. Los datos de sismos históricos con que se cuentan han sido recopilados por Silgado (1968), en una excelente y valiosa contribución al conocimiento de la historia sísmica de nuestro país.

Sin embargo "la información solamente descriptiva de los sismos históricos no permite utilizar los datos existentes bajo los conceptos modernos de sismicidad". (Silgado 1968, 1969).

#### 2.2 *Sismicidad Instrumental*

Considerando el desarrollo de la sismología, los datos existentes se pueden dividir en tres períodos bien definidos:

- 1) Período anterior a 1900: Datos históricos descriptivos de los sismos principales ocurridos cerca de centros poblados.
- 2) Período 1900–1962: Datos instrumentales con determinaciones aproximadas de los parámetros hipocentrales, que fueron mejorando a través de este período.
- 3) Período 1963–1975: Datos instrumentales con determinaciones más precisas de los parámetros hipocentrales.

Se puede decir que a la fecha contamos con datos de 76 años con cierto

grado de confiabilidad, y dentro de éstos con datos de 13 años con un grado mayor de confiabilidad. (Berrocal 1976, Berrocal y otros 1975, Huaco y otros 1973).

### 2.2.1. Fuentes de Datos

Los datos necesarios para el desarrollo del presente trabajo fueron extraídos del Catálogo de Sismos del Instituto Geofísico del Perú. Este catálogo ha sido confeccionado utilizando varias fuentes, entre las que se tienen: Los Boletines Sísmicos del International Seismological Summary (ISS), la compilación hecha por Gutenberg y Richter (1954) y la redeterminación de epicentros efectuada por el grupo sismológico del United States Coast and Geodetic Survey (ahora en el United States Geological Survey, USGS).

Debido a la imprecisión del control de tiempo y a la calidad precaria de los primeros sismógrafos, los hipocentros determinados con datos provenientes de los sismos ocurridos en las primeras décadas de este siglo fueron muy imprecisos. En otras palabras, hasta antes de 1960 la profundidad del foco sísmico era un parámetro poco controlado. En esta época sólo el 17% de los eventos tienen profundidad. Esta situación fue mejorando notablemente a medida que avanzaba este período, de modo que, a inicio de los años 60 el porcentaje de focos sísmicos sin determinación de profundidad es pequeño. La información sísmica entre 1960 y 1975 representa el 84%, lo que implica que el control de los parámetros hipocentrales es de alta calidad en la actualidad.

Un problema mayor representó la carencia de magnitudes para eventos importantes, en especial para el período anterior a 1960. Para algunos de estos eventos Huaco y otros 1973, Ocola y otros 1978, han determinado las magnitudes utilizando los sismogramas de las estaciones de Ñaña y Huancayo; sin embargo hay algunos sismos ocurridos antes de 1960 para los cuales no se tiene registro alguno.

Las aceleraciones que sufren las partículas del suelo constituyen un parámetro importante para su uso en la ingeniería sismo-resistente. Desafortunadamente, el país ha contado únicamente con un acelerógrafo que fue instalado por el U.S. Coast and Geodetical Survey en cooperación con el Instituto Geofísico del Perú y que operó en varios lugares de la capital a partir de 1944. En los últimos años el Instituto Geofísico del Perú ha adquirido seis acelerógrafos que están operando en diversos puntos del país. Algunas empresas privadas han adquirido acelerógrafos, o están en vías de hacerlo para sus obras. Todos estos instrumentos todavía son insuficientes para poder cubrir los lugares de importancia dentro de nuestro país.

Cualquier información sobre aceleración actualmente proviene de los registros obtenidos en Lima y Arequipa; siendo los únicos registros totalmente procesados los de Lima.

### 2.2.2 *Análisis de la Sismicidad Instrumental*

Los 876 eventos sísmicos ocurridos en el área total de estudio durante el período 1925-1975 podemos distribuirlos en dos períodos:

Período 1925-1962	220 sismos (38 años)
Período 1963-1975	656 sismos (13 años)

La mayor actividad sísmica aparente que se tiene en el segundo período, de solamente 13 años, es un resultado del avance tecnológico que ha experimentado la sismología en las últimas décadas y del mayor número de observatorios sismológicos que existen en la actualidad. Los 656 sismos correspondientes al período 1963-1975 no representan únicamente los sismos ocurridos con magnitudes mayores o iguales a 3.5. En la figura 3 podemos observar el número de sismos de acuerdo a un rango de magnitudes, en períodos de 10 años, indicando que entre 1961-1970 la actividad sísmica ha sido mayor. La tabla 1 presenta los sismos más grandes y destructores que han afectado la zona en estudio durante el período 1925-1975.

## CAPITULO III

### RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE LIMA

La generación de sismos está relacionada con los mecanismos geotectónicos. El tiempo, intensidad y situación de la ocurrencia de futuros sismos no puede hasta la fecha ser pronosticada en una forma determinística. En consecuencia la generación de sismos en espacio y tiempo, cae en la categoría general de procesos estocásticos.

Por lo expuesto, en base a datos pasados, la predicción de eventos futuros puede ser realizada por medio de modelos estadísticos, los cuales se usan para simular la ocurrencia de sismos generados en el tiempo. En el presente estudio se utiliza el Modelo de Poisson que es hoy el modelo de ocurrencias de sismos más utilizado.

#### 3.1 *Técnica para el cálculo probabilístico del riesgo sísmico*

La técnica general utilizada en el presente trabajo es en esencia la misma que fuera presentada por Cornell (1968) y que fue aplicada por Algermissen y Perkins (1972) en el estudio de Utah y Arizona; Shah y colaboradores (1975) la usaron en el análisis del riesgo sísmico de Nicaragua; también fue

aplicada por Oliveira (1974) y otros investigadores.

Como se tiene por finalidad lograr un mapa probabilístico de aceleraciones máximas para el área de estudio, el trabajo se ha estructurado de la siguiente forma:

- 1) Delineación de las Fuentes Sísmicas;
- 2) Análisis estadístico de cada Fuente Sísmica: Relaciones de Recurrencia;
- 3) Atenuación de la Energía Sísmica; y
- 4) Cálculo de la Distribución de la Probabilidad Acumulada Extrema de la Aceleración,  $F_{\max}(t(a))$ , para un tiempo  $t$  a fin de hallar las aceleraciones máximas para la confección de los mapas respectivos.

### *3.1.1. Delineación de las Fuentes Sísmicas para el departamento de Lima.*

Debido a que la tierra no es homogénea, las propiedades elásticas de las superficies de contacto a lo largo de los bordes de las placas cambian de una zona a otra; y como una respuesta a la expansión del Suelo Oceánico las deformaciones variarán a lo largo de los bordes de las placas.

La distribución de epicentros de la figura 1, conjuntamente con algunas características tectónicas del área total en estudio, nos ha permitido identificar cinco zonas que aparentan tener características sismotectónicas particulares, y cuyas respectivas actividades sísmicas pueden influir, en diferente forma, en el riesgo sísmico de la zona de interés del presente trabajo: El Departamento de Lima. (Ver figura 4).

El principio general usado en la delimitación de las zonas sísmicas presupone que las ocurrencias sísmicas futuras en una región tendrán el mismo promedio de ocurrencias que el de los sismos del pasado en la misma región. Además supone que la ocurrencia de futuros sismos puede darse sobre un área más extensa que la indicada por los datos históricos.

### *3.1.2. Relaciones de recurrencia para el Departamento de Lima*

Para evaluar el riesgo sísmico de una zona dada es necesario contar con una estimación del número de sismos que se puede esperar en un área determinada o fuente sísmica; para lo cual es imprescindible examinar toda la información posible. Esta estimación se hace mediante la relación de Gutenberg y Richter (1966).<sup>c</sup>

La figura 5 incluye las cinco rectas correspondientes a cada fuente, que representan la distribución promedio de  $\log N$  versus  $M$ , ajustadas por mínimos cuadrados y que están expresadas por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Fuente 1: } \log N = 2.833 - 0.358M \quad (2)$$

$$\text{Fuente 2: } \log N = 2.963 - 0.345M \quad (3)$$

$$\text{Fuente 3: } \log N = 1.989 - 0.289M \quad (4)$$

$$\text{Fuente 4: } \log N = 2.736 - 0.379M \quad (5)$$

$$\text{Fuente 5: } \log N = 1.413 - 0.204M \quad (6)$$

Donde:  $N$ , es el número de sismos de magnitud  $M$  que han ocurrido en un área determinada y en un determinado período unitario de tiempo;  $a$  y  $b$  son constantes que dependen de la región; y se calculan por medio del método de los mínimos cuadrados.

(Esteva 1970, Oliveira 1974, Shah y otros 1975)

Estas ecuaciones corresponden a un período de tiempo de 51 años (1925-1975) (No se han considerado réplicas). (Tabla 2).

Se observa dispersión en los puntos correspondientes a sismos con magnitud mayor de 6.0, y esta es consecuencia de la imprecisión que se tiene en la determinación de la magnitud de sismos grandes, la cual a su vez se debe a la complejidad del mecanismo que gobierna dichos eventos, así como fenómenos peculiares de multiplicidad de eventos, que producen valores de  $M_S$  muy elevados, los cuales eran los únicos determinados antes de 1963. (Figura 6).

Las rectas de la figura 5 muestran la más alta sismicidad en la fuente 2, conforme se puede observar en los mapas de sismicidad, siguiéndole en orden decreciente la fuentes 1, 4, 3 y 5.

Luego de haber observado las relaciones estadísticas frecuencia-magnitud, analizaremos el período de retorno que tienen los eventos de magnitudes iguales a cierto valor.

Considerando al relación simple entre frecuencia y período, se tiene que el período medio de retorno en años ( $R$ ) para un valor determinado de  $M_B$  es igual a:

$$R = \frac{1}{N} \quad (7)$$

La relación de recurrencia para el área total en estudio (Ver figura 6) es la siguiente:

$$\log N = 3.611 - 0.397M \quad (8)$$

Analizando el período de retorno para esta área se observa que se ajusta mejor a los datos observados en la realidad hasta sismos con magnitud 6.6. Un sismo de magnitud  $MB = 6.6$  tiene un período medio de retorno de aproximadamente 5 años en el área total de estudio, y sismos de  $MB = 6.3$  tienen un período medio de retorno de 4 años en la misma área. Para sismos con magnitudes mayores los períodos medios de retorno que se obtienen a partir de la relación de recurrencia (8) y de (7) son menores que los observados en la realidad.

El análisis que se acaba de efectuar sugiere que los resultados obtenidos pueden ser considerados como válidos hasta sismos con  $MB = 6.6$ . La dificultad de extender estos resultados para sismos con  $MB$  mayores de 6.6 radica en la escasez de dichos eventos en el área de estudio en el período relativamente corto de 51 años que se ha considerado. Otra razón es la dificultad de asignar los valores de magnitud a los sismos mayores, esto ocurrió en las primeras décadas del período considerado. Así como también la controversia existente con el propio concepto de magnitud sísmica lo cual no permite hacer una transferencia normalizada de los datos de magnitud existentes en  $MS$  a  $MB$ . Hay que tener en cuenta también que muchos sismos ocurridos en los primeros años del período en estudio no tienen calculada su magnitud.

En la tabla 3 se presenta el número de sismos con magnitud mayor de 6.0 que han ocurrido en cada una de las cinco fuentes sísmicas durante el período 1925-1975; de acuerdo a ella se confirma la inferencia de una mayor actividad sísmica en las fuentes 2 y 1 en las futuras décadas con relación a las otras fuentes del área total en estudio.

### 3.1.3. *Relación de Atenuación de la Energía Sísmica para el Departamento de Lima.*

La atenuación de la energía sísmica es un factor muy importante en el análisis del riesgo sísmico. En Ingeniería Civil es mejor hablar de atenuación en términos de aceleración y es materia del presente trabajo buscar una relación que nos represente la atenuación de la aceleración con la distancia.

La expresión generalizada que establece la atenuación de la energía sísmica es de la forma:

$$\ln a = c_1 + c_2 M + c_3 \ln(\Delta + 25) \quad (9)$$

Donde:

$a$ , es la aceleración máxima que puede producir un sismo (o/o g);

$M$ , es la magnitud de un sismo ( $MB$ )

$\Delta$ , es la distancia epicentral en Kilómetros

$c_1$ ,  $c_2$  y  $c_3$ , son constantes que dependen de los datos de la región y que se determinan mediante un ajuste de mínimos cuadrados.

Expresiones de este tipo fueron desarrolladas por Esteva (Newmark 1968) para sismos en suelo firme tomando como base una relación propuesta por A.J. Hendron Jr.

Cabe mencionar que dada la escasez de datos se ha partido de una expresión matemática propuesta para sismos propios del Sistema de Fallas de San Andrés. Es así como en la fórmula la profundidad promedio es 25 Km. (no adecuada para nuestra región).

Utilizando los datos de la región con que se cuenta (Tabla 4) y realizando el ajuste de mínimos cuadrados (la curva es promedio) se obtuvo la relación de atenuación promedio de la aceleración siguiente: (Ver figura 7).

$$\ln a = 0.82 M - 2.91 - 1.00 \ln (\Delta + 25) \quad (10)$$

que expresada en otra forma es:  
donde "a" está en  $\text{cm}/\text{seg}^2$ .

Esta relación es probablemente adecuada para distancias epicentrales moderadas y grandes, aunque al dispersión en este rango es alto. (Ver figura 8).

Es muy difícil fijar un límite superior para la aceleración en el foco, debido a que no se cuenta con datos de este tipo. Housner (1965), luego de admitir que el mecanismo de origen de los sismos es siempre una falla, concluyó que la máxima aceleración no puede exceder a 0.5 g (siendo g la aceleración de la gravedad). Este límite no es general y puede llegar a ser mayor. En general es posible que la aceleración focal varíe con la magnitud del sismo.

En la figura 9 se puede observar diferentes curvas de atenuación obtenidas por Ocola (1977) y Huaco (1978). Como se puede ver la curva 10 obtenida en el presente estudio se halla comprendida entre las dos curvas de atenuación para el Perú mencionadas anteriormente.

A medida que se obtenga mayor información se podrá mejorar la relación obtenida en el presente estudio.

3.1.4 *Cálculo de la Distribución de Probabilidades Acumuladas Extremas de Aceleración,  $F_{\max t}(a)$ , para un tiempo de estudio  $t$  – Período de Retorno. – Cálculo de Aceleraciones Máximas para la elaboración del Mapa de Riesgo Sísmico del Departamento de Lima.*

Para el cálculo de la distribución de probabilidades acumuladas extremas de aceleración,  $F_{\max t}(a)$ , Algermissen (1973) ha considerado que la distribución espacial de ocurrencia de sismos es uniforme en toda la fuente y dividió cada fuente en  $n$  subfuentes (siendo  $n = 42, 74, 22, 21$  y  $12$  para las fuentes 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente), luego procede a calcular el número probable de sismos ( $f$ ) que pueden ocurrir en cada una de ellas para un cierto rango de magnitud  $\Delta M$ .

Si,  $N\Delta M$  es el número probable de sismos que pueden ocurrir para un cierto rango de magnitud  $\Delta M$  que se calcula a partir de las Relaciones de Recurrencia de cada fuente, se tiene que:

$$f = \frac{\Delta M}{n} \quad (11)$$

Una vez conocida la distribución espacial de ocurrencias de sismos en cada fuente se puede calcular su efecto en cada subárea del Departamento de Lima, utilizando para ello la relación de atenuación de la aceleración (9).

El paso siguiente es el cálculo de la distribución de la aceleración,  $F(a)$ , en cada subárea de la zona en estudio. Sean:  $a$ , la aceleración máxima producida por un sismo;  $F(a)$ , la probabilidad que una aceleración  $A$  sea menor o igual que  $a$ , dado que ha ocurrido un sismo de magnitud  $M$  mayor que la magnitud mínima de interés,  $M_{\min}$ , se tiene entonces lo siguiente:

$$\begin{aligned} F(a) &= P[A \leq a / M \geq M_{\min}] \\ &= \frac{\text{N}^\circ \text{ de ocurrencias esperado, con } A \leq a \text{ y } M \geq M_{\min}}{\text{N}^\circ \text{ de ocurrencias total esperado, con } M \geq M_{\min}} \quad (12) \end{aligned}$$

En nuestro caso  $M_{\min} = 4.0$

A partir de esta distribución es posible determinar la distribución de la probabilidad acumulada extrema de aceleración,  $F_{\max t}(a)$ :

$$\begin{aligned} F_{\max}(a) &= P[\text{la máxima de las "n" aceleraciones sea menor o igual que } a] \\ &= P[\text{cada una de las "n" aceleraciones sea menor o igual que } a] \\ &= e \end{aligned}$$

Como  $\lambda = \phi$  es la razón de ocurrencias de sismos de  $M \geq M_{\min}$  por año y  $t$  es el número de años en un período de interés en el estudio, tenemos:

$$F_{\max t}(a) = e - \phi t [1 - F(a)] \quad (13b)$$

Que es una distribución de valores extremos de Gumbel (Tipo 1).

El hallar  $F_{\max}$  como distribución de valores extremos ha sido utilizada para cálculos de riesgo sísmico en U.S.A. y otros países, sin embargo, la falta de información al definir las curvas de atenuación y el no considerar la variación propia de esta función pueden ocasionar fuertes alteraciones de los resultados finales. (Esteva).

#### CAPITULO IV

##### RESULTADOS DEL ANALISIS DEL RIESGO SISMICO DEL DEPARTAMENTO DE LIMA

Los resultados obtenidos con este primer estudio de Riesgo Sísmico son:

- Las zonas de mayor influencia en el riesgo sísmico del área en estudio son, en orden de importancia, las fuentes 2, 1, 4, 3 y 5 (ver figura 5).
- Para el Departamento de Lima se confeccionaron dos mapas de aceleraciones en suelo firme: uno para aceleraciones con un 80% de probabilidad de no ser excedidas en 50 años (figura 13) y el otro para aceleraciones con un período de retorno medio de 50 años (figura 14).

En el primer mapa se puede observar que los niveles de aceleración varían de 0.18g a 0.38g. Y en el segundo mapa los niveles de aceleración varían entre 0.12g y 0.19g. En Lima Metropolitana el máximo nivel de aceleración con un 80% de probabilidad de no ser excedida en 50 años es 0.27g y el máximo nivel de aceleración con un período de retorno medio de 50 años es 0.15g.

- Los sismos muy grandes con períodos de recurrencia muy largos no pueden ser estimados sólo con la sismicidad histórica, ya que ella es muy limitada.

La probabilidad de exedencia asociada con estos eventos poco frecuentes es pequeña y para propósitos de ingeniería puede ser importante o no, dependiendo tal importancia de los riesgos aceptables. Así para el caso de plantas nucleares, reservorios con pendiente inestable, etc., sólo son tolerables riesgos muy pequeños y un gran intervalo de recurrencia de sismos deberá definir el diseño. Para el caso de viviendas, estructuras comerciales, etc., los intervalos de recurrencia cortos de sismos definirán el diseño y en

este caso el registro histórico es importante.

- Las aceleraciones en áreas de sismicidad alta con ocurrencias de sismos de grandes magnitudes, dependerán de la naturaleza de las curvas de atenuación. Cambios en la atenuación para movimientos grandes a pequeñas distancias tendrán un efecto considerable en el peligro de estas áreas. Por ello debe tenerse en cuenta que la curva de atenuación utilizada en el presente estudio tiene dispersión con los datos de la región. Se recomienda incluir la variación de las curvas de atenuación en estudios posteriores.
  
- Un solo parámetro, como es el estimado probabilístico de máximas aceleraciones, obviamente no provee de toda la información necesaria para describir las características del movimiento del suelo; sin embargo, un gran número de estructuras pueden y han sido diseñadas para ser resistentes usando las aceleraciones máximas como dato básico del movimiento del suelo. Hay que tener en consideración que los mapas presentados indican una idea relativa del riesgo sísmico y que los niveles de aceleración en los mismos corresponden a suelo firme.
  
- Se debe tener en cuenta también que el tratamiento estadístico que se ha efectuado con los datos existentes está afectado por la heterogeneidad de los mismos, pues en el estudio se consideró todo el período de sismicidad instrumental. En el caso de haber considerado únicamente los datos a partir de 1963 se hubiera visto afectado por la escasez de los mismos. Vemos pues que los resultados obtenidos en este trabajo no son definitivos y pueden ser mejorados a medida que nuevos datos sean incluidos. Esta modificación de los datos presente puede hacerse mediante el uso de la estadística Bayesiana o aplicando el mismo método seguido en este trabajo para una población de datos más extensa que la existente.

Las recomendaciones y líneas de investigaciones futuras que se sugieren son:

- Realizar estudios intensos de las fallas en el área de estudio, particularmente las fallas del cuaternario, a fin de poder incluir datos de fallas en la evaluación del riesgo sísmico según su incidencia en tal zona.
  
- Cabe mencionar el hecho de que este estudio, por ser el primero de este tipo en el país, se ha desarrollado en su forma más simple. A partir de este análisis se ha logrado conocer mejor el problema y se han definido nuevas líneas de investigación en las cuales se resuelva el cálculo del riesgo sísmico en forma analítica usando distribuciones de probabilidades continuas (y ya no discretas como se trabajó en el presente estudio) y buscando la forma de representar las fuentes en forma más realista tal que se pueda apreciar su actividad sísmica en profundidad (zona de Benioff). Incluir también en el análisis el concepto de área para el cálculo del Riesgo Sísmico.

- Dirigir nuestro objetivo hacia la obtención de mapas de otros parámetros como son la velocidad y el desplazamiento del suelo.
- En un país de la actividad sísmica como la nuestra es preciso realizar estudios de microregionalización para así poder conocer el potencial de daños de áreas metropolitanas. Para lograrlo es necesario hacer un análisis extenso de datos, a fin de obtener información estadística de daños y demás consecuencias de sismos como son: pérdidas operacionales, pérdidas debido a la paralización del trabajo, etc. Las aplicaciones del concepto de riesgo sísmico en análisis de daños, seguridad de las estructuras, optimización, etc. necesitan de un mayor conocimiento de costos y condiciones de resistencia, requiriendo un estudio bastante intenso.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Algermissen S.T. and Perkins D.M., 1973, "A Technique for Seismic Zoning: General Consideration and Parameters", NOAA Technical Report.
2. Algermissen S.T., 1976, "Seismic Hazard and Risk", Lecture Notes.
3. Algermissen S.T. and Perkins D.M., (1976), "A probabilistic Estimate of Maximum Acceleration in Rock in the Contiguous United States". USGS.
4. Berrocal J., 1976, "Aspectos de la Sismicidad Sudamericana durante el año 1974", Informe del Instituto Geofísico del Perú.
5. Berrocal J. y otros, 1975, "Estudio de Sismicidad para el proyecto de Derivación del Río Mantaro a Lima", Informe del Instituto Geofísico del Perú.
6. Cornell C.A. and Benjamin J.R., 1970, "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers".
7. Cornell C.A. and Vanmarke E.H., 1969, "The Major Influences on Seismic Risk" Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Chile Vol. 1.
8. Chávez J. 1975, "Regionalización Sísmica del Perú mediante Intensidades", Tesis de Grado U.N.I.
9. Esteva L. 1970, "Regionalización Sísmica de México para fines de Ingeniería", Instituto de Ingeniería, México.
10. Esteva L. 1975, "Geology and Probability in the Assessment of Seismic

Risk", II International Congress of the International Association of Engineering Geology, Brazil, August 1974.

11. Huaco D. y otros 1973, "Sismicidad del Area de Embalse Zaña-Jequetepeque", Instituto Geofísico del Perú.
12. Huaco D. 1975, "Source Parameters and the Static Field of Earthquake at Near Distances", Instituto Geofísico del Perú.
13. Huaco D. 1978, "Atenuación de la Intensidad y la Aceleración en el Perú", Instituto Geofísico del Perú.
14. Newmark N.M. and Rosenblueth E., 1971, "Fundamentals of Earthquake Engineering".
15. Ocola L. 1966, "Earthquake Activity of Perú".
16. Ocola L. y otros, 1978, "Sismicidad, Peligro Sísmico y de Tsunamis en el Area de Bayovar", Instituto Geofísico del Perú.
17. Oliveira C.S. 1974, "Seismic Risk Analysis" University of California, Berkeley.
18. Oliveira C.S. 1975, "Seismic Risk Analysis for a Site and a Metropolitan Area", University of California, Berkeley.
19. Shah H.C. y otros, 1975, "A Study of Seismic Risk for Nicaragua", Part I, Stanford University.
20. Silgado E. 1968, "Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1515 - 1960)", Boletín Bibliográfico de Geofísica y Oceanografía Americanas.
21. Silgado E. 1969, "Sismicidad de la Región Occidental de América del Sur entre los paralelos 2° y 18° Latitud Sur", I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Perú.

TABLA 1

Número (N) de Sismos de Magnitud (M)  
que han ocurrido en las Fuentes 1, 2, 3, 4 y 5 del  
Departamento de Lima

M	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	Fuente 4	Fuente 5
4.0 - 4.25	1	20		8	3
4.26 - 4.5	18	29	9	17	2
4.6 - 4.75	13	16	4	4	3
4.76 - 5.0	22	31	4	15	6
5.1 - 5.25	8	16	1		1
5.26 - 5.5	8	17		4	
5.6 - 5.75	1	3		1	
5.76 - 6.0	4	9	1	5	1
6.1 - 6.25	2	0			
6.26 - 6.5	4	5	1	3	
6.6 - 6.75	5	6		2	
6.76 - 7.0	0	7			1
7.1 - 7.93		1	1	1	

TABLA 2

Sismos Destruedores en la zona de interés durante el período 1925-1975

Fecha	Coordenada del Epicentro	Magnitud	Intensidad MMI	A <sub>máx</sub>	
11.03. 1926	13.7°S, 76.6°W		V-VI		Temblo registrado por el Observatorio Sismológico de Lima, a unos 80 Kms. de distancia. Hubo daños en Lima y Callao.
14.05. 1928	5°S, 78°W	MS 7.3.	X		Terremoto que conmovió gran parte de los departamentos de Amazonas, Cajamarca y San Martín en el NW del Perú. Al sur de Lima sólo sintieron, algunas personas, una leve y lenta oscilación.
19.01. 1932	12°S, 77.5°W	MS y.3.			La ciudad de Lima fué sacudida por un violento temblor que hizo caer cornizas, tapias y paredes. Hubo también daños en el Callao y tuvo una profundidad focal de 100 Km.
09.01. 1932					Vasto temblor regional que abarcó todo el departamento de Ica, parte de los departamentos de Lima, Arequipa, Ayacucho y Apurímac. Epicentro en el valle del Acarí, según datos instrumentales de Lima, Huancayo y La Paz.
05.08. 1933	11°S, 76.7°W				Fuerte y prolongado temblor en Lima, Callao e Ica. Causó deterioros en las casas de Lima y su intensidad causó alarma.
25.04. 1939			VI		Temblo sentido en Cañete. Fuertemente sentido en Pisco, Chíncha, Matucana, Lima y San Mateo.
25.05. 1940	11°S, 77.5°W		VII-VIII		La Ciudad de Lima y poblaciones cercanas fueron sacudidas por un fortísimo temblor. El área de percepción comprendió casi todo el Perú extendiéndose hasta el Puerto de Guayaquil, Ecuador del Norte y el Puerto de Arica, Chile al Sur.
17.10. 1966	10.7°S, 78.7°W	MB 6.3.	VIII	0.46 g	La Ciudad de Lima fué estremecida por un sismo que indudablemente fué uno de los más intensos que se habían producido desde 1940. Fue destructor a lo largo de la franja litoral comprendida entre Lima y Supe.
31.05. 1970	9.17°S, 78.8°W	MB 6.6			El más catastrófico terremoto en la historia del Perú y posiblemente del hemisferio occidental. Murieron ese día 50,000 personas, desaparecieron 20,000 y quedaron 150,000 heridos (CRYRZA). La mayor mortalidad se debió a la gran avalancha que siguió al terremoto y que sepultó al Pueblo de Yungay.
03.10. 1974	12.3°S, 77.8°W	MB 6.6.	VI-VIII		Violento terremoto que se caracterizó por su extrema duración, que en Lima sobrepasó los dos minutos, habiendo indicaciones de que se trató de un sismo múltiple con por lo menos tres sacudidas en los primeros 25 segundos.

TABLA 3

Número de Sismos con  $MB \geq 6.0$  ocurridos en las cinco Fuentes  
Sísmicas del Departamento de Lima

Años	Fuente 1		Fuente 2		Fuente 3		Fuente 4		Fuente 5	
	1925-1962	1963-1975	1925-1962	1963-1975	1925-1962	1963-1975	1925-1962	1963-1975	1925-1962	1963-1975
6.0		4	4	1	1			2	1	
6.1	2		1							
6.2			6				1			
6.3		1	5			1	2		1	
6.4	2		2				1			
6.5		1								
6.6		3	4				1			
6.7	1									
6.8	1		2		1		1			
> 6.8			1							
Total	6	9	25	1	2	1	6	2	2	

TABLA 4  
Parámetros Sísmicos para Algunos Sismos del Perú (Instituto Geofísico del Perú)

ESTACION			PARAMETROS SISMICOS								
Lugar	Coordenadas		Fecha	Hora	Coordenadas		Magnitud MB	Distancia Espicentral (Km)	Profundidad de foco (Km.)	Intensidad Máxima (MM)	Aceleración Mas. o/o g.
	Lat.	Long.			Lat.	Long					
Instituto de Geología	12.07oS	77.03oW	01-11-47	14:58:53.0	10.50oS	74.9oW	6.50	281.91	70.0	IV	0.006
Instituto de Geología	12.07oS	77.03oW	28-05-48	05:36:16.0	13.0oS	76.5oW	6.10	154.0	60.0	V	0.013
Instituto de Geología	12.07oS	77.03oW	03-08-52	13:13:44.0	12.8oS	78.5oW	5.80	179.07	100.0	V	0.021
Instituto de Geología	12.07oS	77.03oW	15-02-53	09:32:25.0	12.0oS	77.5oW	4.90	51.70	100.0	VI	0.029
Instituto de Geología	12.07oS	77.03oW	21-04-54	20:23:05.0	12.0oS	77.0oW	6.20	103.46	100.0	VI	0.030
Instituto de Geología	12.07oS	77.03oW	24-01-57	07:16:29.0	12.5oS	78.0oW	6.44	115.73			0.010
Instituto de Geología	12.07oS	77.03oW	18-02-57	23:49:52.0	11.5oS	78.0oW	6.69	123.15	124.0	V	0.037
Instituto de Geología	12.07oS	77.03oW	28-04-58	11:47:42.0	11.47oS	74.67oW	4.10	350.90			0.038
Parque de la Exposición	12.05oS	77.03oW	17-10-66	21:41:54.0	10.7oS	78.8oW	6.30	180.0	24.0	VIII	0.46
Lima	12.08oS	77.04oW	31-05-70	20:23:27.0	09.2oS	78.8oW	6.60	372.0	43.0	VIII	0.13
Lima	12.08oS	77.04oW	29-11-71	20:14:12.2	11.24oS	77.73oW	5.30	210.0	54.0	IV	0.05
Lima	12.08oS	77.04oW	05-01-74	08:33:50.7	12.30oS	76.35oW	6.30	78.54	98	VI	0.11
Zárate	12.02oS	77.04oW	05-01-74	08:33:50.7	12.30oS	76.35oW	6.30	78.21	98	VI	0.16
Lima	12.08oS	77.04oW	03-10-74	14:21:29.1	12.27oS	77.80oW	6.30	85.0	13	VIII	0.24
Las Gardenias	12.13oS	76.98oW	03-10-74	14:21:29.1	12.27oS	77.80oW	6.60	89.40	13	VIII	0.18
Lima	12.08oS	77.04oW	90-11-74	12:59:49.8	12.53oS	77.49oW	6.00	105.40	6	V	0.08
La Molina	12.08oS	76.95oW	09-11-74	12:59:49.8	12.50oS	77.79oW	6.00	116.0	6		0.14



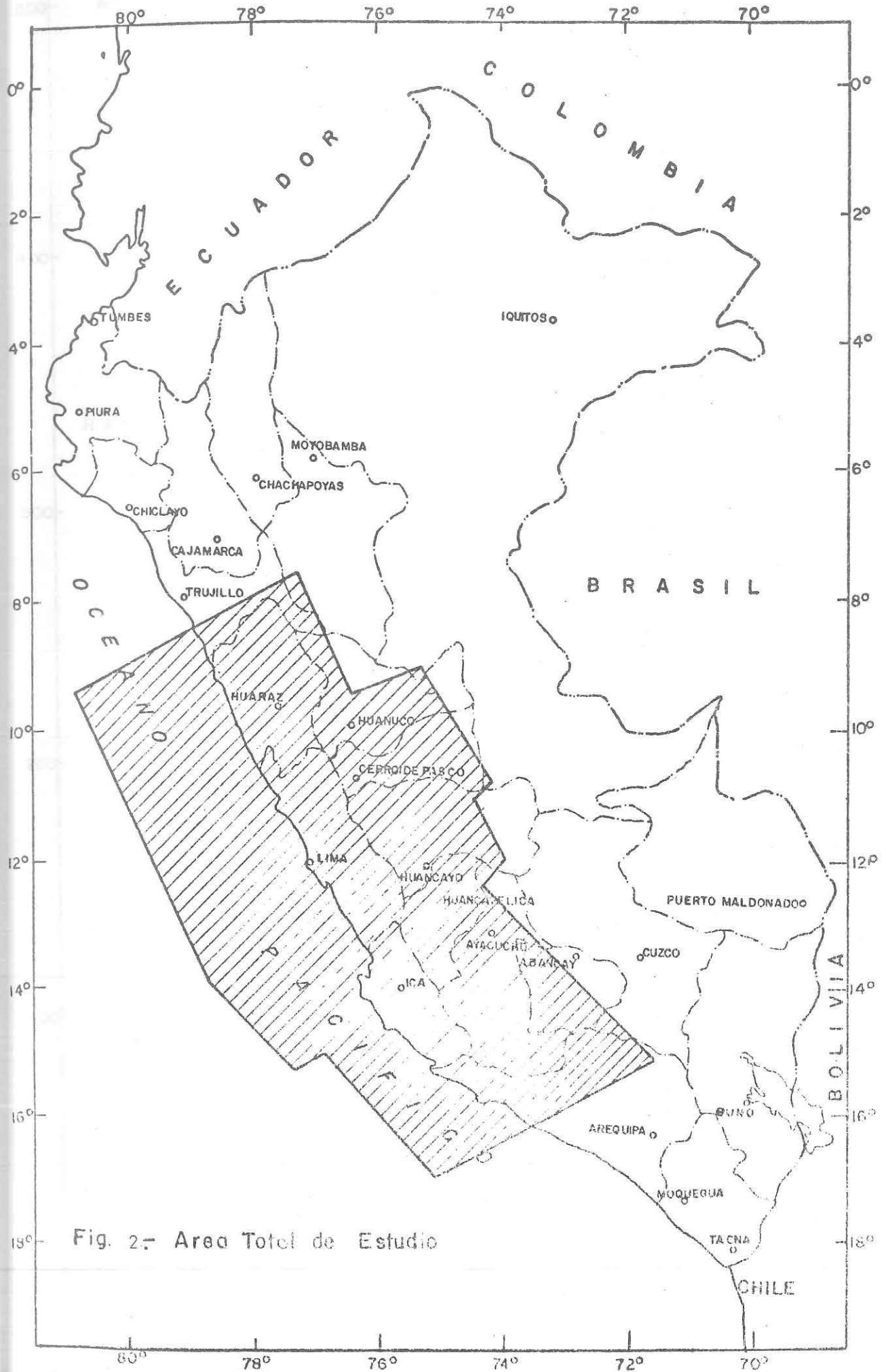


Fig. 2.- Area Total de Estudio

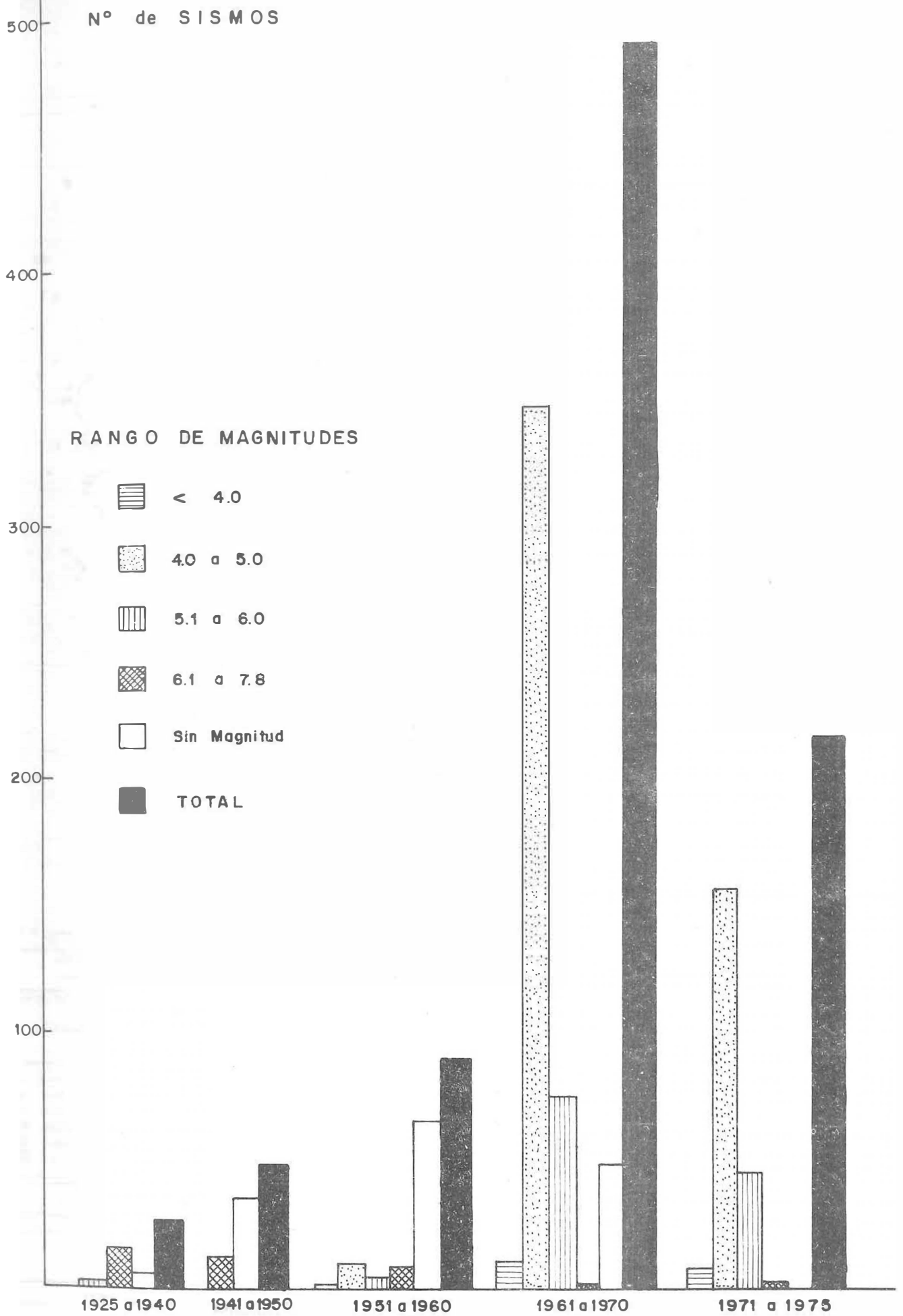
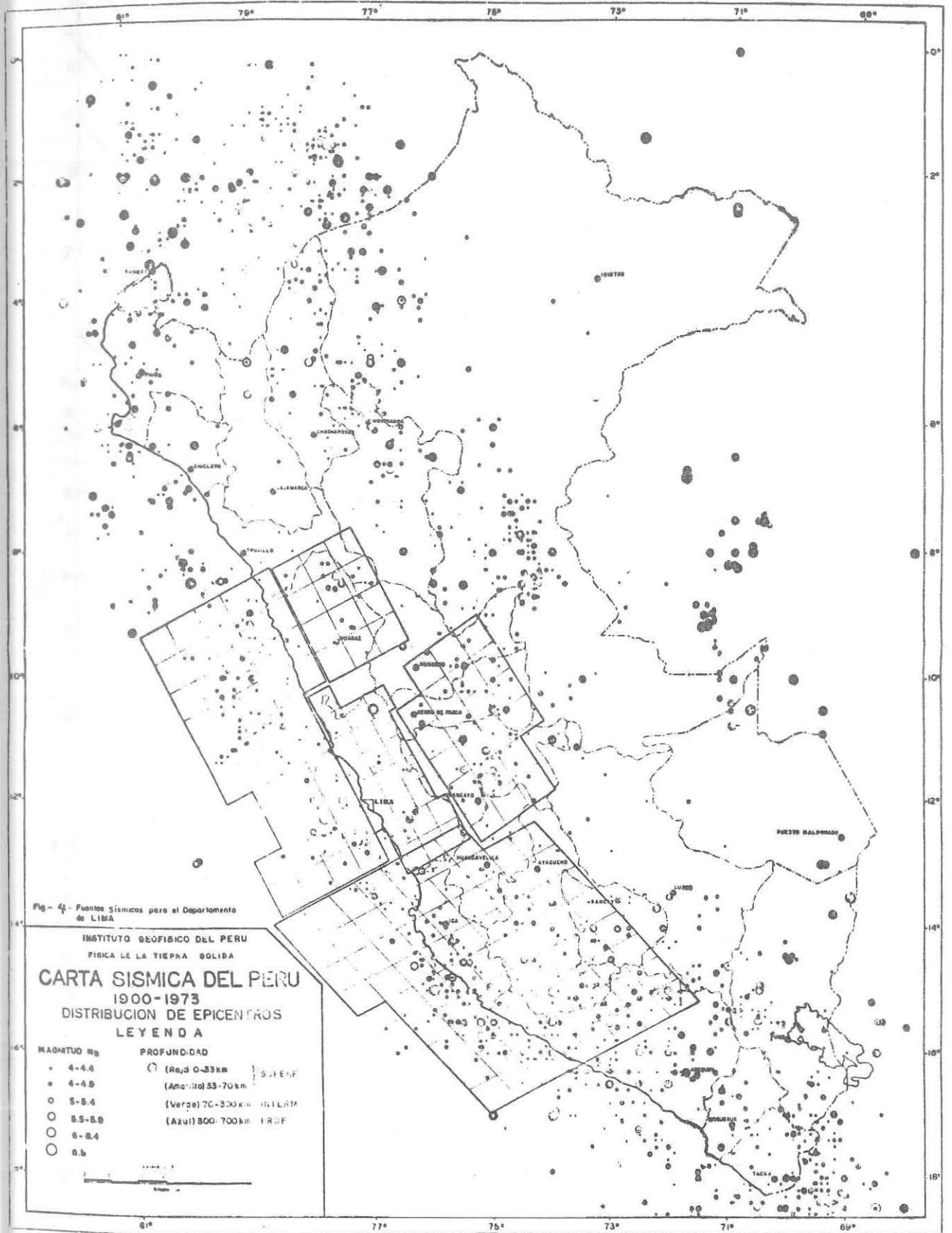


Fig .- Sismos Registrados Agrupados en Décadas para 6 Rangos de Magnitud. ( L. Casaverde 1979 )



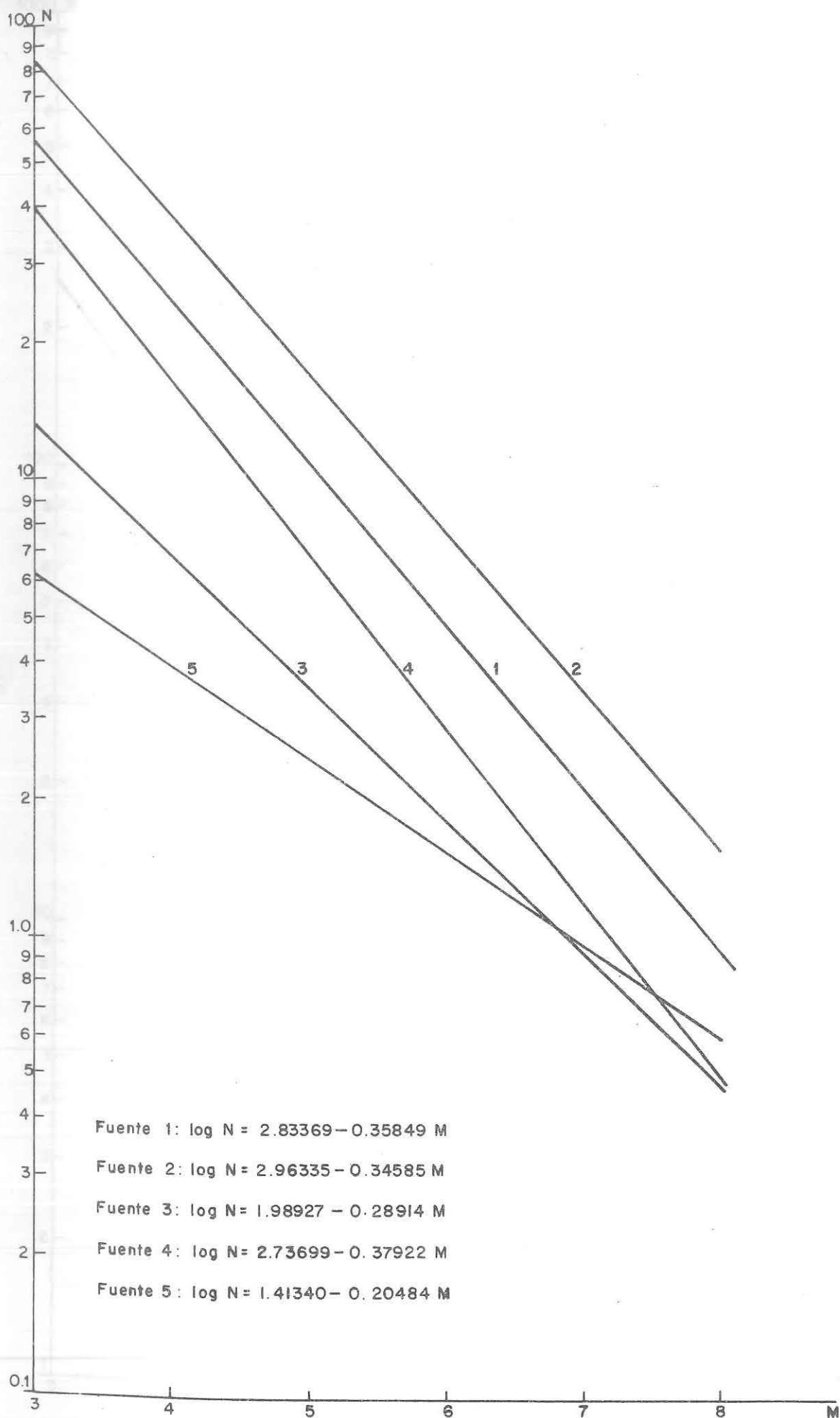


Fig. 5 - Relaciones de Recurrencia de las Fuentes Sísmicas para el Departamento de LIMA. (L. Casaverde 1979)

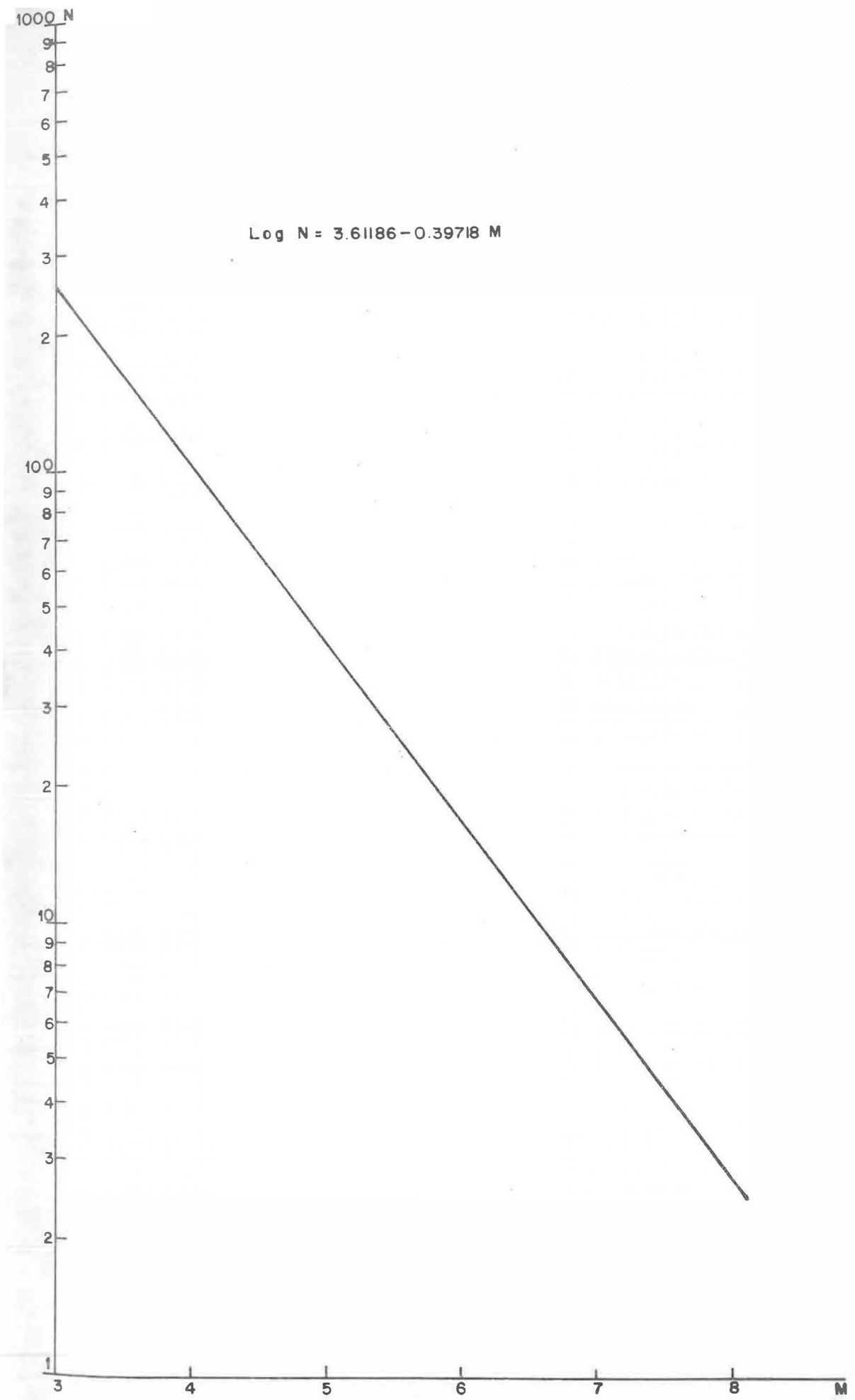


Fig. 6.- Relación de Recurrencia para el Area Total en Estudio (L. Casaverde 1979)

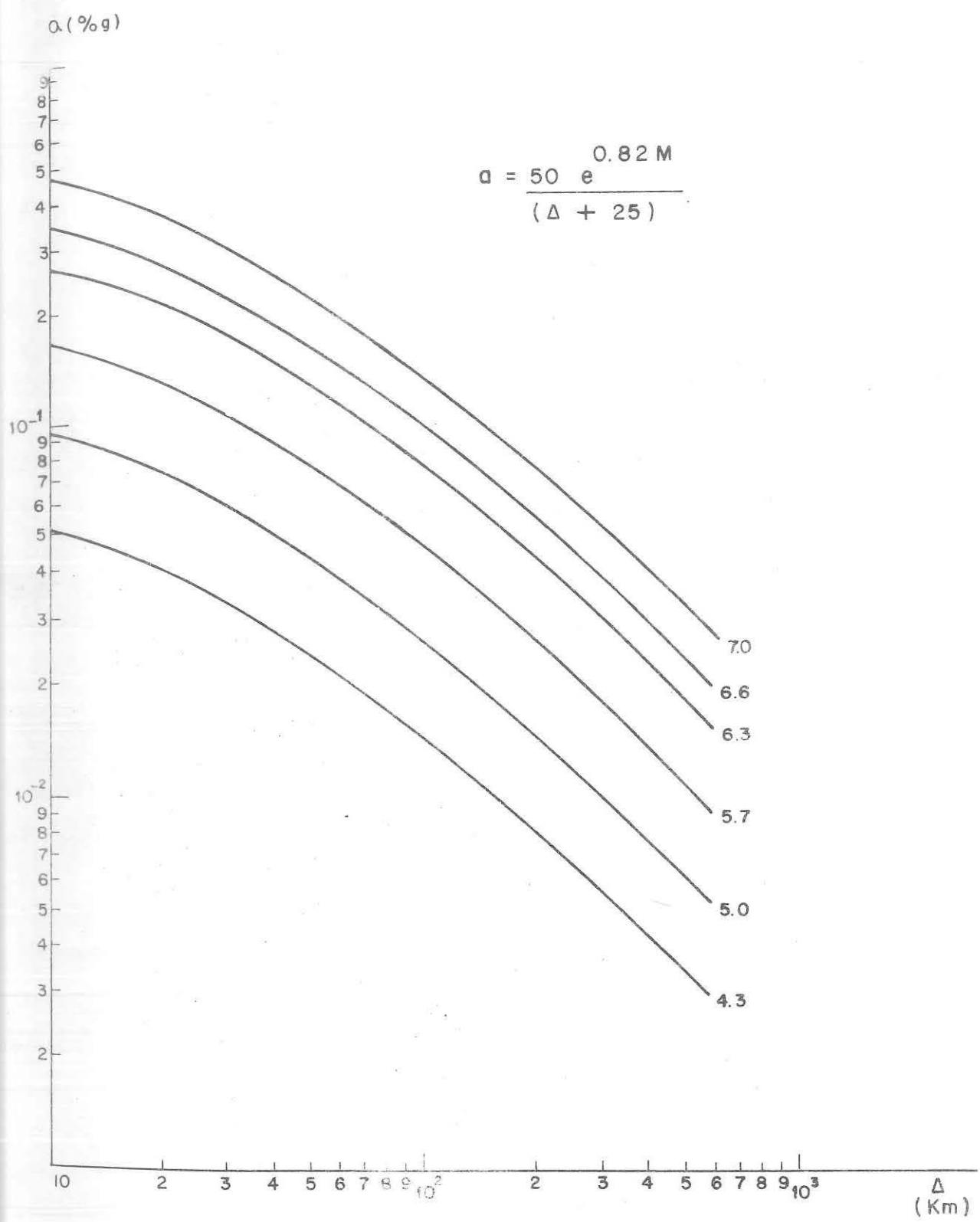


Fig. 7.-- Relación de Atenuación de la Aceleración  
(L. Casaverde 1979)

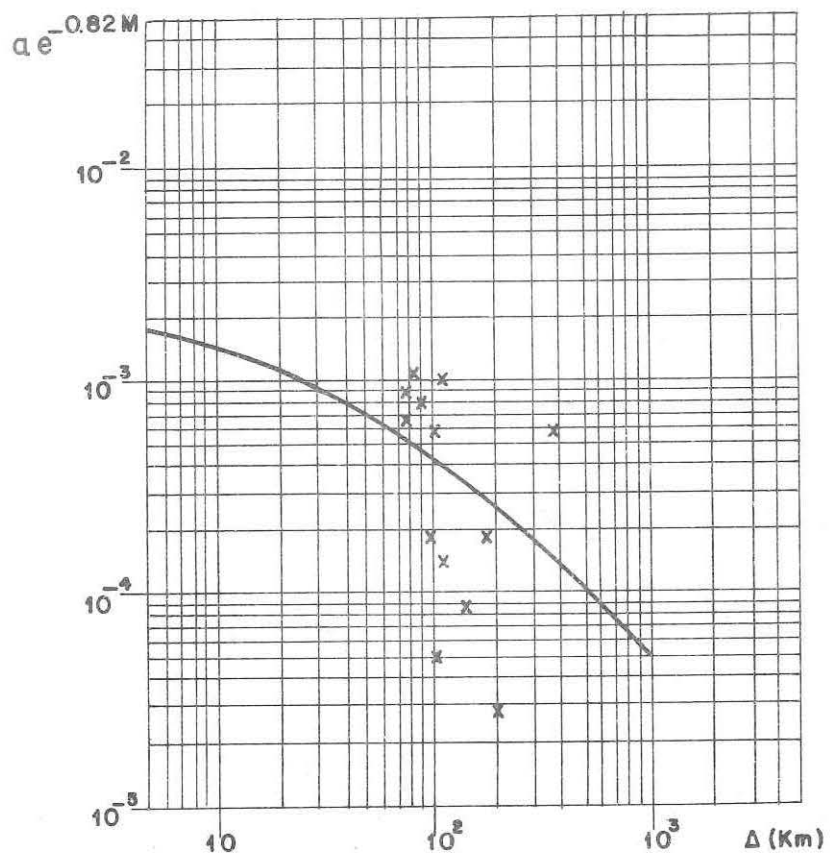


Fig. 8 - Variación de la Aceleración  
Máxima con la Distancia Epicentral  
(L. Casaverde 1979)

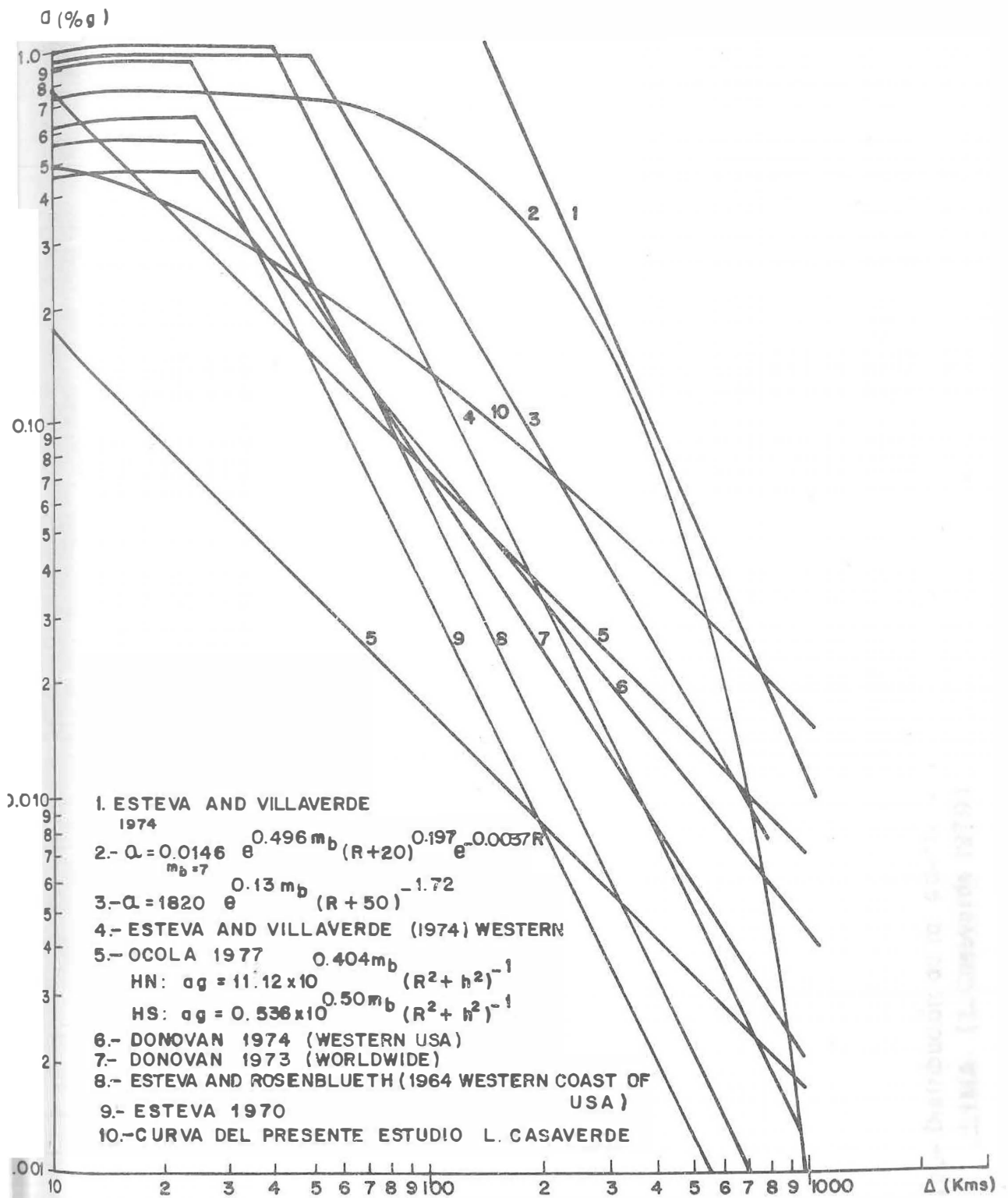


Fig. 9.- Curvas de Atenuación de la Aceleración de otros Autores (Huaco 1978)

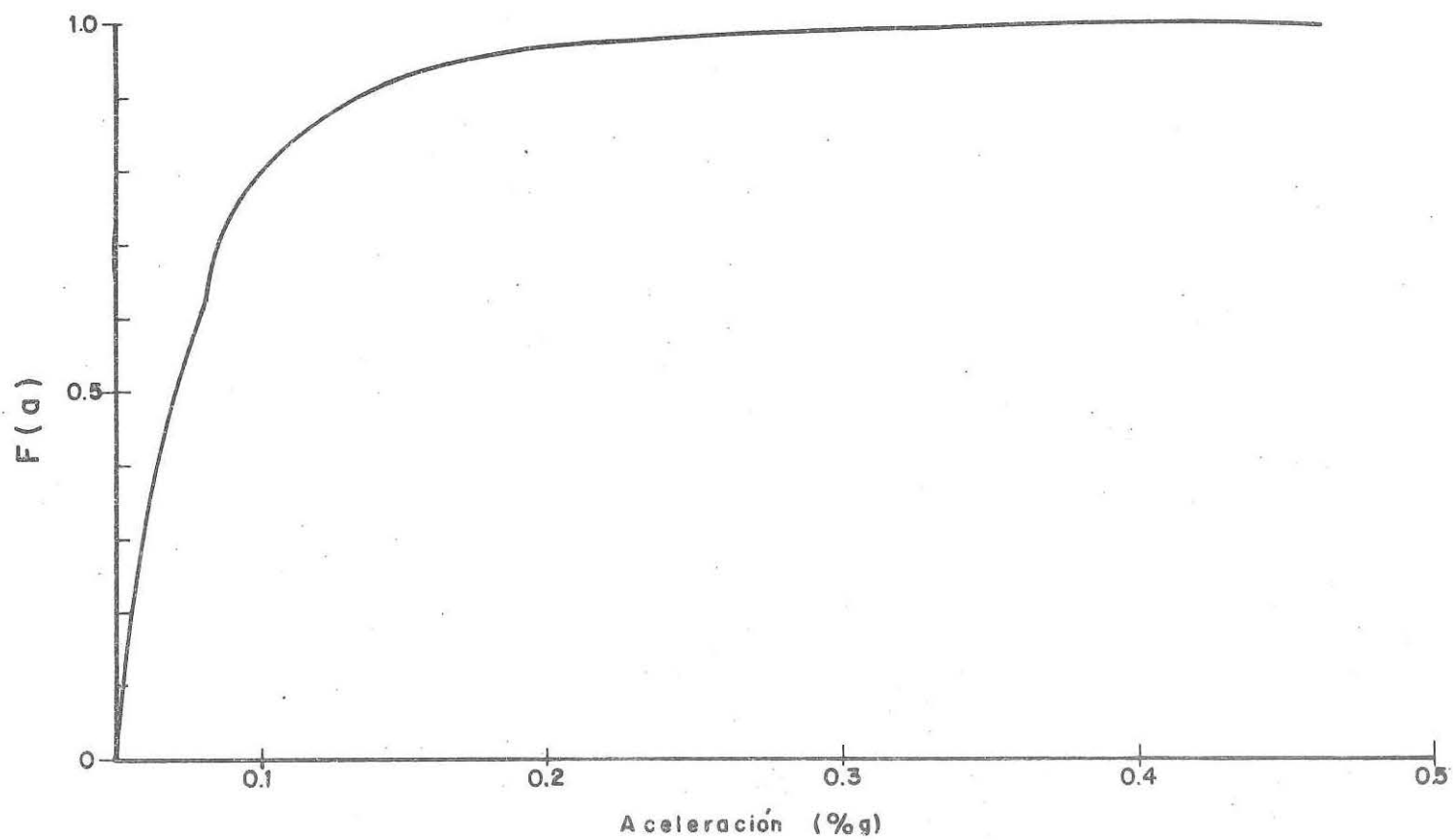


Fig. 10.- Distribución de la Aceleración para la Subárea 51 del Departamento de LIMA. (L.Casaverde 1979)

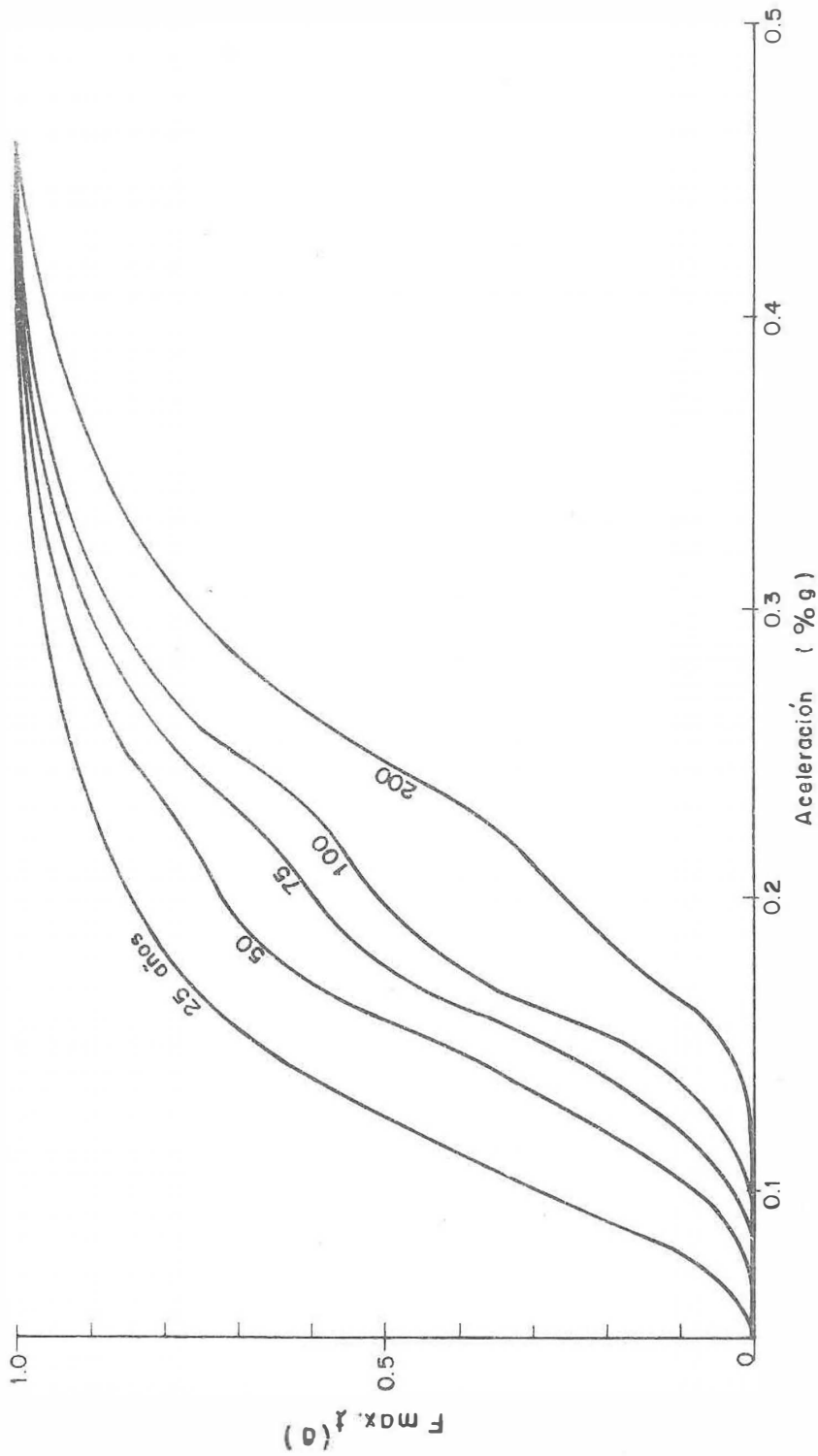


Fig. 11 - Distribución de Probabilidades Extremas de Aceleración para la Subárea 51 del Departamento de LIMA ( L.Casaverde. 1979 )

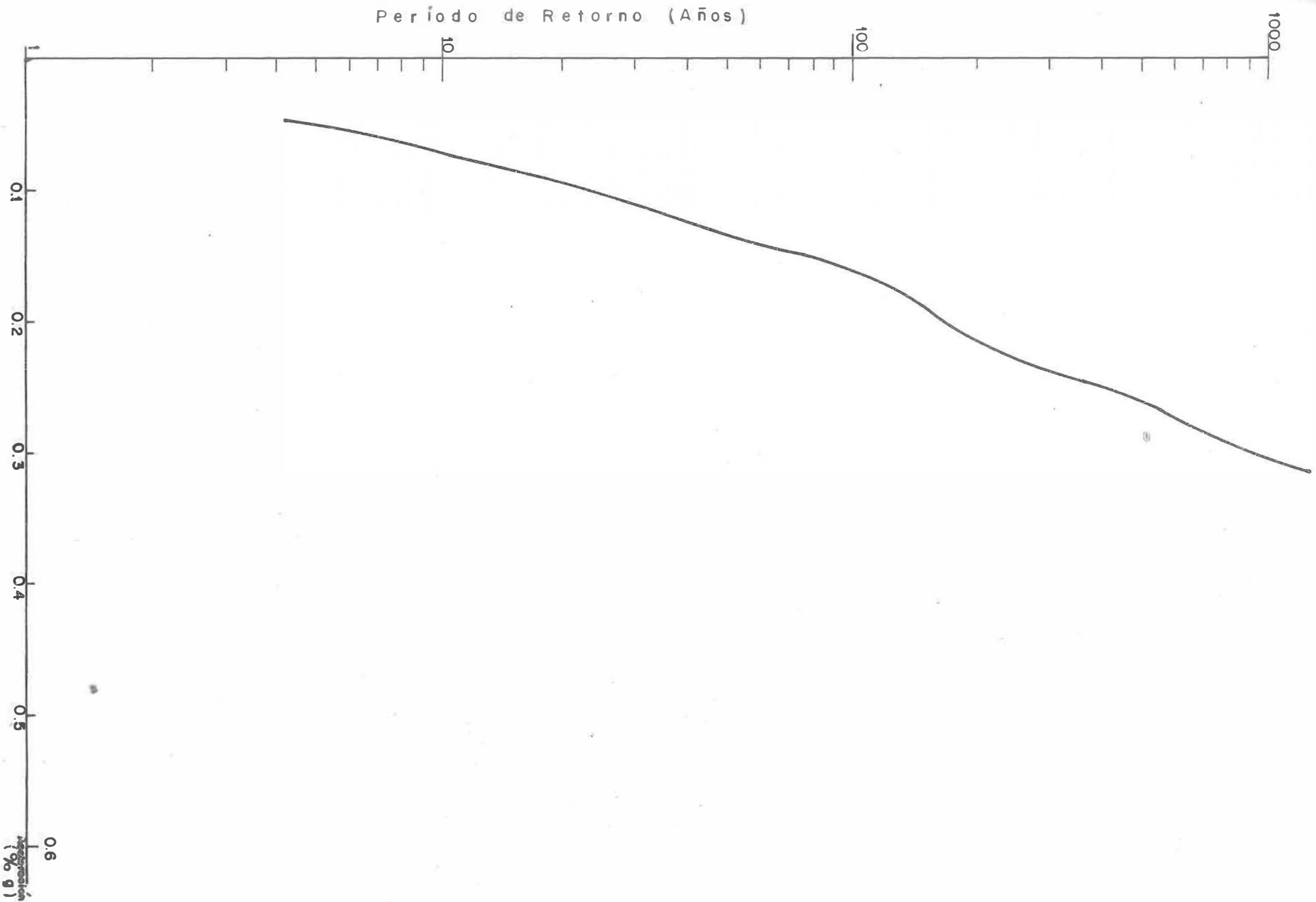
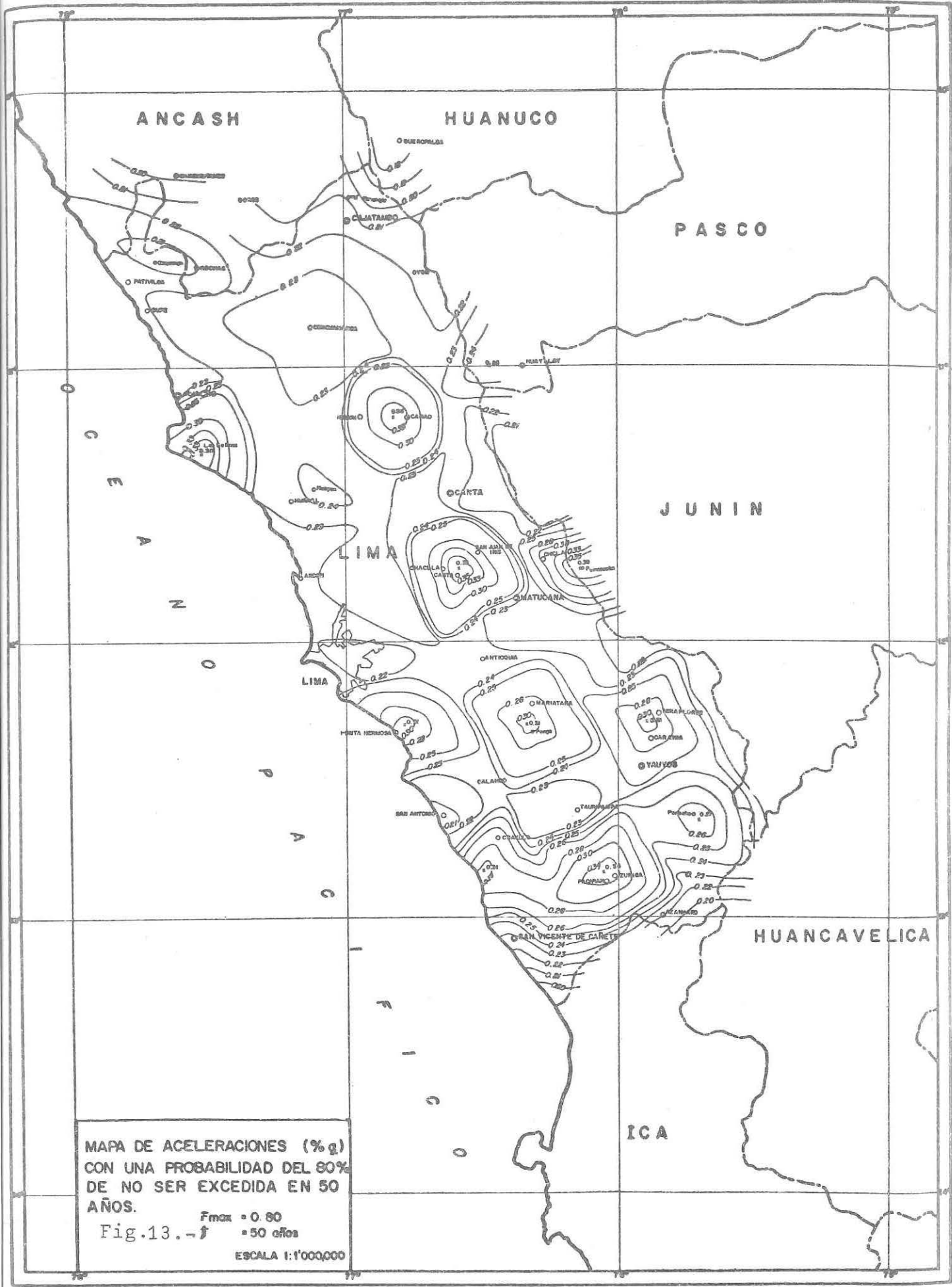
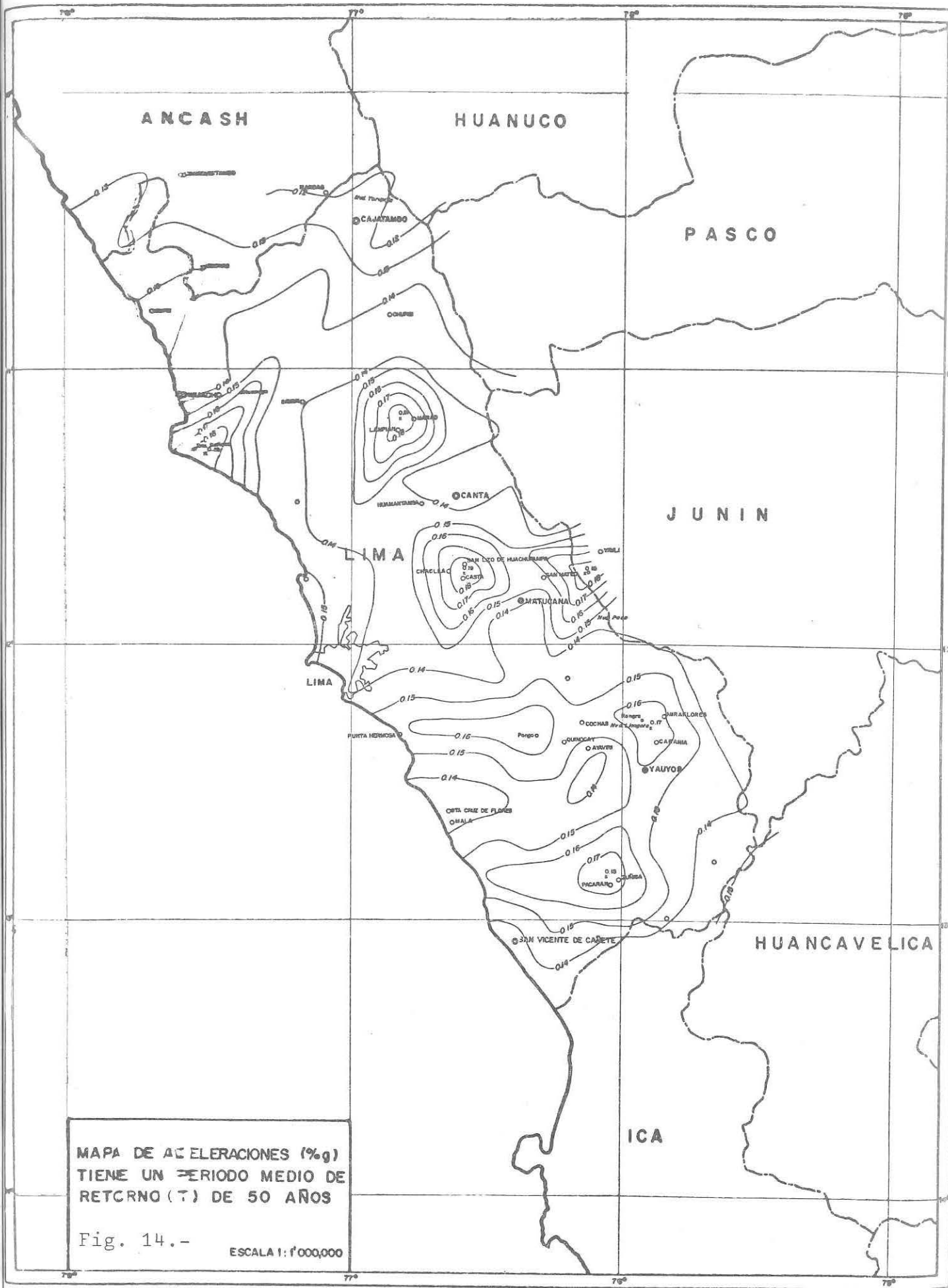


Fig. 12. - Período de Retorno Versus Aceleración para la Subzona 51 del Departamento de LIMA (L Casoverde 1979)



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

$F_{max} = 0.60$   
 $T = 50$  años  
 ESCALA 1:1'000,000



MAPA DE ACCELERACIONES (%g)  
 TIENE UN PERIODO MEDIO DE  
 RETORNO (T) DE 50 AÑOS

Fig. 14.- ESCALA 1:1'000,000

## MONUMENTOS HISTORICOS Y RIESGO SISMICO PARA LA ZONA DE LIMA

Julio Vargas N.

### 1. Introducción

La problemática de la prevención, reparación y restauración de Monumentos Históricos, está asociada al nivel de daño ocurrido y al nivel de daño que se pueda sufrir en terremotos futuros. Por lo cual es necesario definir una filosofía de diseño de restauración y desarrollar estudios de riesgo sísmico, que relacionen el nivel de riesgo, el período de conservación y la aceleración máxima esperada del suelo, como una medida de utilidad práctica en la ingeniería sismo resistente.

A continuación se presenta algunas ideas sobre la filosofía de diseño y el resultado de un análisis de riesgo sísmico para la zona de Lima.

### 2. Filosofía de Diseño de Restauración.

Como filosofía de diseño de restauración puede adoptarse una variación de los criterios utilizados para obras corrientes, así debiera esperarse que en los monumentos históricos restaurados, se asegure la estabilidad de las estructuras básicas frente a los sismos severos aún sufriendo daño estructural importante, de tal suerte que se pueda realizar posteriormente una nueva restauración.

Frente a sismos medianos, sólo debiera esperarse daño en los elementos secundarios, de manera de permitir una restauración leve y relativamente económica.

No debiera producirse daño en sismos leves.

Esto normalmente implicará, concederle a las estructuras dañadas, niveles de resistencia o ductilidad mayores de las que poseía, pues si bien por lo general las características de los monumentos históricos que permanecen hasta nuestros días, son tales que han podido soportar una tan importante actividad sísmica como probablemente le corresponda soportar en el futuro, ellas vienen sufriendo un proceso de degradación que es irreversible.

Esto significa desarrollar soluciones en base a la tecnología moderna, de forma tal que manteniendo fijas las formas estructurales y su apariencia exterior, sea posible mejorar la mencionada resistencia y ductilidad.

### 3. Riesgos Sísmicos para la Zona de Lima.—

Se describe a continuación los puntos más saltantes de un análisis de riesgo sísmico para la zona de Lima.

Luego de un análisis de las estructuras tectónicas que es posible reconocer en el Perú y de la distribución espacial de hipocentros (Fig. 1), se ubicó algunas zonas sismogénicas.

Cuatro fuentes están relacionadas con la zona de Benioff. Dos superficiales ( $< 70$  Km.) y dos mediana profundidad ( $\geq 70$  Km.). 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. (Ref 1)

A partir de los datos del catálogo histórico del Instituto Geofísico del Perú, se obtuvo las tasas de actividad sísmica para cada fuente. Tabla I (Fig. 2).

Las máximas magnitudes utilizadas fueron las  $M_s$  (Richter) en cada zona. La sensibilidad de esta variable fue chequeada incrementando  $M_s$  en 0.5 para cada zona y comparando resultados. (Ref. 2)

Las leyes de atenuación fueron calibradas en base a las señales de terremotos procesadas por A.G. Brady y V. Pérez (U.S. Geological Survey, 1977). Las figuras 3, 4 y 5 muestran las leyes de atenuación para aceleraciones, velocidades y desplazamientos.

La baja atenuación con la distancia fue escogida para reflejar lo observado en las señales captadas en Lima. (Fig. 6). La dependencia de la consistencia con los resultados de la atenuación de las Intensidades MM con la distancia (Fig. 7). La atenuación de la velocidad y de los desplazamientos es normal como ocurre con las señales de otras partes del mundo. (Ref. 3).

Los 10 registros de sismos peruanos han sido captados en Lima, 9 de ellos en suelo bastante firme. Todos ellos exhiben espectros con amplificaciones máximas en el rango de altas frecuencias. La creencia generalizada para explicar esta tendencia, ha sido la influencia del suelo al actuar como filtro con un cierto período predominante. Sin embargo, esta idea carece de fundamento, precisamente por la rigidez del suelo ( $V_s > 700$  m/seg) que no selecciona ni altera significativamente la señal. La explicación debe buscarse en una especial eficiencia (rigidez) de la roca basal para transmitir las ondas, en especial las de altas frecuencias. Esta características podría tener relación

con la baja atenuación de la aceleración con la distancia, que ha sido mencionada.

Los resultados del análisis del riesgo sísmico pueden apreciarse en las figuras 8, 9 y 10 (Ref. 3).

En general para un nivel de riesgo determinado, las aceleraciones resultan bastante altas. Esto es el resultado de extrapolar los registros obtenidos en Lima durante los sismos, los cuales probablemente no incluyeron un comportamiento inelástico del suelo. Si éste hubiera ocurrido, los picos podrían ser más bajos.

En la Fig. 11, se compara dos espectros de respuesta obtenidos normalizando registros a una aceleración de 1 g, con el espectro respuesta de Newmark-Blume-Kapur, pudiéndose apreciar que este último no rige para el caso peruano. Esta observación refuerza las particularidades encontradas en la función de atenuación y en el resultado del análisis de riesgo sísmico.

#### 4. Características de los Monumentos Históricos de la Costa Central Peruana.—

Los monumentos históricos asentados en la costa peruana, básicamente están contruídos en adobe, tapial o piedra con mortero de barro y corresponden a las épocas Pre-Incaicas e Incaicas.

En la zona centro-norte de la costa del país, se concentran las más importantes. Las ruinas de Pachacamac, Puruchuco, Cajamarquilla en los alrededores de Lima y la fortaleza de Paramonga, tal vez sean los mejores ejemplos de estructuras de tierra. Las ruinas de Sechín y los tambos de Wylcalmain son mas bien contruídos con piedra, unida con mortero de barro.

Sólo en el valle del río Rimac que cruza la Ciudad de Lima hay más de 300 sitios de interés histórico relevante

Dadas las peculiaridades en los patrones de radiación de las ondas sísmicas que se han detectado en la costa central y en virtud del alto número de años de "vida útil" de estas obras históricas, el riesgo sísmico asociado a ellas es exageradamente elevado.

Como es natural, los trabajos de restauración devuelven a las estructuras sus formas originales, pero desafortunadamente sin que se incremente significativamente su resistencia. El sismo de Lima de 1974 dañó considerablemente las restauradas ruinas de Pachacamac y en muchos casos repitiendo los esquemas de fisuración ya presentados en sismos previos.

De lo expuesto se desprende la necesidad de desarrollar técnicas de refuerzo para los materiales primitivos, que proporcionen mayores resistencias y ductilidad, sin variar el aspecto exterior de las obras.

Por otro lado, la gran cantidad de las obras de interés histórico en el caso peruano, hace pensar que los costos de restauración significan un problema económico de desproporcionadas magnitudes dada la situación del país. Esto conlleva a la necesidad de desarrollar técnicas regionales de bajo costo, para la preservación de los monumentos históricos.

#### 5. La Investigación Local.—

La construcción en el Perú está ancestralmente ligada al uso de la tierra sin cocer. El interés de desarrollar una tecnología apropiada para preservar las construcciones frente a la acción sísmica, no sólo está asociado al problema de la conservación de monumentos históricos, sino al enorme problema del déficit de viviendas, en un país que tiene uno de los más grandes índices de crecimiento y un bajo ingreso "per capita". La vivienda espontánea rural, construída con barro, posee las mismas características y problemas de las antiguas edificaciones del Incanato.

Los pocos recursos para investigación que posee el país en el sector vivienda, están desde hace algunos años destinados en gran parte a resolver el problema de la seguridad de las construcciones de adobe ante la ocurrencia de terremotos. En la Pontificia Universidad Católica del Perú, desde 1973 se viene desarrollando un programa experimental tendiente a reforzar las viviendas de adobe con materiales de bajo costo, propios de zonas rurales o alternativamente urbanos.

Utilizando refuerzos de caña tipo carrizo, en tiras, ubicado cada cierto número de hiladas y cocidos en los encuentros, se ha logrado incrementar las resistencias frente a solicitaciones estáticas, entre 2 1/2 y 3 veces. Para la realización de los ensayos se utilizó una mesa inclinable de 4 x 4 mts. sobre la cual se ubicaba una habitación de 4 paredes con diferentes arreglos de aberturas. (Ref. 4)

Variantes utilizando alambre exterior a los muros, conectando vertical o diagonalmente la cimentación con una viga de madera de coronación, dieron resultados aún mejores. Se obtuvo ductilidades del orden de 2.

Finalmente se investigó el comportamiento de las construcciones de adobe unidas con morteros en base a cemento, arena y cal obteniéndose incrementos de resistencia cortante estática, del orden de tres veces la obtenida con morteros de barro. (Ref. 5)

Actualmente se planea la construcción de una mesa vibradora para realizar ensayos dinámicos de las soluciones estudiadas, la que se espera terminar en 1981.

#### 6. Conclusiones.—

- Resulta imprescindible la realización de estudios de riesgo sísmico que indiquen los niveles relativos de diseño que deben aplicarse a la restauración de monumentos históricos.
- Conviene continuar desarrollando investigaciones locales, de acuerdo a la tecnología utilizada, para incrementar la resistencia y ductilidad de las obras restauradas.
- Las obras de restauración deben realizarse aplicando los avances de la ingeniería sismo-resistente.

#### Reconocimiento:

El autor agradece las ideas y recomendaciones del Dr. Robin McGuire para la ejecución del Riesgo Sísmico en la zona de Lima, así como también a la Ingeniero Lucía Casaverde, por su valiosa colaboración.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Estudio Geológico de los Andes del Perú Central.  
F. Mégard. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima. 1979.
2. Robin McGuire. Comunicación personal 1979.
3. Robin McGuire. Fortran Computer Program for Seismic Risk Anaysis. U.S. Geological Survey 1976.
4. Julio Vargas N. La Vivienda Rural.  
Pontificia Universidad Católica del Perú. 1978.
5. Julio Vargas N. Albañilería de Adobe con Variaciones de Mortero.  
Pontificia Universidad Católica del Perú. 1979.

TABLA I

Zona #	$M_{bl}$	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 cálc.	$M_s$ máx.	Profundidades
I	4.7	10.5	1.31	0.31	0.95	0.958	7.6	10 -- 50 Km
II	4.7	4.32	0.28	0.27	0.22	1.259	8.6	25 Km
III	4.3	0.951	0.08	0	0.07	0.801	5.1	25 Km
IV	4.4	7.6	0.72	0.50	0.22	0.823	7.0	70 Km
V	4.4	4.75	0.275	0.30	0.15	0.996	6.5	5 -- 55 Km
VI	4.1	6.14	0.45	0.23	0.66	0.788	7.3	70 - 110 Km
VII	4.6	1.46	0.15	0.33	0.37	0.94***	5.6	5.Km

\*

Período 1913 - 1962

\*\*

Período 1963 - 1976

\*\*\*

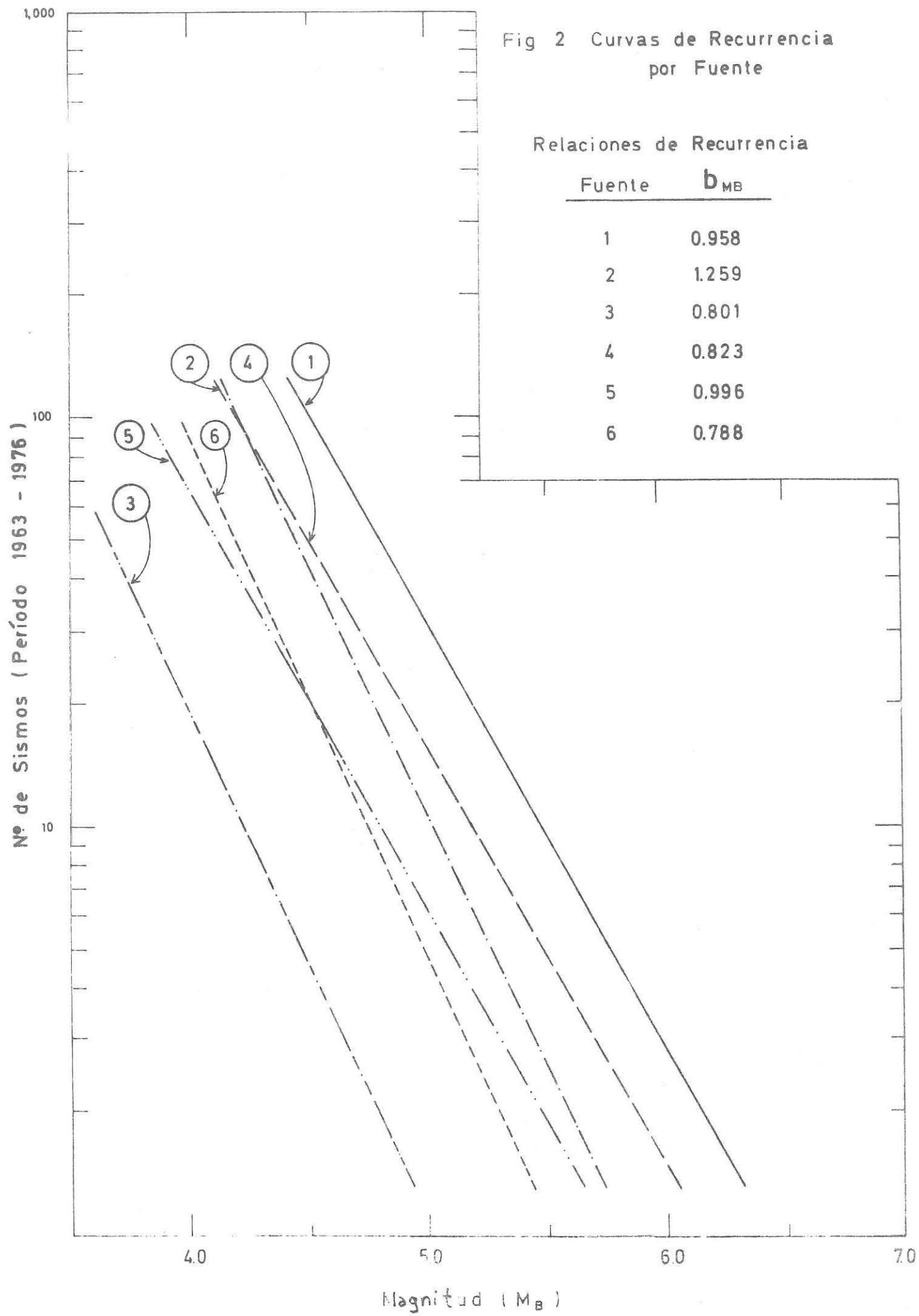
Fijado igual a promedio de otras zonas



Fig 2 Curvas de Recurrencia por Fuente

Relaciones de Recurrencia

Fuente	$b_{MB}$
1	0.958
2	1.259
3	0.801
4	0.823
5	0.996
6	0.788



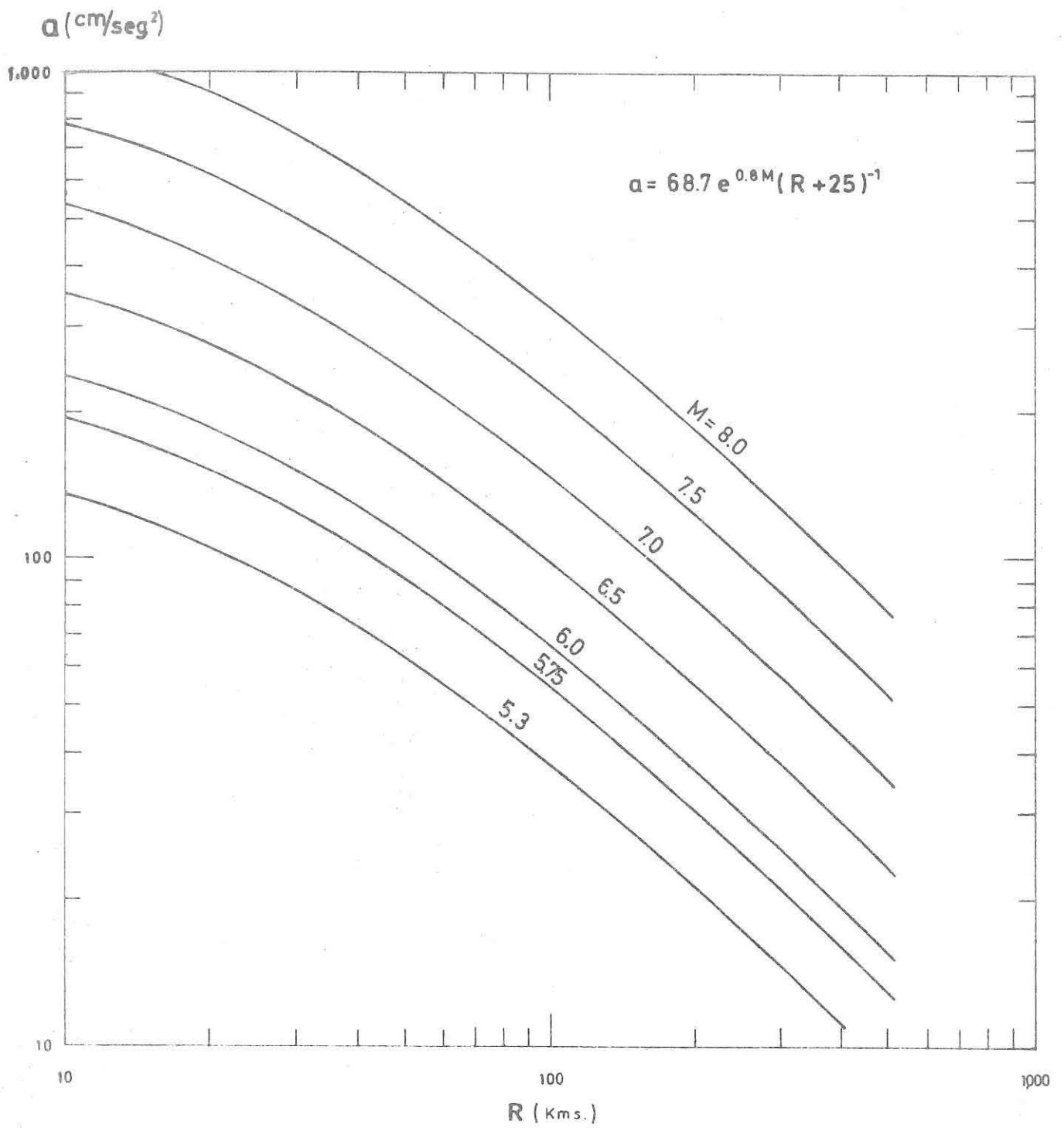


Figura 3 Atenuación de la Aceleración Máxima del Suelo, según el Nivel de Magnitud de los Sismos ( $M_S$ ).

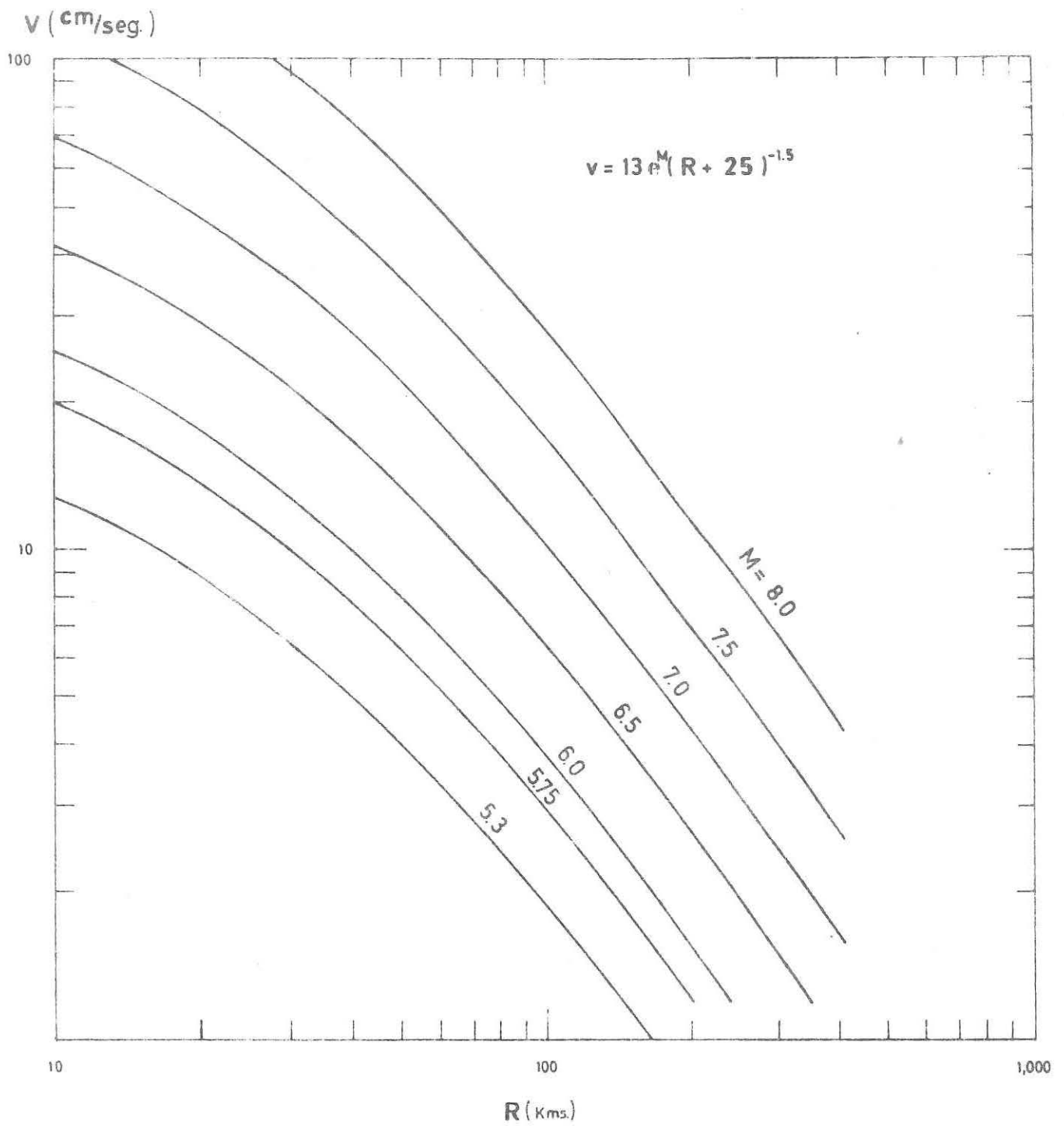


Figura 4 Atenuación de la Velocidad Máxima del Suelo, según el Nivel de Magnitud de los Sismos. ( $M_S$ )

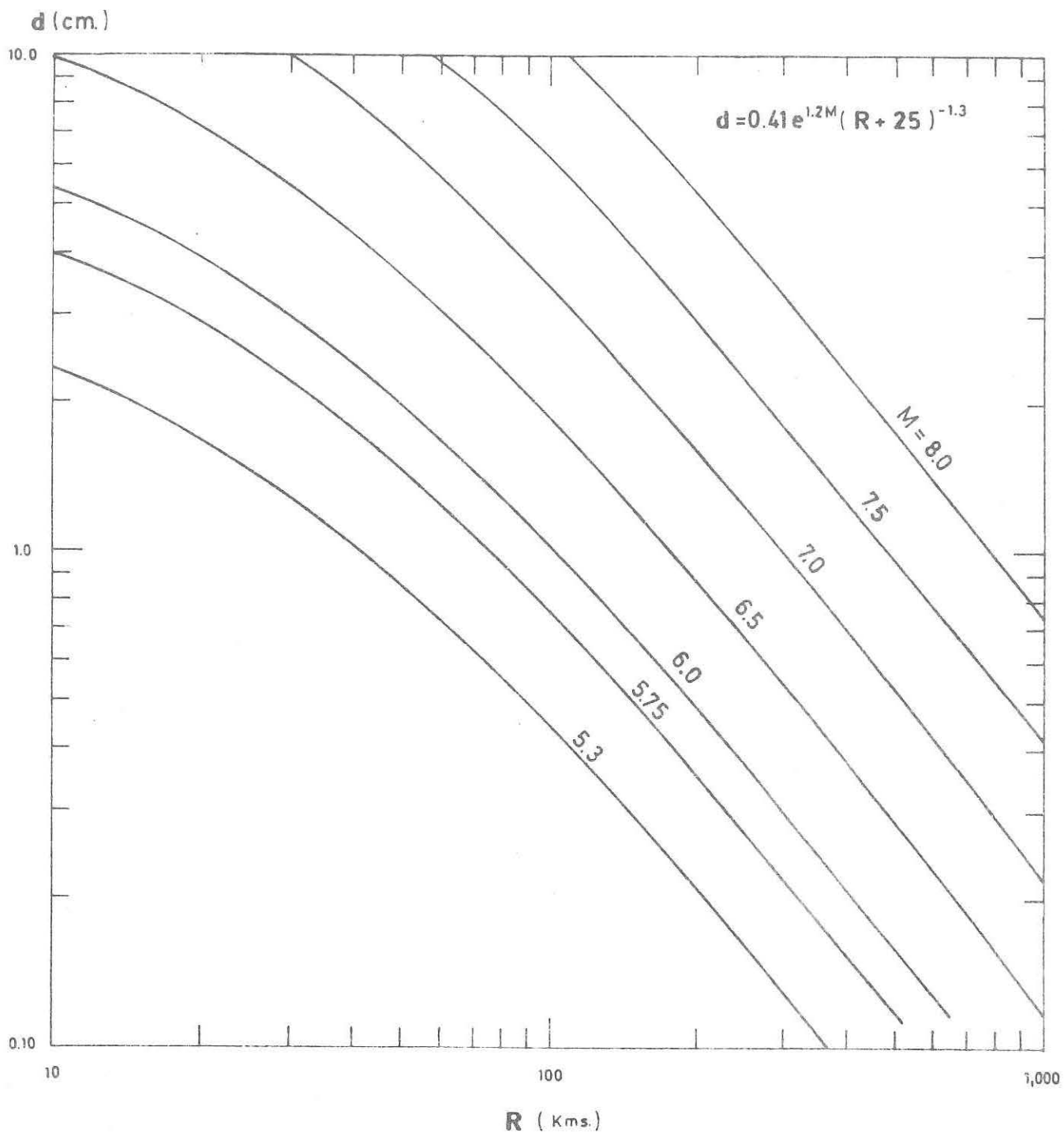


Figura 5 Atenuación del Desplazamiento Máximo del Suelo, según el Nivel de Magnitud de los Sismos. ( $M_s$ .)

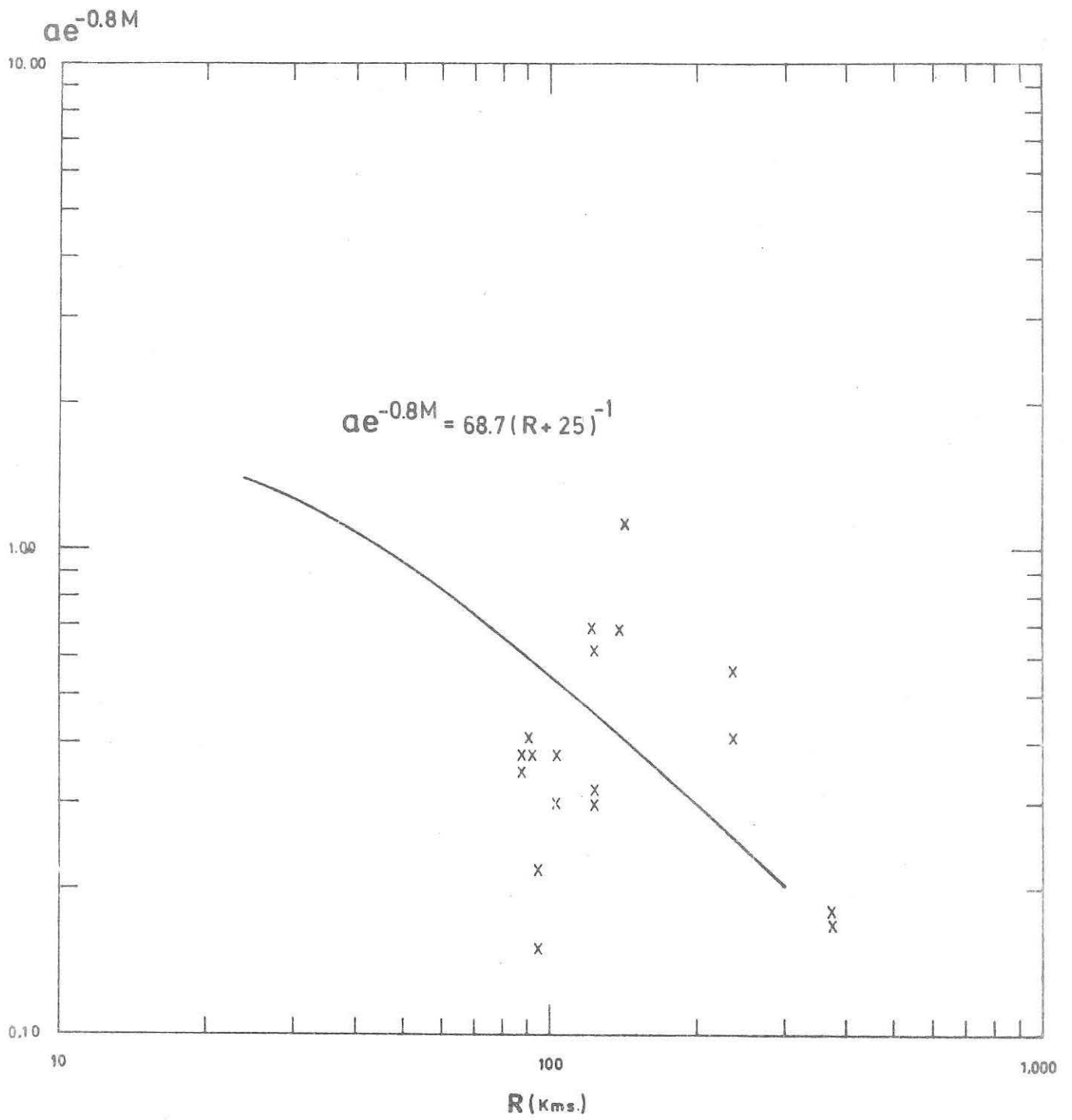


Figura 6 Variación de la Aceleración Máxima del Suelo con la Distancia Hipocentral.

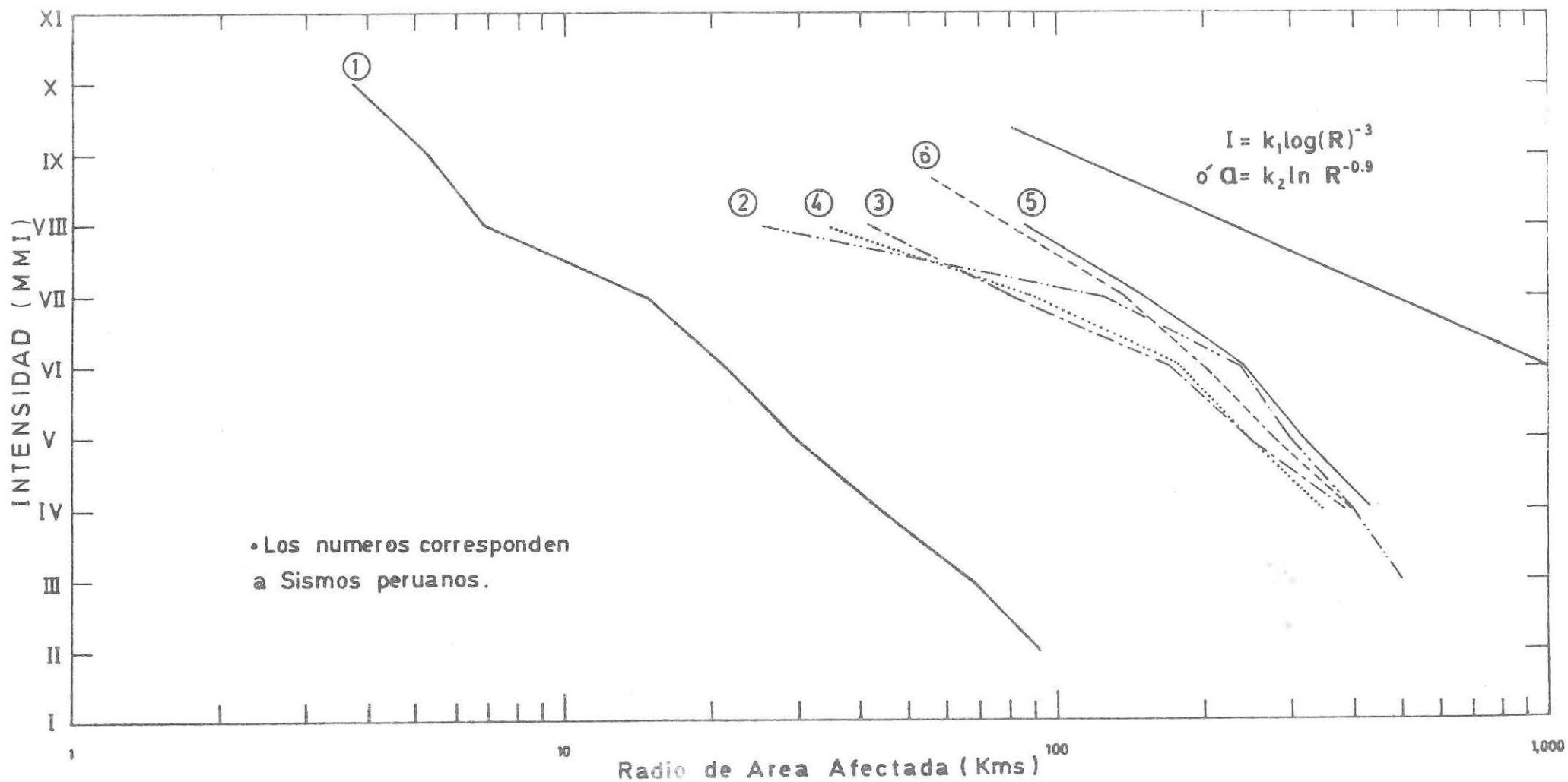


Figura 7 Relación entre Intensidades (MMI) y Distancia Epicentral.  
 Evaluación de la pendiente de la Curva de Atenuación de Aceleraciones,  
 a través de las Intensidades (MM)

Fig. 8 Riesgo Sísmico en términos de Aceleración Máxima del Suelo.

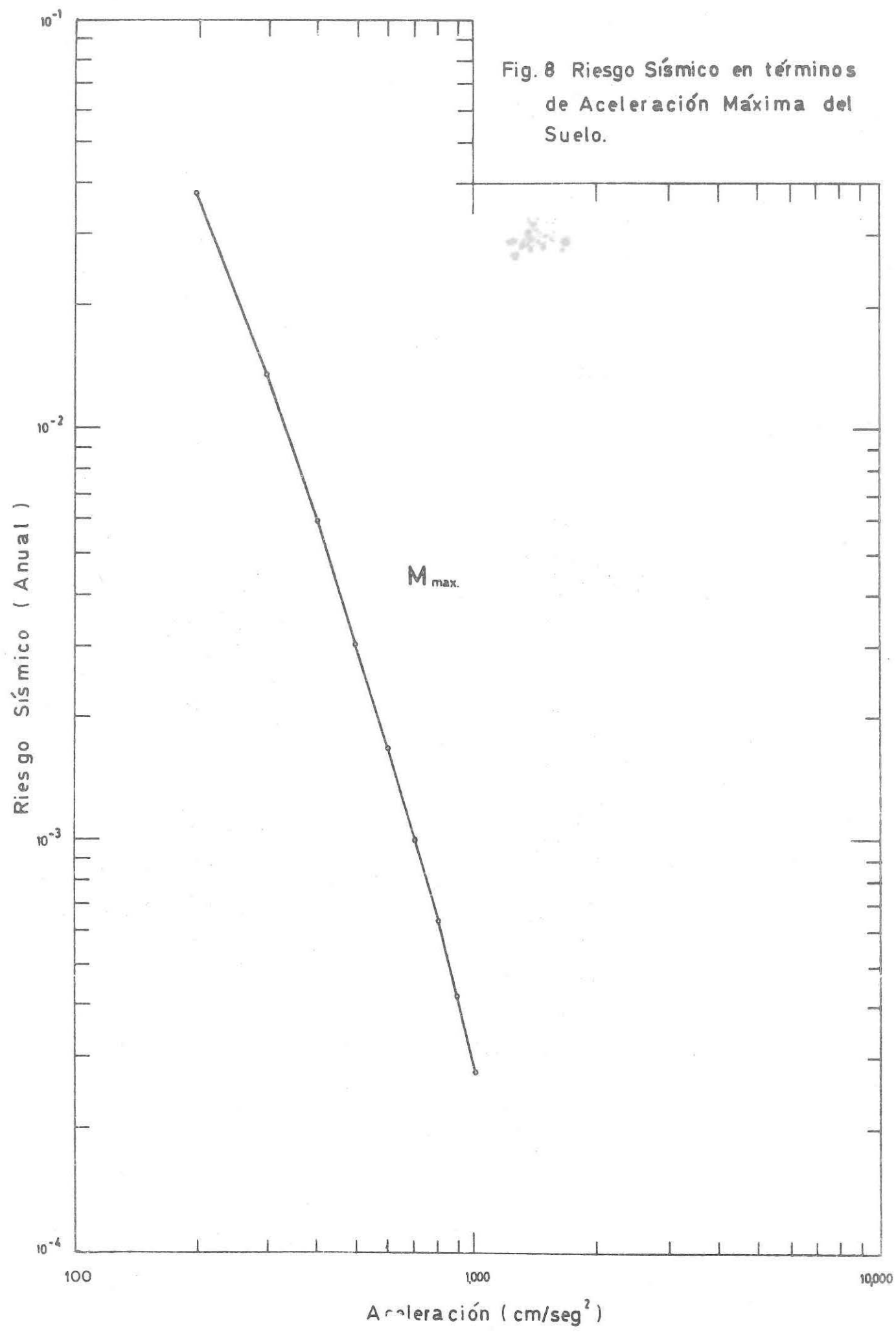
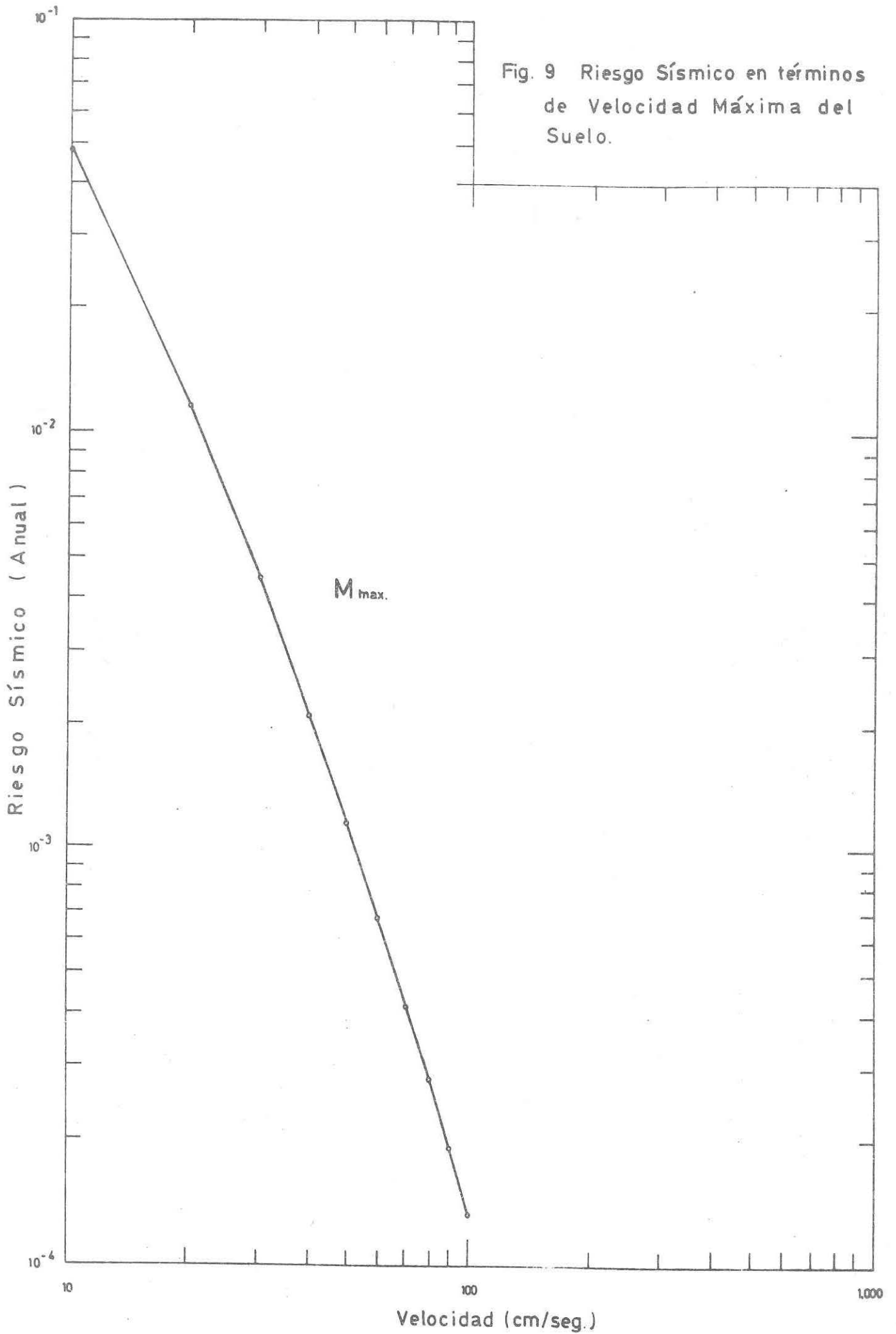


Fig. 9 Riesgo Sísmico en términos de Velocidad Máxima del Suelo.



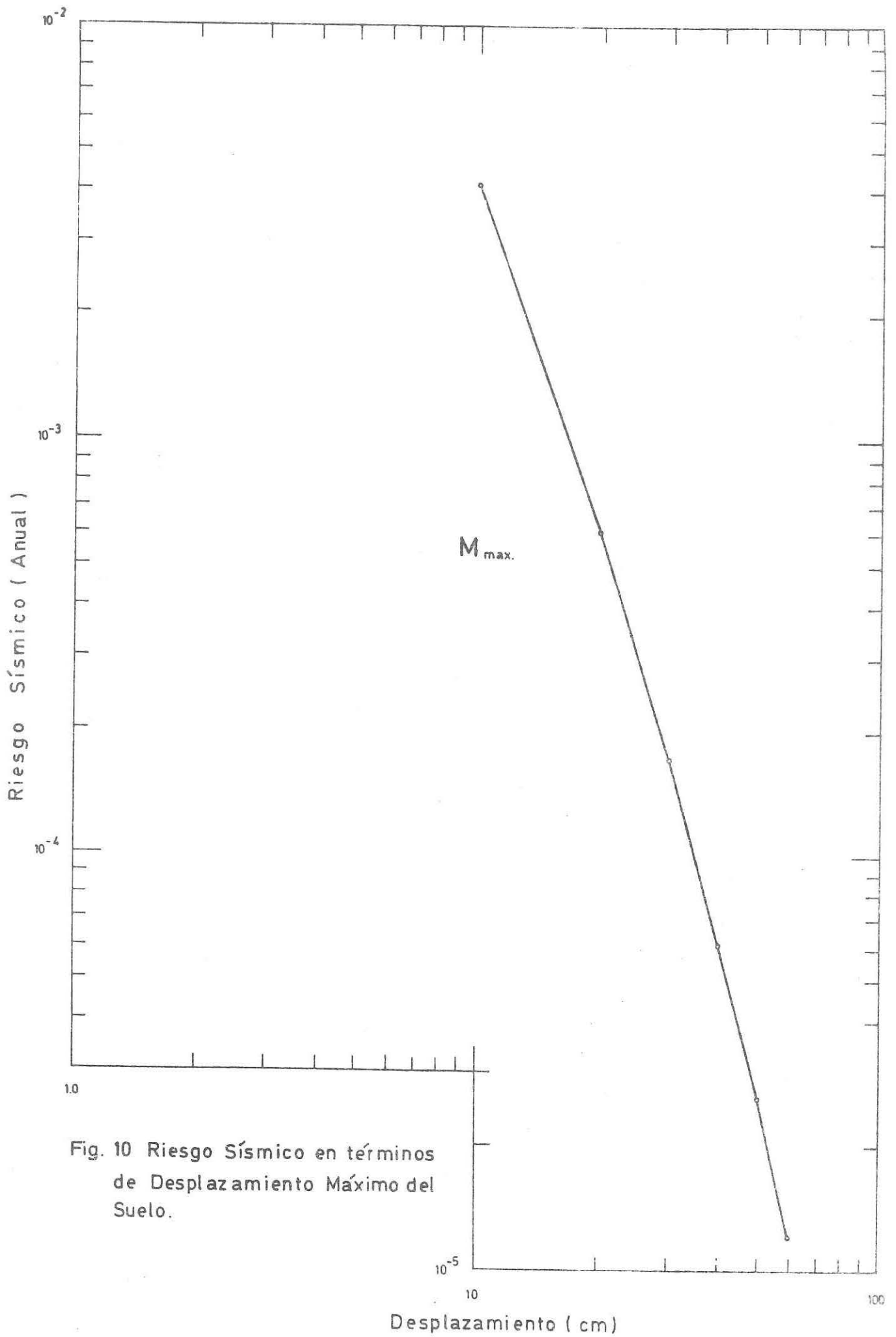


Fig. 10 Riesgo Sísmico en términos de Desplazamiento Máximo del Suelo.

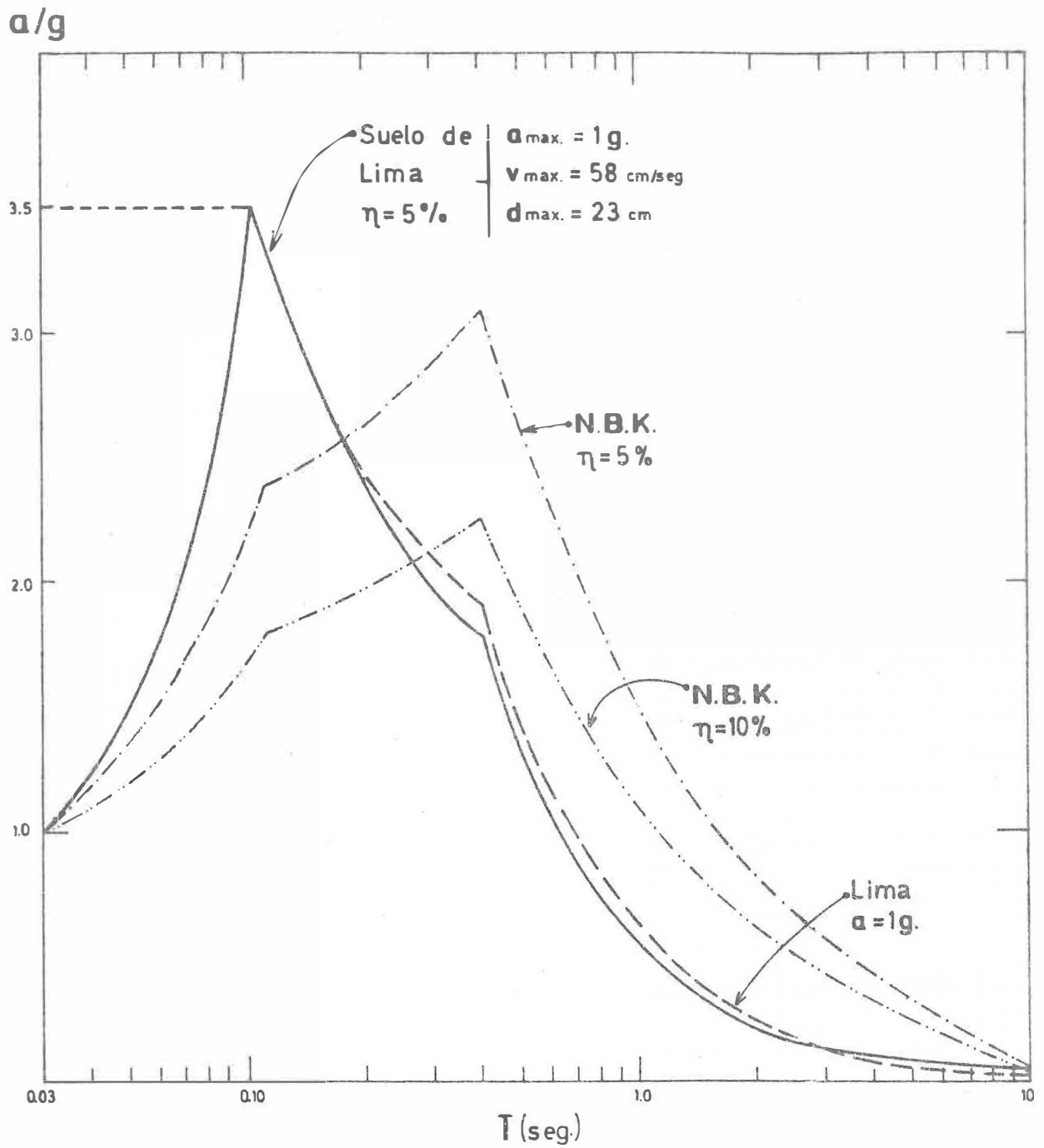


Figura 11 Comparación de Espectros normalizados,  $\ddot{u}_g = 1g., (m+\sigma)$