

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

MODELO DE GENERACION DE TEMBLORES DE SUBDUCCION

HAN PING HONG

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE

POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER

EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERIA

(ESTRUCTURAS)

CIUDAD UNIVERSITARIA

1 9 8 8 .

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

- I. INTRODUCCION
 - II. MODELOS MATEMATICOS EXISTENTES
 - 2.1 Introducción
 - 2.2 Modelos basados en procesos estocásticos
 - 2.3 Modelos físicos
 - 2.4 Discusión
 - III. MODELO DE CELDAS
 - 3.1 Introducción
 - 3.2 Modelo de celdas
 - 3.3 Resultados de la simulación
 - IV. ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACION
 - V. CONCLUSIONES
 - VI. REFERENCIAS
- TABLAS Y FIGURAS
- APENDICE

I INTRODUCCION

En el problema de diseño sísmico, cualquier intento racional para solucionarlo debe apoyarse en una descripción probabilista de las variables que intervienen (1,2). Destacan los parámetros de los temblores futuros. Estos parámetros abarcan valores susceptibles de medición ulterior directa, como la aceleración, velocidad o desplazamiento máximo del terreno durante el sismo; valores subjetivos, como la intensidad en la escala de Mercalli modificada, o valores inferidos como la magnitud y la distancia focal al sitio de interés.

Si los datos estadísticos fueran abundantes para un sitio específico, sería posible emplear métodos estadísticos tradicionales para describir las distribuciones de probabilidad de los parámetros mencionados. Sin embargo, la cantidad de datos disponibles en cada región es invariablemente precaria. Ello obliga a emplear métodos menos ortodoxos así como a limitarse al análisis de un número modesto de parámetros. Por ello es frecuente analizar solo dos parámetros tales como la tasa de excedencia y la magnitud para describir la sismicidad de una región. La complejidad de los fenómenos generadores de sismos apunta a la conveniencia de acudir a modelos de simulación de la ocurrencia de temblores para esta descripción. En la literatura se hallan varios modelos matemáticos. Los modelos matemáticos se clasifican en dos tipos : físicos y estadísticos.

Dada la magnitud de las incertidumbres asociadas con la ocurrencia de temblores, procede que el fenómeno se simule mediante un proceso estocástico. Para ello se puede partir de la investigación estadística de las funciones de momentos, y con base en ellas construir un modelo de un proceso aleatorio apropiado; una alternativa basada en la semejanza de este fenómeno con otros fenómenos físicos supone una distribución de probabilidad del tiempo de llegada entre eventos sísmicos sucesivos y una probabilidad de transición de un estado a otro. (Por ejemplo, el estado se define como un intervalo de magnitud de los temblores). Sin embargo, para una determinada región los datos estadísticos asociados a temblores de gran magnitud son escasos, y por lo tanto de poca utilidad en la definición de las funciones de distribución a partir de los momentos, y en consecuencia en la construcción de un modelo adecuado del proceso aleatorio.

Los modelos más empleados para la simulación numérica de la ocurrencia de los temblores son: de masa-resorte de Burridge y Knopoff (3), y de asperezas de Kanamori (4). El modelo de masa-resorte da la secuencia de réplicas que se aproxima a la ley empírica de Omori y la casi periodicidad de los eventos de gran magnitud. En el modelo de asperezas, Kanamori supone que existen dos poblaciones de resistencia según el tipo de celda; así logra simular el patrón de la sismicidad antes de la ocurrencia de los temblores grandes.

El presente trabajo se organiza de la manera siguiente:

En el capítulo II se hace un resumen de los modelos estocásticos típicos más empleados en la literatura. Estos modelos idealizan la ocurrencia de temblores como un proceso estocástico, eligiéndose tal proceso como de Poisson, Markov, semi-Markov o de renovación. Los modelos físicos mencionados anteriormente también se presentan en este capítulo.

En el capítulo III se presenta un estudio exploratorio de un modelo matemático para la simulación de la ocurrencia de los temblores de subducción. Dicho modelo se basa directamente en consideraciones físicas. En él, la fuerza de fricción entre la placa y el manto por la corriente de convección y la fuerza de empuje del magma se representan mediante un elemento amortiguador; se idealiza el comportamiento de las placas como viscoelástico, y se representa la superficie potencial de ruptura como un conjunto de celdas con fricción que varía con el tiempo. Los resultados de la simulación de la ocurrencia de los temblores al variar los parámetros de este modelo también están mostrados en este capítulo, lográndose reproducir los siguientes fenómenos: la casi periodicidad de los macrosismos, los intervalos de quietud sísmica y la casi ausencia de temblores en cierto intervalo de magnitudes.

En el capítulo IV se analizan los resultados simulados, para encontrar la distribución de probabilidades de la ocurrencia de los temblores en función del tiempo y la magnitud.

Finalmente en el capítulo V, del análisis de los resultados, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la utilización del modelo propuesto.

* Entendiéndose la casi periodicidad de los macrosismos como el tiempo entre estos eventos fluctúa alrededor de un valor medio.

II MODELOS MATEMATICOS EXISTENTES

2.1 Introducci3n

En este capitulo se describir3n algunos modelos t3picos empleados en la simulaci3n de la ocurrencia de temblores. En estos modelos se supone la generaci3n de sismos en una zona dada de la corteza terrestre como un proceso estoc3stico. Ordinariamente se elige tal proceso como uno de Poisson, Markov, semi-Markov o de renovaci3n (ap3ndice A). Cualquiera que sea el tipo del modelo, es posible aplicarle estadística bayesiana (ap3ndice A) para dar origen a un procedimiento formal de an3lisis mediante el cual se incorpora la informaci3n proveniente de datos estadísticos. En este capitulo tambi3n se presentan los modelos f3sicos m3s empleados en la actualidad, tales como el de masa-resorte (3) y el de asperezas (4).

2.2 Modelos basados en procesos estoc3sticos

2.2.1 Proceso de Poisson

La semejanza de la ocurrencia de temblores con otros fen3menos induce a proponer la hip3tesis de que la ocurrencia de temblores se puede simular mediante un proceso de Poisson, en el sentido de que el promedio de los n3meros de sismos por unidad de tiempo en un intervalo dado de magnitud y en una zona dada mantiene un mismo valor a lo largo del tiempo y es independiente de la historia s3smica previa. De acuerdo con esto, se tiene

$$P_t(n) = (\lambda t)^n \exp(-\lambda t) / n! \quad 2.1$$

donde $P_t(n)$ denota la probabilidad de que ocurran n temblores de magnitud mayor o igual que alg3n valor M en una zona y en un intervalo t ; λ el promedio del n3mero de sismos por unidad de tiempo que se originan en esta zona con magnitud mayor o igual a M .

Con esta suposici3n Cornell (5) propuso un modelo para evaluar el riesgo s3smico en un sitio dado. Presenta resultados en t3rminos de los par3metros de movimiento, como la aceleraci3n m3xima vs el promedio de periodo de ocurrencia. Asigna una distribuci3n exponencial a M . Ello se basa en la relaci3n que hay entre la magnitud M y el n3mero n de temblores con magnitud mayor que un valor M dado, relaci3n que se conoce con el nombre de Gutenberg-Richter (6):

$$\ln n = a - bM \quad 2.2$$

Aqu3 a y b son constantes.

Físicamente la magnitud de los temblores no puede exceder de algún límite. En un trabajo posterior, Cornell y Vanmarcke (7) asignaron a M una distribución exponencial truncada. Así, si M_0 y M_u denotan la magnitud mínima y máxima de los temblores que pueden ocurrir, entonces la función de distribución de probabilidad de la magnitud resulta ser

$$F_M(m) = P(M < m \mid M_0 \leq m \leq M_u) \quad 2.3$$

$$= (1 - \exp(-b(m-M_0)) / (1 - \exp(-b(M_u - M_0))))$$

y su función de densidad de probabilidades correspondiente es

$$f_M(m) = b \exp(-b(m-M_0)) / (1 - \exp(-b(M_u - M_0))) \quad 2.3a$$

Para la estimación de la intensidad de un temblor, con base en el modelo anterior, Der Kiureghian y Ang (8) propusieron un modelo de falla-ruptura. En él se supone que la intensidad en un sitio dado es función de la distancia de falla al sitio de interés y de la longitud de ruptura s , que es una función de la magnitud del temblor,

$$s = \exp(\alpha M - \beta) \quad 2.4$$

donde α y β son constantes.

Otro tipo de modelo estadístico, conocido con el nombre de "modelo disparador", es el desarrollado por Vere-Jones y Davis (9). En él consideraron las siguientes hipótesis:

- 1) el evento inicial (evento disparador) ocurre como un proceso de Poisson
- 2) el grupo de eventos es disparado por el evento inicial
- 3) los tamaños de los grupos son independientes entre sí y están idénticamente distribuidos
- 4) la probabilidad de que un evento ocurra en un tiempo t después de un evento disparador es controlado por alguna distribución

2.2.2 Proceso de Markov

Basados en la hipótesis de que la ocurrencia de temblores se puede presentar mediante un proceso de Markov, Knopoff (10) desarrolló un modelo. En este se consideran tres funciones de probabilidades: $P(W,t)dt$, $G(W)dt$ y $T(W|X)$. La primera está asociada a la cantidad de energía, W , acumulada en el intervalo W a $W+dW$ en el instante t ; la segunda está relacionada con la ocurrencia de un temblor para un valor W , en el intervalo t a $t+dt$; la tercera representa la probabilidad condicional de que dado que el estado de energía está en el nivel X , ocurra un temblor y el estado de energía se modifique a

valores dentro de intervalo W a $W+dW$, $W < X$. Empleando estas funciones, Knopoff dedujo la siguiente ecuación:

$$G(W)P(W,t) + \alpha \frac{\partial P(W,t)}{\partial W} + \frac{\partial P(W,t)}{\partial t} = \int_W^{W_{\max}} P(x,t)G(x)T(W|x) dx \quad 2.5$$

donde α es una constante que mide la velocidad del incremento de energía y W_{\max} es la energía máxima que se puede acumular en la falla considerada. Si la función $P(W,t)$ es independiente del tiempo la ecuación anterior se transforma en

$$G(W)P(W) + \alpha \frac{\partial P(W)}{\partial W} = \int_W^{W_{\max}} P(x)G(x)T(W|x) dx \quad 2.6$$

donde $P(W)$ denota la función $P(W,t)$ que es independiente de tiempo.

En la expresión anterior, las tres funciones P , G y T son desconocidas. Si se asignan dos de estas funciones de probabilidad mencionadas, resolviendo la ec 2.6 se puede conocer la tercera. Conocidas las tres, se puede calcular el número de temblores ocurridos con la ecuación

$$n(Y) = \int_{W_0+Y}^{W_{\max}} P(x)G(x)T(x-Y|x) dx \quad 2.7$$

donde W_0 es la cantidad de energía mínima acumulada, y $n(Y)$ es el número de temblores que ocurren para la energía liberada dada igual a Y .

2.2.3 Proceso de semi-Markov

Empleando un proceso de semi-Markov, Patwardhan y coautores (11) desarrollaron un modelo para la evaluación de la ocurrencia de temblores. En él se subdivide la escala de magnitudes de temblores en intervalos apropiados con el objeto de definir un estado discreto para este proceso. Para una zona dada y un periodo de interés específico, el procedimiento de cálculo de la probabilidad de ocurrencia de temblores con diferentes magnitudes sigue los pasos que a continuación se anotan:

- 1) se definen el estado y la escala de tiempo para el proceso
- 2) en términos de la magnitud del temblor último y del tiempo transcurrido desde este, se define la condición inicial de la sismicidad de la zona considerada
- 3) con base en la evaluación de la información histórica y geológica de la sismicidad se asigna una probabilidad de transición y una distribución de tiempo de espera
- 4) se calculan las probabilidades de la ocurrencia de temblores de

diferentes magnitudes durante el periodo de tiempo considerado.

2.2.4 Proceso de renovación

Mediante la suposición de que la ocurrencia de temblores es un proceso de renovación, Savy et al (12) propusieron un modelo en el cual consideran la relación entre deformación acumulada y los eventos respectivos. Suponen que la función de densidad de probabilidad de la llegada entre dos eventos sucesivos es del tipo de Weibull también conocida como distribución de valores extremos tipo III, la que se expresa como

$$f_T(t) = \nu \gamma t^{\gamma-1} \exp(-\nu t^\gamma) , \gamma > 1 \quad 2.8$$

donde ν y γ son parámetros. (Para $\gamma = 1$ la distribución se transforma en una exponencial).

La función de riesgo $h(t)$ de la distribución de Weibull tiene la forma

$$h(t) = f_T(t) / (1 - F_T(t)) = \nu \gamma t^{\gamma-1} \quad 2.9$$

que es creciente con el tiempo para $\gamma > 1$.

En este modelo se utilizan segmentos de magnitud mutuamente excluyentes para describir el espacio de estados discreto. Se considera que cada segmento de magnitud se asocia a un evento particular y a una probabilidad de llegada. Para la generación de los eventos (la ocurrencia de temblores) se emplea la técnica de simulación.

Con base en la hipótesis de corrimiento predecible (13), se postula que el esfuerzo inicial es una constante mientras que el esfuerzo final no lo es (fig 2.1), y la hipótesis de que el proceso de la ocurrencia de temblores es un proceso de renovación, Kiremidjian y Anagnos (14) propusieron un modelo, conocido como el modelo estocástico de corrimiento predecible. En él, el espacio de estados es discreto y el tiempo como un parámetro continuo del proceso. El espacio de estados discreto se define por medio de los parámetros del temblor tales como desplazamiento sísmico, momento sísmico, magnitud u otra medida del tamaño de los temblores.

Mediante este modelo se pueden calcular algunas cantidades de interés, como la probabilidad de la ocurrencia de algunos eventos de una magnitud dada en un periodo de tiempo específico y esta probabilidad condicional, dado que no ocurren temblores en un intervalo de tiempo. En ambos casos anteriores el tiempo se mide a partir de la ocurrencia del último temblor considerado. Además estas probabilidades se calculan suponiendo que la distribución del tiempo de llegada entre eventos sucesivos es la de Weibull, y la probabilidad de transición de un estado a otro está condicionada por el tiempo entre eventos sucesivos. Así, conociendo el tiempo de espera desde el último temblor ocurrido y la velocidad del incremento de esfuerzo puede predecirse la magnitud del temblor que ocurrirá.

Aceptando la hipótesis de tiempo predecible (13), se postula que el esfuerzo inicial varía mientras que el esfuerzo final permanece constante (fig 2.2). Usando el proceso estocástico del modelo anterior, Anagnos y Kiremidjian (15) formularon un nuevo modelo, conocido como el modelo estocástico de tiempo predecible. En él se supone que la velocidad del incremento de esfuerzo es una constante y que el tamaño del temblor está caracterizado por la caída de esfuerzos. Así, conociendo el tamaño del temblor último se puede predecir cuándo ocurrirá el siguiente evento.

En su modelo, el espacio de estados discreto se define de igual forma que en el modelo anterior y se acepta una distribución exponencial truncada para la magnitud del temblores y la distribución de Weibull para el tiempo de espera entre eventos sucesivos. De estas dos distribuciones se obtiene la probabilidad de transición de un estado a otro y la función de densidad de probabilidad del tiempo de espera, respectivamente.

Al considerar el fenómeno de la dependencia espacial de la ocurrencia de temblores, se idealiza la localización del epicentro del siguiente evento como una variable aleatoria que depende del tamaño y localización del temblor previo. Para esta variable aleatoria se emplea el modelo descrito anteriormente, suponiendo que el estado del espacio discreto está definido mediante el esfuerzo y la localización de la falla en lugar del esfuerzo solamente; además se propone que la localización del epicentro del siguiente evento ocurrirá en el sitio del esfuerzo máximo sobre la falla. La función de distribución de probabilidades de la variable tiene la forma mostrada en la fig 2.3.

2.2.5 Aplicación de la estadística bayesiana

Los modelos de la simulación de la ocurrencia de temblores hasta aquí presentados en este capítulo se basan en las suposiciones de los procesos estocásticos, las distribuciones de probabilidades del tiempo de espera de los eventos sucesivos y las distribuciones de probabilidades de la magnitudes del los temblores. Para incorporar la información proveniente de datos estadísticos, Esteva (2) empleó la técnica de la estadística bayesiana, dando así un tratamiento formal de análisis y obteniendo los parámetros de la distribución a posteriori del proceso estocástico. En su trabajo parte de la hipótesis de que el número de temblores que ocurren en una zona dada y cuyas magnitudes exceden al valor M , se representa mediante un proceso de Poisson de parámetro λ desconocido. La distribución conjugada natural es gamma. Esto es:

$$f'(\lambda) = \exp(-\lambda t') (\lambda t')^{n'-1} t' / \Gamma(n') \quad 2.10$$

donde n' y t' son los parámetros de la distribución a priori $f'(\cdot)$. Para esta distribución la media y el coeficiente de variación de λ están dados por n'/t' y $n'^{-1/2}$, respectivamente.

Si en un lapso t se observan n temblores cuyas magnitudes son mayores o iguales a M , la distribución a posteriori $f''(.)$ está dada por la expresión anterior excepto que en lugar de primas aparecen biprimas, siendo $n'' = n' + n$ y $t'' = t' + t$.

La elección de la distribución conjugada natural se justifica por la sencillez de su tratamiento. Además con tal elección la distribución a posteriori tiene la misma forma funcional que la inicial (16), lo que normalmente se debe cumplir a menos que haya razones para asignar otra forma de distribución a priori, ya que cuando no es este el caso la forma de la distribución no debe depender del instante en que se asigna.

Por lo tanto, si se acepta la hipótesis de que $\ln n$ y M están relacionados linealmente (ec 2.2), empleando esta técnica y los datos observados se pueden obtener las constantes para esta relación lineal.

En un artículo de Rosenblueth (17) y uno de Rosenblueth y Ordaz (18) se presenta un procedimiento mejorado para la descripción de la sismicidad. Los trabajos consisten en definir la forma de la curva de la tasa de excedencia vs las magnitudes con diversos procesos, y con base en la distribución conjugada natural de estos procesos obtener los parámetros posteriores. De esta manera se supera la suposición de que la distribución de magnitudes es de forma exponencial o exponencial truncada. También se presenta un procedimiento para incorporar las informaciones estadísticas provenientes de regiones tectónicamente similares. Para la incorporación de ésta se emplea la distribución multinomial beta, también conocida como distribución de Dirichlet.

2.3 Modelos físicos

2.3.1 Modelo de masa-resorte

En el artículo de Burridge y Knopoff (3) se describe el movimiento de masas conectadas en serie por resortes sobre una superficie horizontal rugosa (fig 2.4). Una de las masas externas de la serie está conectada por un resorte y un hilo indeformable. Moviéndolo con una velocidad constante este último, se genera una fuerza en el primer resorte. Cuando esta fuerza aplicada a la primera masa vence la fricción estática se produce un desplazamiento de la masa y se alarga el siguiente resorte. De igual manera se producen los desplazamientos de todas las masas que están conectadas entre sí. Al considerar cada desplazamiento de las masas como un evento, y su magnitud como dependiente del número de masas desplazadas, la frecuencia de la magnitud depende del tipo de fricción supuesta en la superficie rugosa.

Usando este modelo físico, con resortes tanto de longitud cons-

tante como variable y mediante pruebas en el laboratorio se obtuvieron los resultados que se muestran en las figs 2.5a y 2.5b. Aunque en apariencia el modelo de laboratorio es satisfactorio, no da origen a series típicas de réplicas.

Con base en este modelo físico, Burridge y Knopoff construyeron su modelo matemático (fig 2.6), en que al aplicar la segunda ley de Newton o establecer la ecuación de energía se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden. Por la consideración de que la fricción en la superficie de contacto depende de la velocidad del movimiento dicho sistema de ecuaciones no es lineal. Al tomar el cuerpo superior moviéndose con una velocidad constante, los resultados simulados muestran la casi periodicidad de los temblores de gran magnitud, y la secuencia de las réplicas se puede aproximar con cualquiera de las dos expresiones siguientes:

$$N = 1 / (0.3 + 0.016t) \quad 2.11$$

$$N = 23 \exp(-0.15t) \quad 2.12$$

donde N es el número de réplicas en el tiempo t contado desde el evento principal. La forma de la ec 2.11 fue sugerida por Omori.

Al emplear el modelo de Burridge y Knopoff, y la ley de fricción introducida por Stuart (19,20), que está dada por

$$\tau = s \exp(-((\omega - \omega_0)/a)^2) \quad 2.13$$

donde τ es la fricción, ω es el deslizamiento en la falla, y s , ω_0 y a son constantes, Cao y Aki (21) establecieron las siguientes ecuaciones de equilibrio:

$$F_i = \sum_{j=i-1}^{i+1} K_{ij} x_j + L_i v t \quad i \in [1, N] \quad 2.14$$

donde F_i es la fuerza aplicada en la i -ésima masa, K_{ij} y L_i son las constantes que dependen de la rigidez de los resortes y rigidez de la placa, x_i el desplazamiento, v la velocidad de movimiento del cuerpo superior y t el tiempo.

Para resolver este sistema de ecuaciones diferenciales se supone que si la fuerza aplicada a la i -ésima masa es menor que la fricción estática se emplea

$$F_i = A_i s_i \exp(-((\omega_i - \omega_0^i)/a_i)^2) \quad 2.15$$

y si la fuerza aplicada es mayor que la fricción estática se utiliza

$$F_i = m_i x_i + R_i \quad 2.16$$

donde A_i , s_i , ω_0^i y a_i son constantes, m_i es la masa de elemento i , x_i es la aceleración del elemento i y R_i es una fracción de fricción estática del elemento i .

Se considera que ocurre inestabilidad cuando $K_f^i > K_p^i$, donde

$$K_f^i = \partial \tau / \partial \omega_i \quad 2.17$$

$$K_p^i = \partial (F_i/A_i) / \partial \omega_i = \partial (F_i/A_i) / \partial x_i \quad 2.18$$

2.3.2 Modelo de asperezas

La forma complicada de las ondas sísmicas observadas sugiere que el plano de falla es irregular en su geometría y en su propiedades mecánicas. Así, la resistencia en la zona de contacto entre los lados de la falla en algunas áreas será mayor que en el resto. Las áreas de alta resistencia causada por la geometría o por otras propiedades suelen llamarse asperezas. Acordemente Kanamori (4) propuso un modelo para la simulación de la ocurrencia de temblores. En él se supone que:

- 1) la resistencia del plano de falla tiene distribución normal con media \bar{s} y desviación típica Σ
- 2) la resistencia de cada aspereza tiene distribución también normal pero con media \bar{s}_a y desviación típica Σ_a (fig 2.7)
- 3) la carga varía linealmente con respecto al tiempo:

$$\sigma_0 = \sigma_{00} + \alpha t$$

donde σ_{00} y α son constantes, y σ_0 es la carga

- 4) en la plaqueta (elemento de la superficie de falla) i, j obra una carga $\sigma(i, j)$,

$$\sigma(i, j) = \sigma_0 (1 / (1 - l/N)) / (1 + c(l/N) / (1 - l/N)) \quad 2.19$$

donde N es el número total de plaquetas, l es el número de plaquetas que han fallado y c es una constante.

La secuencia esquemática de la ocurrencia de temblores, de acuerdo con este modelo, se muestra en la fig 2.8.

2.4 Discusión

El suponer que la ocurrencia de temblores se puede simular mediante un proceso de Poisson, hipótesis que conduce a una distribución exponencial para el tiempo de llegada entre dos eventos sucesivos, implica que la función de riesgo no depende del tiempo (veáse apéndice A). De hecho la ocurrencia de temblores de magnitudes grandes tiene cierta periodicidad, lo que implica que la función de riesgo para estos temblores sí depende del tiempo. Por lo tanto, si la duración del tiempo de quietud en una zona dada es pequeña, los

modelos que implican esta suposición sobrestiman el riesgo, mientras que si esta es grande, tales modelos lo subestiman.

Por otra parte la suposición de que la magnitud de los temblores tiene una distribución exponencial o exponencial truncada suministra una tasa de excedencia que obedece a la relación de Gutenberg-Richter, o de la siguiente forma:

$$\lambda \propto \exp(-bM) - \exp(-bM_u) \quad 2.20$$

Sin embargo, los datos observados a lo largo de la costa del Pacífico de México presentan una ausencia de temblores de magnitudes 6.7 a 7.3 (fig 2.9 (22)). Por tanto la suposición de una distribución exponencial o una exponencial truncada para la magnitud de los temblores no es adecuada para dicha zona.

Con la hipótesis de que la ocurrencia de temblores se puede representar mediante un proceso de Markov, el modelo desarrollado por Knopoff (10) es elegante en su formulación matemática. Sin embargo, no se cuenta en la actualidad con suficiente información para poder asignar dos de las tres funciones de distribución P, G y T. (ec 2.6)

Los modelos de simulación de temblores, con la suposición de que los intervalos entre eventos sucesivos poseen distribución de probabilidades de Weibull superan la objeción de la distribución exponencial, ya que hacen factible tener en cuenta que la función de riesgo depende del tiempo, y si $\gamma > 1$ esta función de riesgo es creciente en el tiempo (véase la ec 2.9), lo cual es congruente con el concepto de que el riesgo se incrementa con el esfuerzo acumulado y que los grandes temblores ocurren de manera grosso modo periódica.

Ahora, como se observa en la fig 2.10 (23), que muestra el corrimiento acumulado de los temblores grandes en la costa del Pacífico de México vs el tiempo, es difícil aceptar o rechazar la hipótesis de tiempo predecible o la de corrimiento predecible en su formulación original. Sin embargo, al emplear la hipótesis de corrimiento predecible se implica que el tamaño de evento presente depende del tiempo de espera desde el evento previo, y al emplear la hipótesis de tiempo predecible se implica que el tiempo de espera al siguiente evento depende del tamaño del evento presente. Por tanto, el modelo basado en la primera hipótesis mencionada no predice la ocurrencia de eventos precursoros, mientras que el modelo basado en la segunda no predice las réplicas.

Los modelos puramente estocásticos de simulación de la ocurrencia de temblores carecen de fundamentación física. Es por ello que es necesario formular un modelo matemático que parta de un modelo conceptual físico y reconozca así los aspectos fundamentales del proceso generador de sismos de origen tectónico.

El modelo de masa-resorte de Burridge y Knopoff constatado en el laboratorio, arroja secuencias de réplicas que se aproximan a la ley empírica de Omori. Para lograr un modelo aún más realista, que refleje otras características de la estadística de temblores, ha de

reconocerse que el movimiento de las placas es provocado principalmente por las corrientes de convección del manto y la salida de magma por las cordilleras mezoceánicas, y que ambos procesos se pueden idealizar como trasmisión de esfuerzo cortante en un medio viscoso. Por consiguiente es inadecuada la suposición de que el movimiento del soporte (fig 2.6 , cuerpo superior) tiene velocidad constante.

En el modelo de asperezas, Kanamori (4) supone que existen dos distribuciones de resistencias según el tipo de plaqueta, las cuales fallan respectivamente en el periodo del grupo de precursores y en el periodo de ruptura principal. Sin embargo, parece arbitraria - excesivamente ad hoc - la hipótesis de que hay dos poblaciones de resistencia y por tanto una distribución bimodal de las resistencias. Por ejemplo, se observa de los datos estadísticos de pruebas de laboratorio que la resistencia de la roca tiene la forma unimodal (fig 2.11 (26))* , y no de la forma bimodal (fig 2.7b). Además, este modelo solamente tiene en cuenta los precursores y no puede modelar el periodo completo de la ocurrencia de temblores (entendiéndose por periodo completo de la ocurrencia de temblores el tiempo transcurrido entre dos eventos principales sucesivos en una zona dada de la corteza terrestre).

* Cabe mencionar que los datos tomados de esta referencia corresponden a un conjunto de muestras obtenidas a partir de pruebas de carga axial.

III MODELO DE CELDAS

3.1 Introducción

Conforme a los datos empíricos de los temblores de subducción ocurridos en la costa del Pacífico de México, la tasa de excedencia tiene la forma mostrada en la fig 3.1 (17); (también veáanse las figs 2.9 y 3.2). Esta curva no sigue la relación de Gutenberg-Richter ni tiene la forma de la ec 2.20.

Por otra parte, al dibujar los datos empíricos de la tabla 3.1, tomados de la ref 25, de los temblores ocurridos de 1900 a 1986 a lo largo de la costa oceánica de México, con magnitud mayor o igual que 7.0 y profundidad menor o igual a 65 km, no se observa una tendencia clara de correlación espacial (figs 3.3a y 3.3b). En la fig 3.3b, las abscisas y las ordenadas representan el tiempo y la distancia entre dos eventos sucesivos, respectivamente. Si se supone que la distancia desde cualquier punto de la costa oceánica de México a la ciudad de México es una constante, entonces, el problema de distribución espacial pierde importancia, sobre todo si no se tienen cuenta los efectos de trayectoria y de directividad, los cuales son aún de difícil y debatible cuantificación. Por lo tanto, el presente trabajo se concentrará en el problema de distribución temporal. Se tratará de encontrar un modelo matemático que pueda general eventos cuya tasa de excedencia tenga la forma mostrada en la fig 3.1 y que reproduzca adecuadamente la casi periodicidad de los temblores característicos, las secuencias de temblores precursoros y de réplicas y la presencia de intervalos de quietud. Dicho modelo deberá incorporar consideraciones físicas sobre fenómeno de la generación de temblores. Lo llamaremos "modelo de celdas".

3.2 Modelo de celdas

Los temblores de subducción en México son debidos al movimiento relativo entre las placas oceánicas de Cocos y Rivera y las placas de Norteamérica y del Caribe (fig 3.4).

Para modelar el movimiento de las placas se considerará que la roca responde viscoelásticamente ante una fuerza de corta duración, pero que sus deformaciones ante fuerzas sostenidas crecen en función del tiempo, sin tender a infinito, y que el movimiento relativo entre dos placas tiene una velocidad constante. El modelo más simple que exhibe este comportamiento se muestra en la fig 3.5. Por otra parte, el movimiento de la placa es debido a la fuerza de fricción en un medio viscoso, generada entre la placa y el manto por la corriente de convección y la fuerza de empuje del magma, que sale por las cordilleras mesooceánicas, y que aún se halla en estado viscoso. Ambos fenómenos pueden idealizarse como la deformación de un amortiguador lineal. Entonces, el modelo queda presentado en la fig 3.6a. Además, si se discretiza el área de contacto en N celdillas o pláquetas, se obtiene el modelo mostrado en la fig 3.6b, donde el primer amortiguador representa la transferencia de esfuerzos cortantes del manto a placas de la corteza terrestre, principalmente por corriente de convección; el segundo amortiguador y el primer resorte en

peralelo junto con el resorte en serie son empleados para modelar el comportamiento de las placas; y el área de contacto se modela mediante las celdas y resortes conectados a los elementos anteriores. Para este modelo, al postular que la velocidad de empuje (velocidad de la corriente de convección y de la salida de magma) es una constante v , es posible establecer las siguientes ecuaciones de equilibrio

$$D_0 \frac{d}{dt}(vt - x_1) = D_1 \frac{d}{dt}(x_1 - x_0) + K_1(x_1 - x_0) \quad 3.1$$

$$D_1 \frac{d}{dt}(x_1 - x_0) + K_1(x_1 - x_0) = K_2'(x_0 - x) \quad 3.2$$

$$K_2'(x_0 - x) = \sum_{i=1}^N K_{ci}(x - x_{0i}) \quad 3.3$$

donde K_1 , K_2' y K_{ci} ; $i = 1, \dots, N$, son las constantes de los resortes; D_0 y D_1 son las constantes de los amortiguadores; x , x_0 y x_{0i} ; $i = 1, \dots, N$, son los desplazamientos (fig 3.6b). Al hacer (21)

$$K_{ci} = K_{cj} = K \quad i, j \in [1, N]$$

$$L_{ci} = L_{cj} = L \quad i, j \in [1, N]$$

$$L_{c0} = L_{cN}; \quad x_{00} = x_{0N}$$

$$L_{c(N+1)} = L_{c1}; \quad x_{0(N+1)} = x_{01}$$

3.4

donde L_{ci} ; $i = 1, \dots, N$, son las constantes de los resortes de placa (fig 3.6b), se obtiene la fuerza F_i aplicada en la celda, que está dada por la expresión

$$F_i = K(x + \alpha_1(x_{0i-1} + x_{0i+1}) - (1 + 2\alpha_1)x_{0i}) \quad 3.5$$

donde $\alpha_1 = L/K$. De la ec 3.3 se obtiene

$$x = (x_0 + \alpha \sum_{i=1}^N x_{0i} / N) / (1 + \alpha)$$

donde $\alpha = NK/K_2'$, y al sustituir en la ec 3.2 resulta

$$K_1(x_1 - x_0) + D_1 \frac{d}{dt}(x_1 - x_0) = K_2 x_0 - K_c \sum_{i=1}^N x_{0i} \quad 3.6$$

donde $K_2 = K_2' \alpha / (1 + \alpha)$ y $K_c = K_2 / N$. Con las condiciones iniciales

$$x_0(t) |_{t=0} = 0$$

$$x_1(t) |_{t=0} = d_1$$

al resolver las ecs 3.1 y 3.6 se obtiene *

$$x_0 = h_1 (1 - \exp(r_1 t)) + h_2 (1 - \exp(r_2 t)) + h_3 (\exp(r_2 t) - \exp(r_1 t)) \quad 3.7$$

$$x_1 = \{ D_0 D_1 K_1 (D_0 v + K_c \sum_{i=1}^N x_{0i}) (\exp(r_1 t) - \exp(r_2 t)) / \sqrt{S_1} + \\ + D_0 D_1 (v D_0 D_1 + K_1 D_0 d_1 + K_c (D_0 + D_1) \sum_{i=1}^N x_{0i}) (r_1 \exp(r_1 t) - r_2 \exp(r_2 t)) / \sqrt{S_1} + \\ + S x_0 - K_c (D_0 + D_1) \sum_{i=1}^N x_{0i} - D_0 D_1 v \} / (D_0 K_1) \quad 3.8$$

donde

$$h_1 = h_{11} - K_1 K_c \sum_{i=1}^N x_{0i} / \sqrt{S_1} / r_1 \\ h_2 = (v D_0 D_1 (r_2 + K_1 / D_1) + K_1 K_c \sum_{i=1}^N x_{0i}) / \sqrt{S_1} / r_2$$

$$h_3 = (K_1 D_0 d_1 + K_c (D_0 + D_1) \sum_{i=1}^N x_{0i}) / \sqrt{S_1} \quad 3.9$$

$$S_1 = S^2 - 4 D_0 D_1 K_1 K_2$$

$$S = K_1 (D_0 + D_1) + D_1 K_2$$

$$r_1 = (-S + \sqrt{S_1}) / (2 D_0 D_1)$$

$$r_2 = (-S - \sqrt{S_1}) / (2 D_0 D_1)$$

$$h_{11} = -v D_0 D_1 (r_1 + K_1 / D_1) / \sqrt{S_1} / r_1$$

Como las constantes de resorte y de amortiguador son positivas es fácil demostrar que S_1 es mayor que cero y que r_1 y r_2 son reales negativas. Así, se ha establecido la ley de la fuerza incrementada en función del tiempo para el modelo. Para la simulación de la ocurrencia de los temblores se postula lo siguiente:

a) El límite superior de la resistencia de cada celda tiene distribución lognormal en torno a un valor que a su vez tiene distribución lognormal:

$$R_{ij} = 100 \exp(\sigma_1 x_i + \sigma_2 x_{ij}) \quad i = 1, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots \quad 3.10$$

Aquí R_{ij} = límite superior de la resistencia de la celda i después de que ha fallado j veces; x_i, x_{ij} = números aleatorios con distribución gaussiana $N(0,1)$ no correlacionados, y σ_1 y σ_2 son constantes.

* En dicha solución se considera que x_{0i} $i=1, \dots, N$, son independientes del tiempo.

b) La resistencia en el instante t , está dada por

$$Y_{ij} = R_{ij} (1 - \beta \exp(-\gamma t^2)) \quad 3.11$$

donde β y γ son constantes positivas ($0 < \beta < 0.2$), y Y_{ij} es la resistencia en el instante t , contado desde última falla, y la i indica i -ésima celda.

c) Fallarán aquellas celdas cuya fuerza aplicada sea igual a su resistencia correspondiente en el instante considerado. Cuando ocurre una falla, la fuerza aplicada tomará 80% (21) de su resistencia, y habrá avanzado j en una unidad empleando la ec 3.10.

d) La fuerza que tomaba una celda y deja de tomar se distribuye, estableciéndose un nuevo equilibrio estático. Si con este nuevo equilibrio la fuerza aplicada en algunas celdas alcanza su resistencia, entonces también fallan estas celdas.

e) Se define el momento sísmico M_0 (en unidad arbitrarias) como la suma de las disminuciones de las fuerzas que obran en las celdas, y se define la magnitud del temblor M_s como $(2/3)\log M_0 + c$ en donde c es una constante arbitraria; esta relación se basa en la que ha formulado Kanamori (32), $M_w = (2/3)\log M_0 + c$, en que M_w es la llamada "magnitud de momento", así como en el hecho de que no parece haber una diferencia sistemática entre M_s y M_w en el intervalo de máximo interés tratándose de temblores de subducción mexicanos, si bien individualmente sí se presentan pequeñas diferencias(22).

f) Se definen las condiciones iniciales como

$$x_0(t)|_{t=0} = \sum_{i=1}^N 0.8R_{ij} / K_2 \quad ; j = 1$$

$$x_1(t)|_{t=0} = \sum_{i=1}^N 0.8R_{ij} / (1/K_1 + 1/K_2) \quad ; j = 1$$

$$x_{0i} = 0; \quad i = 1, \dots, N$$

y si en algunas celdas las fuerzas aplicadas han rebasado su resistencia, se emplea el paso d) hasta garantizar que todas las celdas tienen una fuerza aplicada menor que su resistencia en este instante.

Con base en el modelo descrito en esta sección, y variando sus parámetros, a continuación se presentarán algunos resultados obtenidos.

3.3 Resultados de la simulación

Para la simulación numérica, se toma el número de celdas igual a 5, 15 y 25 y se asignan los valores de los parámetros del modelo K , α_1 , K_2'/NK , K_1/K_2' , D_0/K_1 , D_1/D_0 , h_{11} , σ_1 , σ_2 , β y γ que se muestran en la tabla 3.2a. Con estas constantes y 25 ciclos de simulación (en-

tendiéndose por un ciclo el conjunto de eventos ocurridos entre dos eventos característicos sucesivos, definiéndose estos últimos como aquellos cuya magnitud es mayor o igual que un valor dado) los resultados obtenidos se muestran en las figs 3.7a y 3.7b y en la tabla 3.2b. En la fig 3.7a, las abscisas representan el tiempo normalizado de eventos respecto al tiempo de recurrencia del ciclo al que pertenece, y las ordenadas el porcentaje de eventos ocurridos. En la fig 3.7b la coordenada horizontal representa la magnitud y la coordenada vertical los eventos acumulados (frecuencia acumulada) normalizada. En estas figuras se muestra que empleando este modelo pueden reproducirse los fenómenos observados, que son el intervalo de quietud sísmica y la casi ausencia de temblores en cierto intervalo de magnitudes. En la tabla 3.2b se puede ver que el número promedio de los eventos ocurridos en cada ciclo aumenta al incrementar el número de celdas.

Al tomar ahora los parámetros mencionados en el párrafo anterior los valores que se muestran en la tabla 3.3a, se obtienen los resultados de simulación que se presentan en las figs 3.8 a 3.12 y en la tabla 3.3b.

En las figs 3.8a y 3.8b se observan las variaciones de la ocurrencia de los eventos en función del tiempo y de la magnitud al considerar diferentes valores de los parámetros K , K_2'/NK y K_1/K_2' . Estos resultados implican que al disminuir la rigidez (K) de las celdas o aumentar la relación K_2'/NK disminuye el número promedio de eventos ocurridos en cada ciclo; al aumentar la relación K_1/K_2' se incrementa el porcentaje de precursores.

En las figs 3.9a y 3.9b y en la tabla 3.3b están mostrados los resultados de simulación al cambiar los parámetros D_0/K_1 y D_1/D_0 .

Una comparación de los resultados simulados al variar los parámetros de la resistencia σ_1 , σ_2 , β y γ se muestra en las figs 3.10a y 3.10b y en la tabla mencionada anteriormente. En estas figuras se observa que al incrementar σ_2 o γ aumenta el número de réplicas. También se observa en estas figuras que la variación de β afecta mucho la pendiente de la curva de tasa de excedencia. El resultado de simulación al no considerar la variación temporal de resistencia, $\beta=0$ (ec 3.11), está presentado en estas gráficas también. Con este resultado último se puede decir que si no se considera variación temporal de resistencia, no se puede simular el fenómeno de los intervalos de quietud sísmica, ni el de la casi ausencia de temblores en cierto intervalo de magnitudes.

Los resultados de simulación al incrementar la velocidad de empuje (h_{11} en ec 3.9) y al variar α_1 se presentan en las figs 3.11a y 3.11b. En ellas se observa que al disminuir el parámetro h_{11} decrece el número promedio de eventos en cada ciclo y crece el de precursores.

En la fig 3.12 y la tabla 3.3b están mostrados los resultados de simulación, tomando las constantes iguales a las que se muestran en la tabla 3.2a. En estos resultados se ve que la forma de la curva de

tasa de excedencia y la de la curva de la ocurrencia de temblores entre temblores característicos casi no varía, mientras el número promedio de eventos ocurridos en cada ciclo sí es sensible a estos parámetros. Para obtener una muestra más abundante se han realizado 100 ciclos de simulación, y los resultados también se presentan en las figuras mencionadas.

IV ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACION

En el capítulo anterior se presentaron los resultados simulados al emplear el modelo de celdas. En ellos se puede ver que al utilizar este modelo pueden reproducirse los fenómenos observados de los datos estadísticos reales (como se describen en las refs 4 y 22), fenómenos tales como el intervalo de quietud sísmica y la casi ausencia de los temblores en cierto intervalo de magnitudes. En el presente capítulo se hará un análisis de los resultados de simulación. Este consta de los aspectos siguientes:

- a) la forma de la curva de ocurrencia de réplicas
- b) la forma de la curva de ocurrencia de eventos precursoros
- c) la distribución de la ocurrencia de los temblores característicos en función del tiempo

Tomando las constantes mostradas en la tabla 4.1, los resultados de la simulación se presentan en las figs 4.1 a 4.5. Dichos resultados constan de 500 ciclos por serie. Las figuras a), b), c) y d) corresponden a cuatro juegos de parámetros mostrados en el primero, el segundo, el tercero y el cuarto reglón de la tabla 4.1a, respectivamente.

La tasa de excedencia de los temblores según los resultados simulados se muestra en las figs 4.1. Se aprecia en la fig 4.1a que aún con 500 ciclos de simulación, no se presentan temblores en cierto intervalo de magnitudes. Sin embargo, en la fig 4.1b este fenómeno no es tan pronunciado como en las 4.1a, 4.1c y 4.1d.

En las figs 4.2 se muestra la tasa de ocurrencia de las réplicas de los resultados simulados. Aquí, las ordenadas representan la frecuencia de ocurrencia de los eventos. El tiempo normalizado del eje horizontal está definido como en el capítulo anterior. La secuencia de las réplicas, puede aproximarse con la ec 2.12, que fue sugerida por Omori, o la ec 2.11 que fue empleada por Burridge y Knopoff (3) en su modelo de masa-resorte. Aquí, para aproximar la secuencia de las réplicas se emplean expresiones

$$N = N_1 / (a_1 + t) \quad 4.1$$

$$N = N_2 \exp(-a_2 t) \quad 4.2$$

que corresponden a las dos aproximaciones mencionadas; en estas expresiones N_i y a_i ; $i=1,2$, son constantes por determinar. Para obtener las constantes se utilizó el método de mínimos cuadrados. Los valores calculados para diferentes resultados de simulación se pre-

sentan en la tabla 4.2. Empleando estas constantes y las dos ecuaciones anteriores se obtienen los resultados que se muestran también en las figs 4.2. En estas figuras se aprecia la concordancia satisfactoria de los resultados simulados con las expresiones empíricas, salvo para un corto intervalo inmediatamente previo y uno inmediatamente posterior al instante en que ocurre el temblor principal.

La variación de la tasa de ocurrencia de los eventos entre temblores característicos en función del tiempo se presenta en las figs 4.3. De nuevo, estas muestran ausencia de temblores de cierto intervalo de magnitud.

En las figs 4.4 se presenta la frecuencia de ocurrencia de eventos precursoros. Para aproximar estos datos estadísticos, también se utilizan ecs 4.1 y 4.2, sustituyendo t por $1-t$. Para los resultados mostrados en las figs 4.3, las constantes de las ecs 4.1 y 4.2 se presentan en la tabla 4.3.

Las figs 4.5 muestran la tasa de ocurrencia de temblores característicos en función del tiempo. En estas figuras, se observa que la ocurrencia de un temblor característico es frecuentemente seguida por otro evento característico. También se aprecia que si se omiten los resultados para $t < 2.5$, en varios casos los temblores característicos ocurren en forma casi periódica. Según los resultados presentados en la fig 4.5d, los tiempos entre temblores característicos exhiben una distribución trimodal. La media de la tercera moda es aproximadamente el doble de la de segunda. Sin embargo, los datos estadísticos no parecen confirmar la distribución bimodal del tiempo entre eventos característicos (28), pero por ahora tampoco es posible emitir un juicio al respecto, ya que los datos estadísticos reales con que se cuenta son muy escasos.

Por lo anterior, si se omiten los datos simulados con $t < 2.5$ y los que pertenecen a la tercera población, para aproximar los datos simulados se asigna a la distribución de probabilidad del tiempo entre eventos característicos una distribución gamma (ec 2.10), una distribución de Weibull (ec 2.8) o una lognormal (28)

$$f_T(t) = \exp(-(\ln t - m)^2 / 2\sigma^2) / (t\sqrt{2\pi}) \quad 4.3$$

donde m y σ son los parámetros de la última distribución. Empleando los primeros dos momentos estadísticos pueden estimar los parámetros de las distribuciones asignadas.

La correlación entre el tiempo y la magnitud de eventos característicos se muestra en las figs 4.6 y 6.7. En las figs 4.6 se observa que la magnitud de eventos característicos (con la magnitud mayor que 7.8) es grosso modo función lineal del logaritmo del tiempo de espera. Sin embargo, no se aprecia una correlación entre la magnitud de eventos característicos y el tiempo de espera al si-

guiente evento característico.

También se hizo análisis sobre la posible relación entre las magnitudes de las réplicas y precursores y la magnitud del temblor característico. Sin embargo, con el presente modelo no se encontró ninguna correlación entre ellas.

La tasa de excedencia de los eventos en el intervalo en que se acaban las réplicas y aún no empiezan los precursores se presenta en las figs 4.8.

Lo comentado en los párrafos que anteceden sugiere nuevas líneas de investigación, a realizar tanto con los estadísticas de temblores reales como en modelos teóricos.

V CONCLUSIONES

En diseño sísmico interesa caracterizar la estadística de los temblores relacionando sus magnitudes con las distribuciones de probabilidades de los tiempos en que ocurren. La ausencia de una teoría fidedigna sugiere la conveniencia de formular modelos matemáticos que permitan simular la ocurrencia de temblores en lo relativo tanto a su magnitud como a los instantes en que se generan. La escasez de datos estadísticos apunta hacia la formulación de estos modelos matemáticos que incorporen lo que se sabe sobre los procesos físicos que están en juego y que sean relevantes.

Se presentó un estudio exploratorio de un modelo matemático para la simulación de la ocurrencia de los temblores de subducción. El modelo se basa directamente en consideraciones físicas. Contiene un primer amortiguador, que representa la transferencia de esfuerzos cortantes del manto a placas de la corteza terrestre, principalmente por corrientes de convección. En serie con el amortiguador están un segundo amortiguador y un resorte, estos dos elementos en paralelo, seguidos de un segundo resorte, en serie con ellos. El conjunto de los tres elementos reproduce el comportamiento de las placas. Finalmente, en serie con el segundo resorte hay un número elevado de pequeños resortes que terminan en elementos capaces de deslizarse al vencer determinada fricción del tipo Coulomb, que representan otras tantas celdas de una superficie potencial de ruptura. Se postula que los extremos del modelo se acercan entre sí a velocidad constante, que al vencerse la fricción en una celda, baja su resistencia y que esta se recupera en función del tiempo. Se asigna el producto de dos variables lognormales a la resistencia, una que da la mediana en cualquier instante y otra que da las fluctuaciones después de los temblores.

Los resultados obtenidos con este modelo, reproducen adecuadamente las siguientes propiedades de los datos empíricos disponibles:

- a) forma de la tasa de excedencia de magnitudes, incluyendo la porción de temblores característicos
- b) casi periodicidad de eventos característicos
- c) forma de la ocurrencia de sismos precursores en función del tiempo
- d) lapsos de quietud sísmica
- e) forma de la ocurrencia de las réplicas de los grandes sismos en función del tiempo
- f) la correlación positiva entre temblores característicos y su tiempo de espera.

En el presente modelo solamente se tiene en cuenta la correlación

temporal entre temblores característicos. No obstante, es factible extenderlo para reproducir correlaciones espaciales y de la magnitud.

Los resultados presentados en el capítulo anterior muestran en ocasiones una distribución bimodal del tiempo entre eventos característicos si se omiten los intervalos entre sismos característicos que no exceden de la cuarta parte de la media de dichos intervalos, pero los datos reales de este tipo de temblores no parecen confirmar esta forma, por lo que no se puede dar una afirmación categórica al respecto (28). Por tanto, es conveniente, en un estudio futuro, calcular el valor de la función de pérdida que resultaría si la distribución de probabilidades del tiempo entre eventos característicos fuera unimodal o bimodal, pero se hubieran diseñado las estructuras en forma óptima suponiendo la distribución bimodal o unimodal, respectivamente (28,30).

IV REFERENCIAS

1. Newmark, N. M. y Rosenblueth, E., Fundamentos de ingeniería sísmica, Diana, México, 1976
2. Esteva, L., Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico, Instituto de Ingeniería No.182, México, 1968
3. Burridge, R. y Knopoff, L., Model and theoretical seismicity, Bull. Seis. Soc. Am. 57, 341-371, 1967
4. Kanamori, H., The nature of seismicity patterns before large earthquakes, In Earthquake Prediction - An International Review, Maurice Ewing Serie 4, Am Geophys. Union, 1981
5. Cornell, C. A., Engineering seismic risk analysis, Bull. Seis. Soc. Am. 58, 1583-1606, 1968
6. Gutenberg, B. y Richter, C. F., Frequency of earthquakes in California, Bull. Seis. Soc. Am. 34, 185-188, 1944
7. Cornell, C. A. y Vanmarcke, E. H., The major influences on seismic risk, Proc. Fourth World Conf. Eq. Eng., Santiago Chile, 69-83, 1969
8. Der Kiureghian, A. y Ang, A. H-S., A fault-rupture model for seismic risk analysis, Bull. Seis. Soc. Am., 67, 1173-1194, 1977
9. Vere-Jones, D. y Davis, R., A statistical survey of earthquakes in the main seismic region of New Zealand Part 2: Time serie analysis, N. Z. J. Geol. Geophys. 9, 251-284, 1966
10. Knopoff, L., A stochastic model for the occurrence of main-sequence earthquakes, Rev. Geoph. Space Phys. 9, 175-188, 1971
11. Patwardhan, A. S., Kulkarni, R. B. y Tocher D., A semi-Markov model for characterizing recurrence of great earthquakes, Bull. Seis. Soc. Am. 70, 323-347, 1980
12. Savy, S. B., Shah, H. C. y Boore D., Nonstationary risk model with geophysical input, J. Struc. Div. ASCE, 106, 145-163, 1980
13. Shimazaki, K y Nakata, T., Time-predecible recurrence for large earthquakes, Geoph. Rev. Letl., 7, 279-282, 1980
14. Kiremidjian, A. S. y Anagnos, T., Stochastic slip-predictable model for earthquake occurrence, Bull. Seis. Soc. Am. 74, 739-755, 1984
15. Anagnos, T. y Kiremidjian, A. S., A stochastic earthquake recurrence model with temporal and spatial depece, The John A. Blume Earthq. Engng. Center, Report No. 76, Dept. of Civil Engi

- neering, Stanford University, Stanford, CA., 1985
16. Raiffa, H. y Schlaiffer, R., Applied Statistical Decision Theory, Harvard University, Boston, 1961
 17. Rosenblueth, E., Use of ststistical data in assessing local seismicity, Earthq. Engrng. Struct. Dyns., 14, 325-337, 1986
 18. Rosenblueth, E. y Ordaz, M., Use of seismic data from similar regions, Earthq. Engrng. Struct. Dyns., 15, 619-634, 1987
 19. Stuart, W. D., Strain softening prior to two-dimensional strike-slip earthquakes, J. Geophys. Rev. 84, 1063-1070, 1979
 20. Stuart, W. D. y Mavko, G. M., Earthquake instability on a strike slip fault, J. Geophys. Rev. 84, 2153-2160, 1979
 21. Cao, T. y Aki, K., Seismicity simulation with a mass-spring model and displacement hardening-softening friction law, PAGEOPH, vol 122, 1984
 22. Singh S. K., Rodríguez y Esteva, L., Estadísticas de small earthquakes and frequency of occurrence of large earthquakes along Mexican subduction zone, Bull. Seis. Soc. Am. 73, 1779-1796, 1983
 23. Wang, S-C. McNally, K. C. y Geller, R., Seismic strain release along the middle America trench, México, Geophy. Res. Letters, 9, No 3. 182-185, 1982
 24. Scholz, C. H., Mechanisms of seismic quiescence, manuscrito inédito.
 25. Singh, S. K. y Suárez, G., Review of the seismicity of Mexico with emphasis on the September 1985, Michoacan earthquakes, The Mexico Earthquakes - 1985, ASCE, Eds., M. Cassaro y E. Martínez ASCE, 7-18, 1987
 26. Bernaix, J., Etudie géotechnique de la roche de Malpassaet, Dunod, Paris, 1967
 27. González-Ruiz, J. R., McNally, K. C. y Rial, J. A. Recent normal faulting in south central Mexico: a study of source processes and regional tectonic implications, J. of Geophy. Res. 1985
 28. Jara, M., Rosenblueth, E. y Rueda, R., Distribuciones de los tiempos entre temblores característicos, VII Congr. Nal. de Ing. Sís., Querétaro, México, 1987
 29. Esteva, L., Modelo para análisis de incertidumbre y toma de decisiones ante riesgo sísmico, Rev. de Ing. No. 3, Fac. Ing., UNAM, México, 1984
 30. Grigoriu, M., Veneziano, D. y Cornell, A., Probabilistic mod-

elling as decision making, J. of the Engrng. Mech., ASCE, vol. 105, 585-596, 1979

31. Rosenblueth, E., Optimum design for infrequent disturbances, J. of the Struc. Div., ASCE, Vol. 102, 1807-1825, 1976
32. Kanamori, H., The energy release in greater earthquakes, J. of Geophy. Res. 82, 2981-2982, 1977
33. Rosenblueth, E., Optimum reliability and optimum design, Struc. Safety, 3, 69-83, 1985
34. Hong, H. P. y Rosenblueth, E. Modelo de generación de temblores en la zona de subducción, Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1988, (por publicar)

Tabla 3.1 Catálogo de grandes temblores superficiales ($M_s \geq 7$) de México
($15^\circ - 20^\circ N$, $94.5^\circ - 105^\circ W$) de 1900 a 1985 (tomado de la ref 25)

evento	fecha	tiempo h: m: s	Lat($^\circ N$)	Long($^\circ W$)	profundidad km	M_s
1	20 Ene 1900	06:33:30	20.0	105.0	S*	7.6
2	16 May 1900	20:12:	20.0	105.0	S	7.1
3	15 Abr 1907	06:08:06	16.7	99.2	S	7.9
4	26 Mar 1908	23:03:30	18.0	99.0	S	7.8
5	27 Mar 1908	03:45:30	17.0	101.0	S	7.2
6	30 Jul 1909	10:51:54	16.8	99.9	S	7.5
7	7 Jun 1911	11:02:42	17.5	102.5	S	7.8
8	16 Dic 1911	19:14:18	16.9	100.7	50	7.6
9	19 Nov 1912	13:55:07	19.93	99.8	S(?)	7.0
10	21 Nov 1916	06:25:24	18.0	100.0	S	7.0
11	29 Dic 1917	22:50:20	15.0	97.0	S	7.1
12	22 Mar 1928	04:17:01.7	16.23	95.45	S	7.7
13	17 Jun 1928	03:19:28.2	16.33	96.70	S	8.0
14	4 Ago 1928	18:28:16.8	16.83	97.61	S	7.4
15	9 Oct 1928	03:01:07.7	16.34	97.29	S	7.8
16	15 Ene 1931	01:50:40.2	16:10	96.64	S	8.0
17	3 Jun 1932	10:36:52.2	19.84	103.99	S	8.4
18	18 Jun 1932	10:12:10	19.5	103.5	S	8.0
19	30 Nov 1934	02:05:15.6	19.00	105.31	S	7.2
20	23 Dic 1937	13:17:58.5	17.10	98.07	S	7.7
21	15 Abr 1941	19:09:51.0	18.85	102.94	S	7.9
22	22 Feb 1943	09:20:44.6	17.62	101.15	S	7.7
23	14 Dic 1950	14:15:49.6	17.22	98.12	S	7.3
24	28 Jul 1957	08:40:10.7	17.11	99.10	S	7.7
25	11 May 1962	14:11:57.1	17.25	99.58	S	7.2
26	23 Ago 1965	19:46:02.9	16.3	95.8	S	7.8
27	2 Ago 1968	14:06:43.9	16.6	97.7	S	7.4
28	30 Jun 1973	21:01:18.0	18.39	103.21	32	7.5
29	29 Nov 1978	10:52:47.1	16.00	96.69	19	7.8
30	14 Mar 1979	11:07:11.7	17.46	101.46	15	7.6
31	25 Oct 1981	03:22:13	17.75	102.25	20	7.3
32	7 Jun 1982	06:52:32.8	16.40	98.54	15	7.0
33	19 Sep 1985	13:17:49.1	18:14	102.71	16	8.1
34	21 Sep 1985	01:37:11.8	17.62	101.82	20	7.5

* representa temblores superficiales.

Tabla 3.2a Constantes elegidas para las simulaciones

Simulación	Número de ciclos	N	K	α_1	K_2'/NK	K_1/K_2'	D_0/K_1	D_1/D_0	h_{11}	σ_1	σ_2	β	γ
1	25	5	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
2	25	15	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
3	25	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1

Tabla 3.2b Valores estadísticos de las simulaciones

Simulación	Promedio de eventos ocurridos en cada ciclo
1	6.64
2	22.04
3	23.08

Tabla 3.3a Constantes elegidas para las simulaciones

Simulación	Número de ciclos	N	K	α_1	K_2'/NK	K_1'/K_2'	D_0/K_1	D_1/D_0	h_{11}	σ_1	σ_2	β	γ
4	25	25	250	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
5	25	25	500	0.3	1.5	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
6	25	25	500	0.3	1	10	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
7	25	25	500	0.3	1	5	20	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
8	25	25	500	0.3	1	5	10	0.1	1	0.1	0.01	0.185	0.1
9	25	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.02	0.185	0.1
10	25	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.07	0.01	0.185	0.1
11	25	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.1	0.1
12	25	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.5
13	25	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.09
14	25	15	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0	0.1
15	25	25	500	0.2	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
16	25	25	500	0.3	1	5	10	0.2	0.7	0.1	0.01	0.185	0.1
17	25	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
18	25	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
19	200	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1
20	200	25	500	0.3	1	5	10	0.2	1	0.1	0.01	0.185	0.1

Tabla 3.3b Valores estadísticos de las simulaciones

Simulación	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Promedio de eventos ocurridos en cada ciclo	3.08	14.28	1.72	2.40	7.36	10.68	31.76	13.84	2.92	99.80	534.0	17.96	4.92	25.32	31.60	21.99	29.54

Tabla 4.1 Constantes elegidas para las simulaciones

Simulación	N	K	α_1	K_2'/NK	K_1/K_2'	D_0/K_1	h	σ	σ	β	γ	D_1/D_0
1	25	500	0.30	1.0	5.0	10.0	1.0	0.1	0.01	0.185	0.10	0.2
2	25	500	0.20	1.0	5.0	10.0	1.0	0.2	0.05	0.185	0.10	0.2
3	25	500	0.10	1.0	5.0	10.0	1.0	0.2	0.02	0.185	0.09	0.2
4	25	500	0.15	1.0	5.0	10.0	1.0	0.2	0.02	0.185	0.09	0.2

Tabla 4.2 Constantes obtenidas para las ecs 4.1 y 4.2 (réplicas)

Simulación	a_1	N_1	a_2	N_2
1	0.06084	7.0077	11.7916	115.1625
2	0.01552	1.4700	31.9630	91.8877
3	0.07358	7.8158	10.0723	105.9113
4	0.03244	4.7448	18.5973	143.8538

Tabla 4.3 Constantes obtenidas para las ecs 4.1 y 4.2 (precursores)

Simulación	a_1	N_1	a_2	N_2
1*				
2	0.05565	0.1798	12.275	3.1857
3	0.03094	1.1299	19.486	36.2193
4	0.01832	0.2301	27.190	11.9939

* Para esta simulación no es apropiado emplear estas ecuaciones en el ajuste.

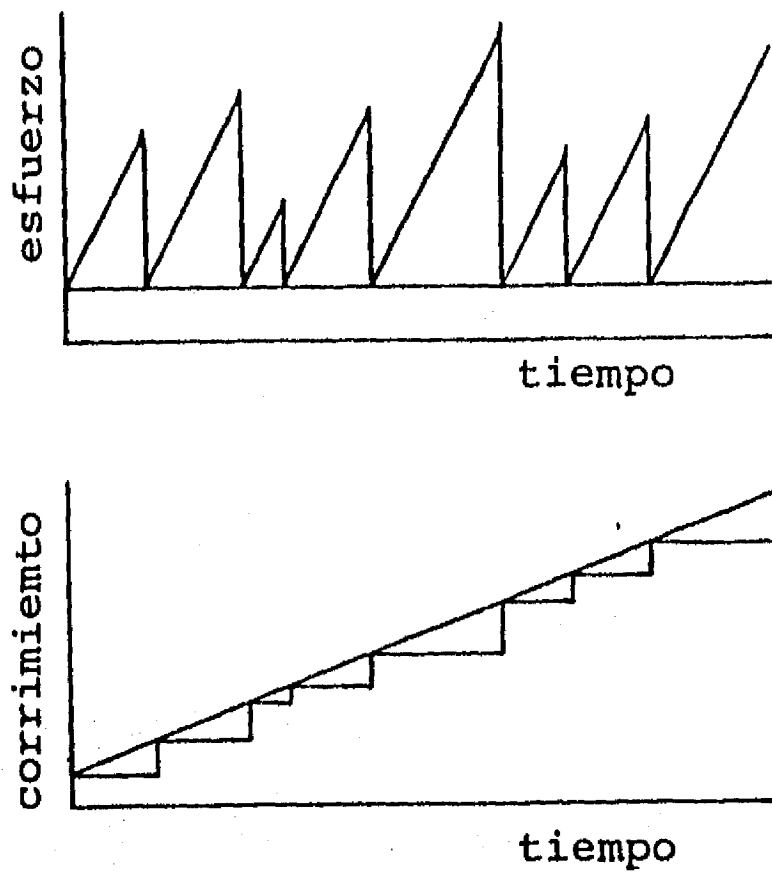


Fig 2.1 Representación esquemática de la hipótesis de corrimiento predecible

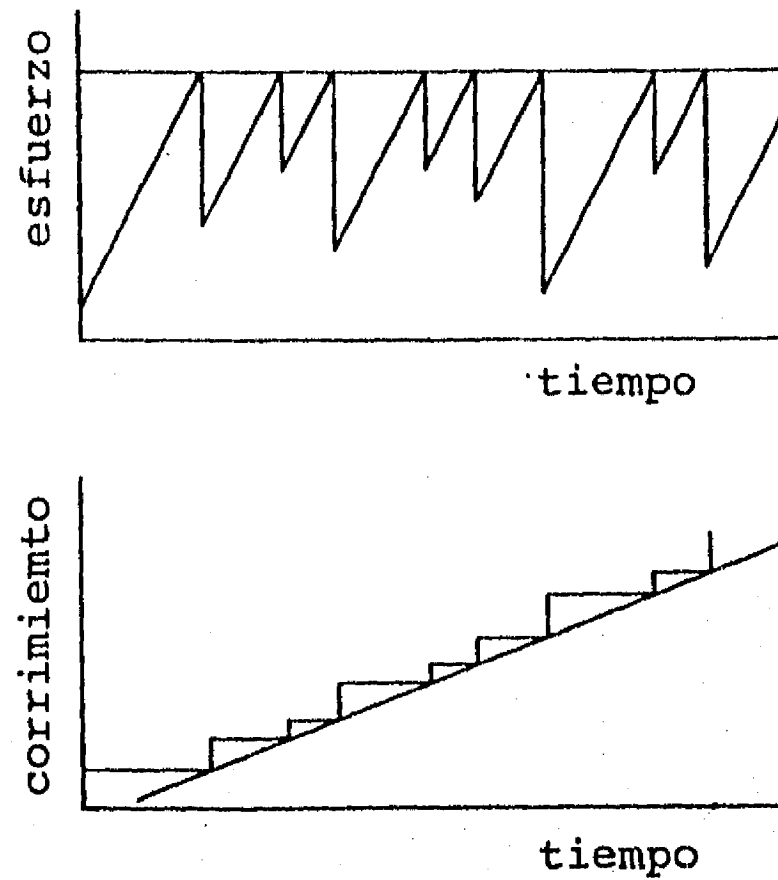


Fig 2.2 Representación esquemática de la hipótesis de tiempo predecible

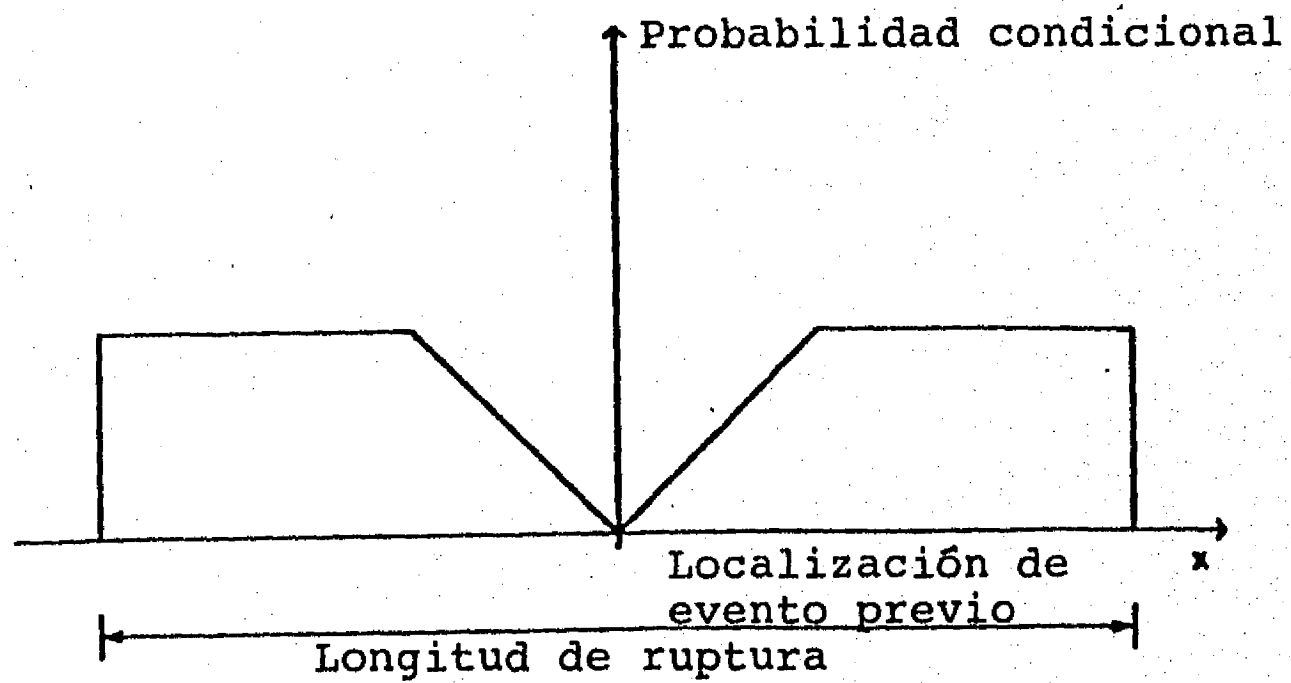


Fig 2.3 Forma supuesta para la distribución de la probabilidad de la localización del evento próximo dada la localización y la magnitud del evento previo (adaptada de la ref 15)

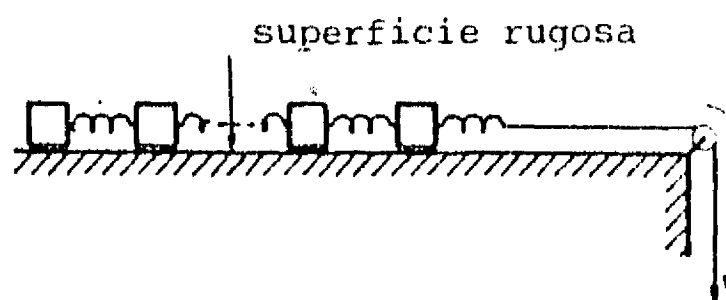
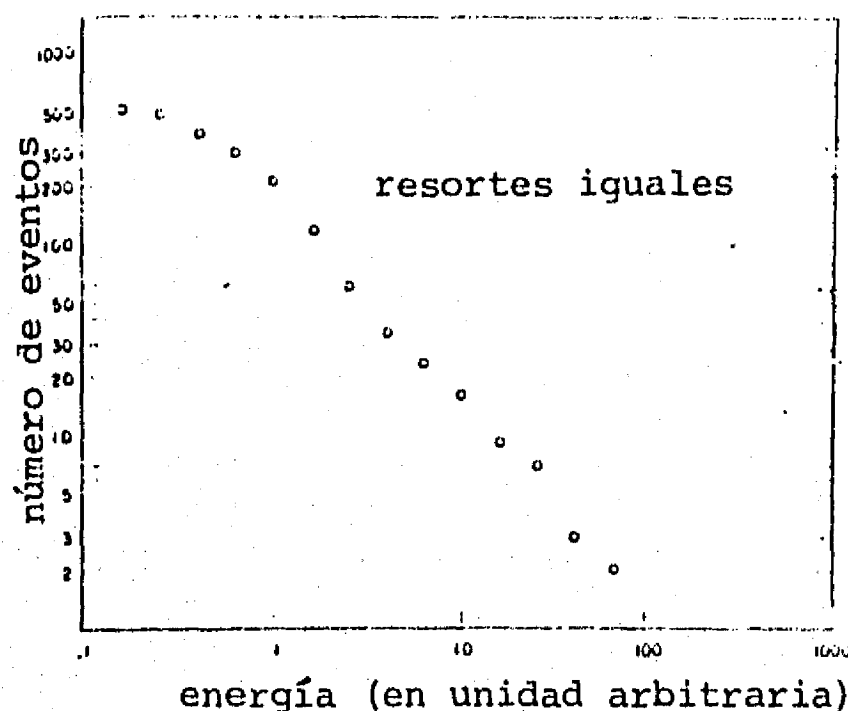
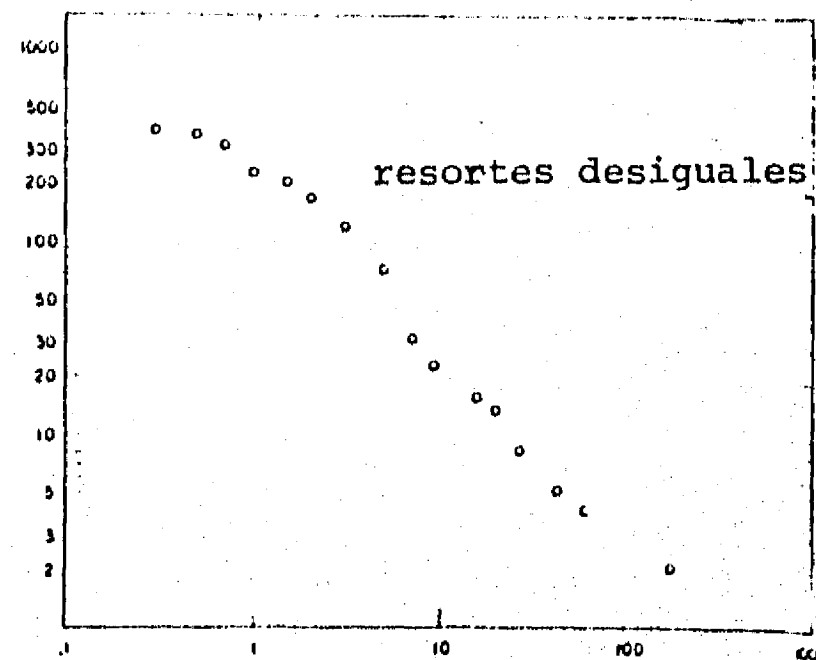


Fig 2.4 Esquema del modelo de masa-resorte de laboratorio (adaptado de la ref 3)



energía (en unidad arbitraria)
Fig 2.5a Diagrama de frecuencia-energía para modelo de masa-resorte con resorte constante (adaptado de la ref 3)



energía (en unidad arbitraria)
Fig 2.5b Diagrama de frecuencia-energía para modelo de masa-resorte con resorte no constante (adaptado de la ref 3)

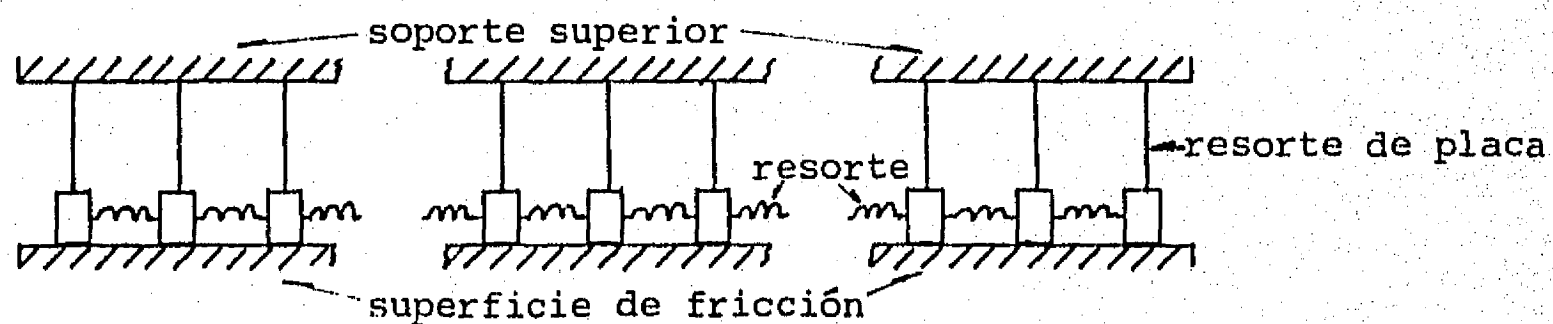
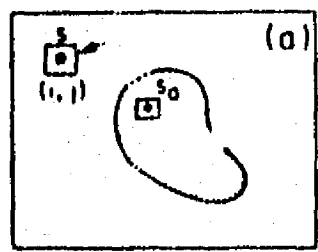


Fig 2.6 Esquema de modelo de masa-resorte



$$\sigma_0 = \sigma_{00} + af$$

$$(i, j)$$

$$\sigma(i, j) = \sigma_0 \left(\frac{l}{l-N} \right)$$

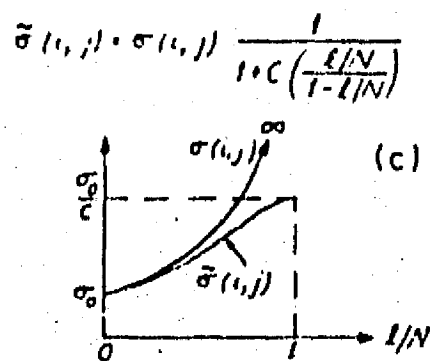
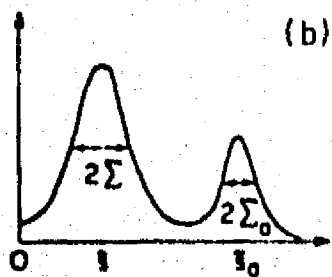


Fig 2.7 Esquema de modelo de aspereza (tomado de la ref 4)
 a) superficie de falla
 b) distribución de la resistencia
 c) variación de esfuerzo en las celdas

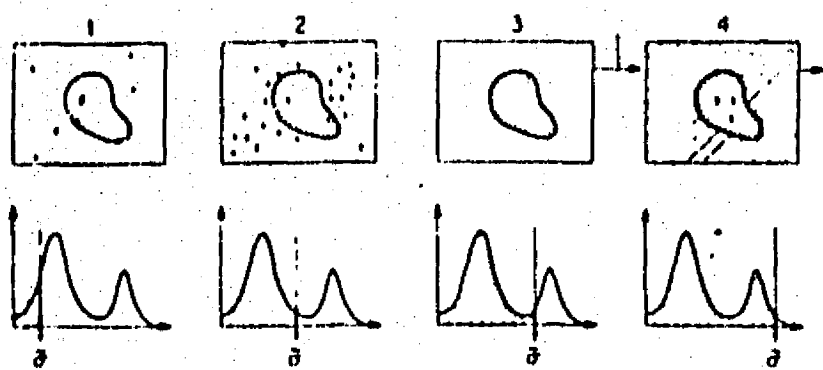


Fig 2.8 Secuencia del patrón de sismicidad predicha por el modelo de aspereza (tomada de la ref 4)

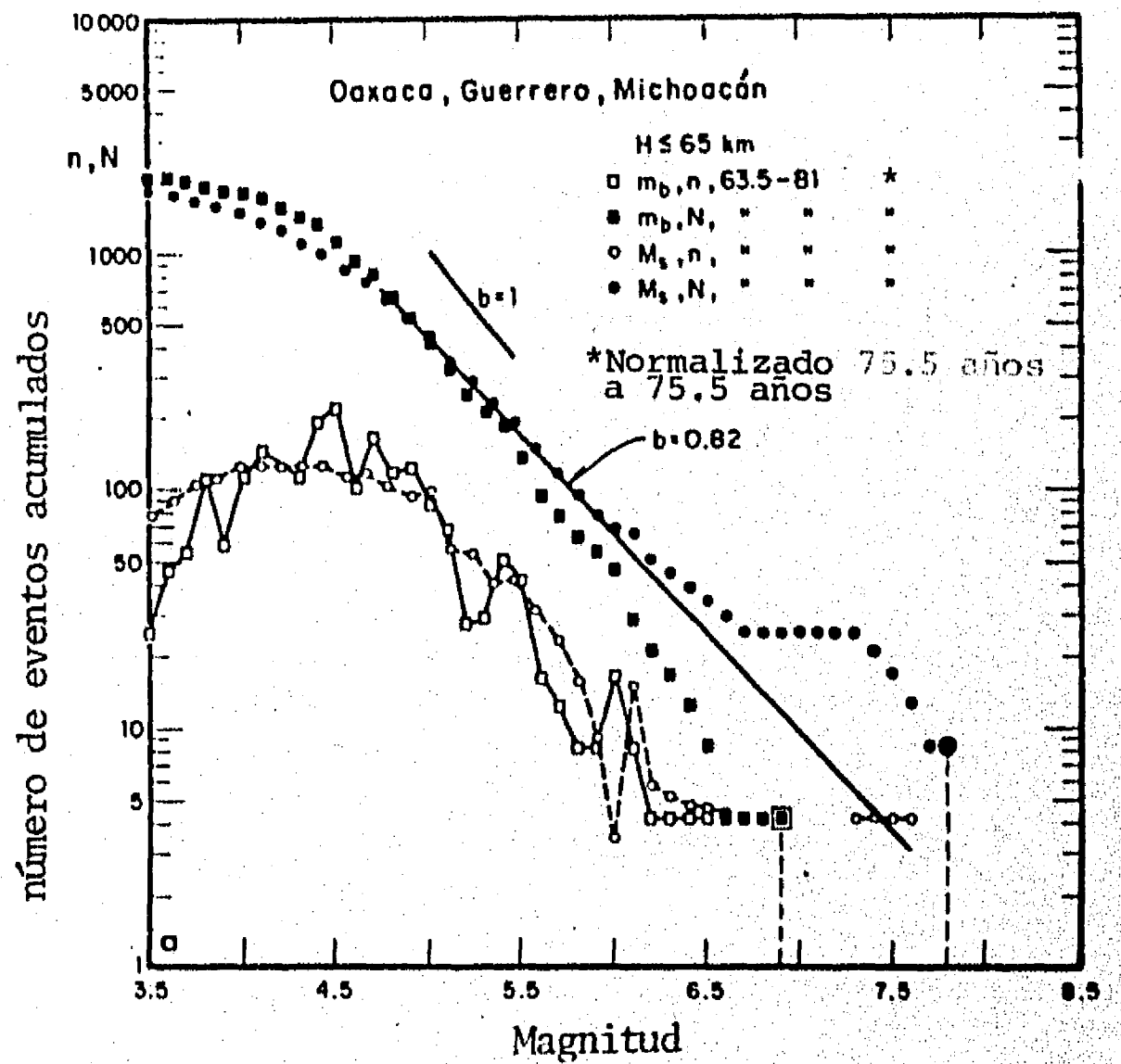


Fig 2.9 Tasa de excedencia (tomada de la ref 22)

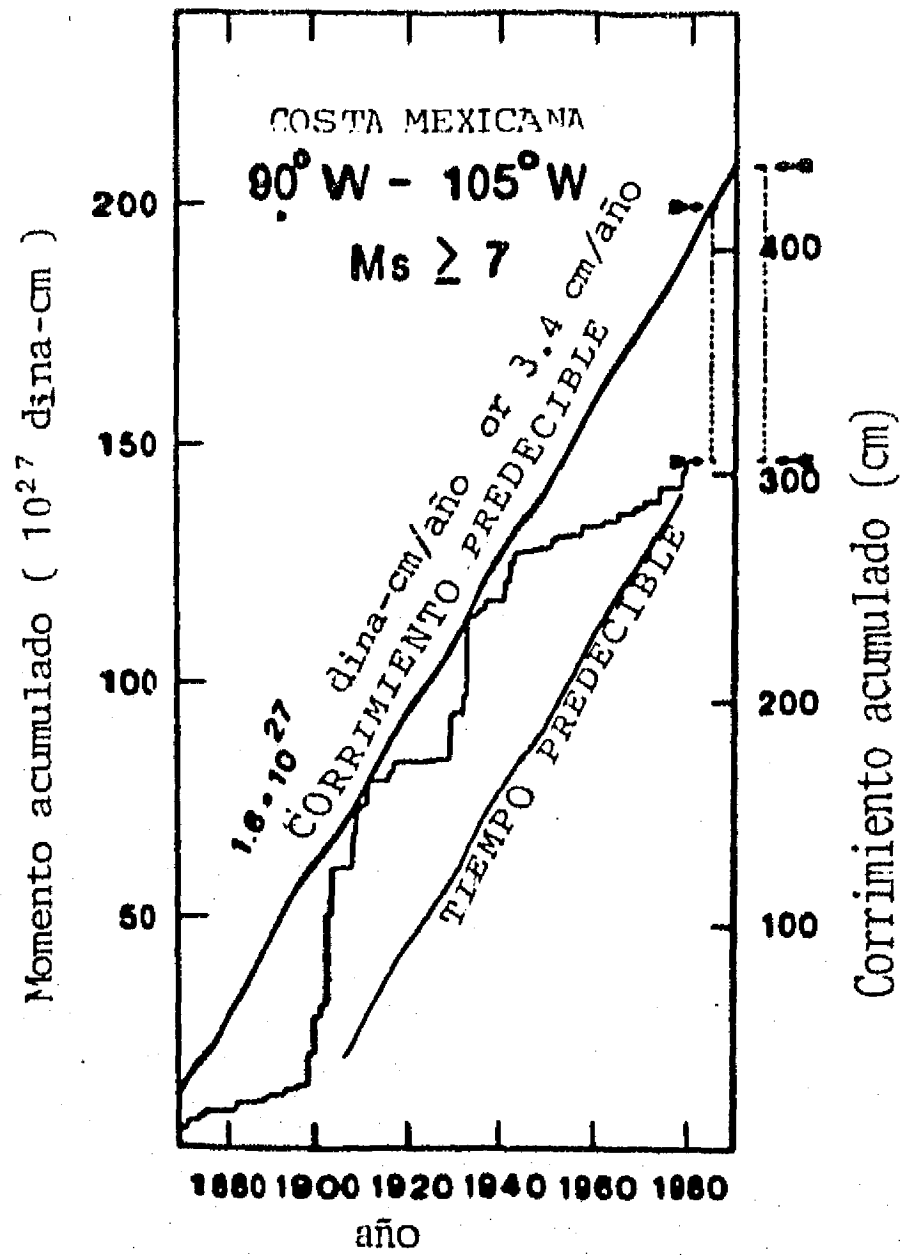


Fig 2.10 Curva de corrimiento (tomada de la ref 23)

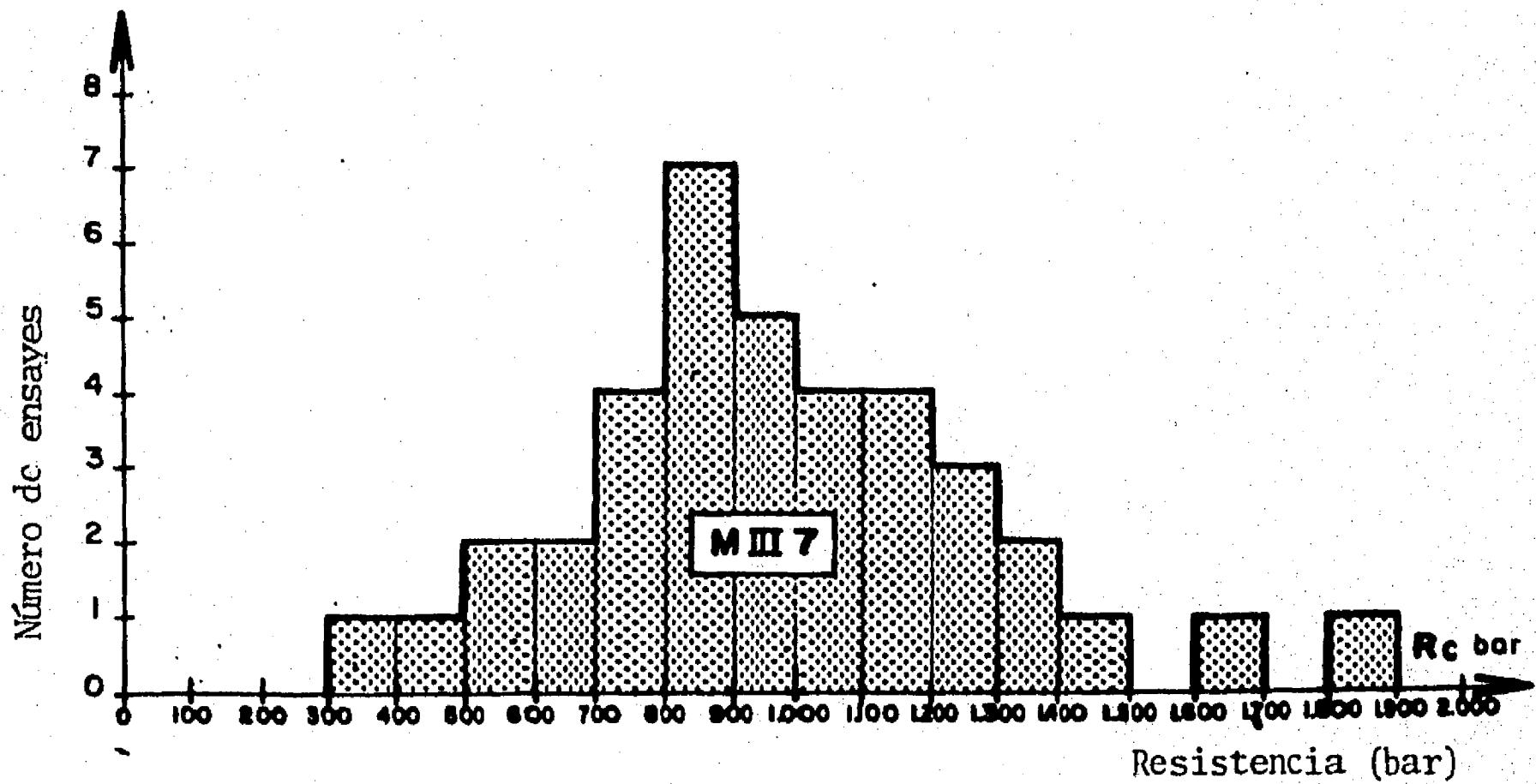


Fig 2.11 Histograma de la resistencia de la roca (tomada de la ref 26)

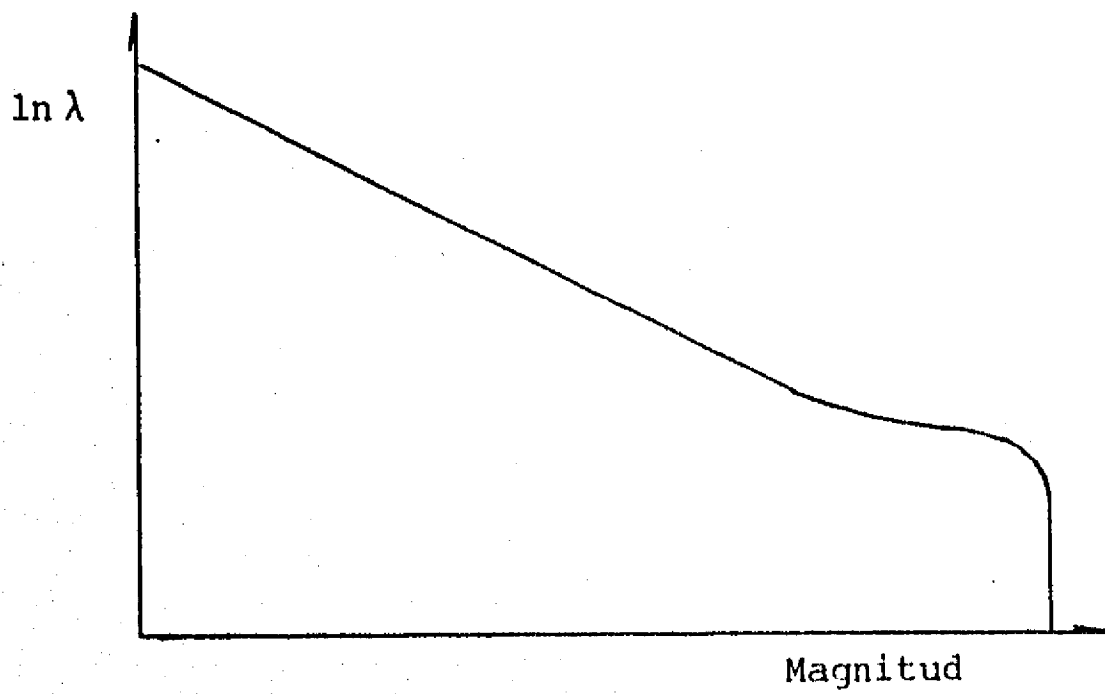


Fig 3.1 Tasa de excedencia

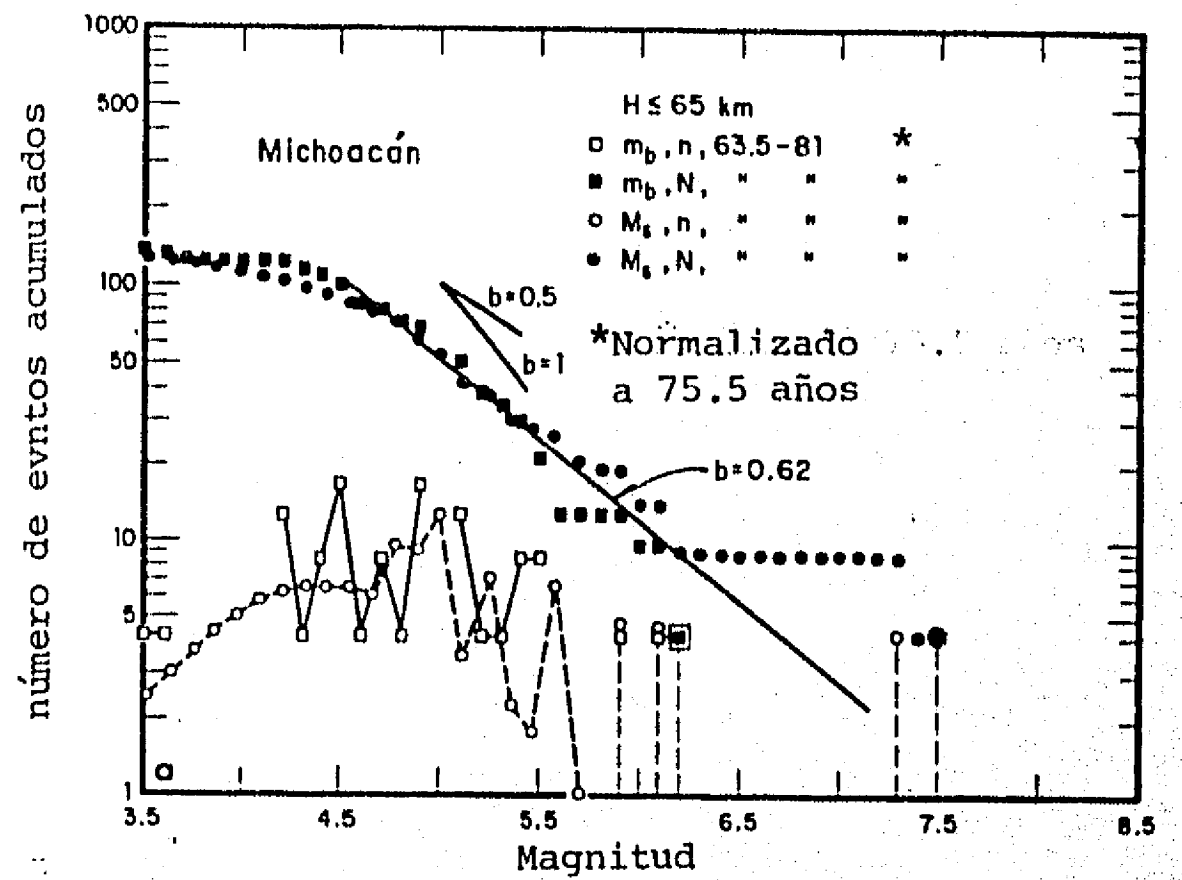


Fig 3.2a Tasa de excedencia en Michoacán (adaptada de la ref 22)

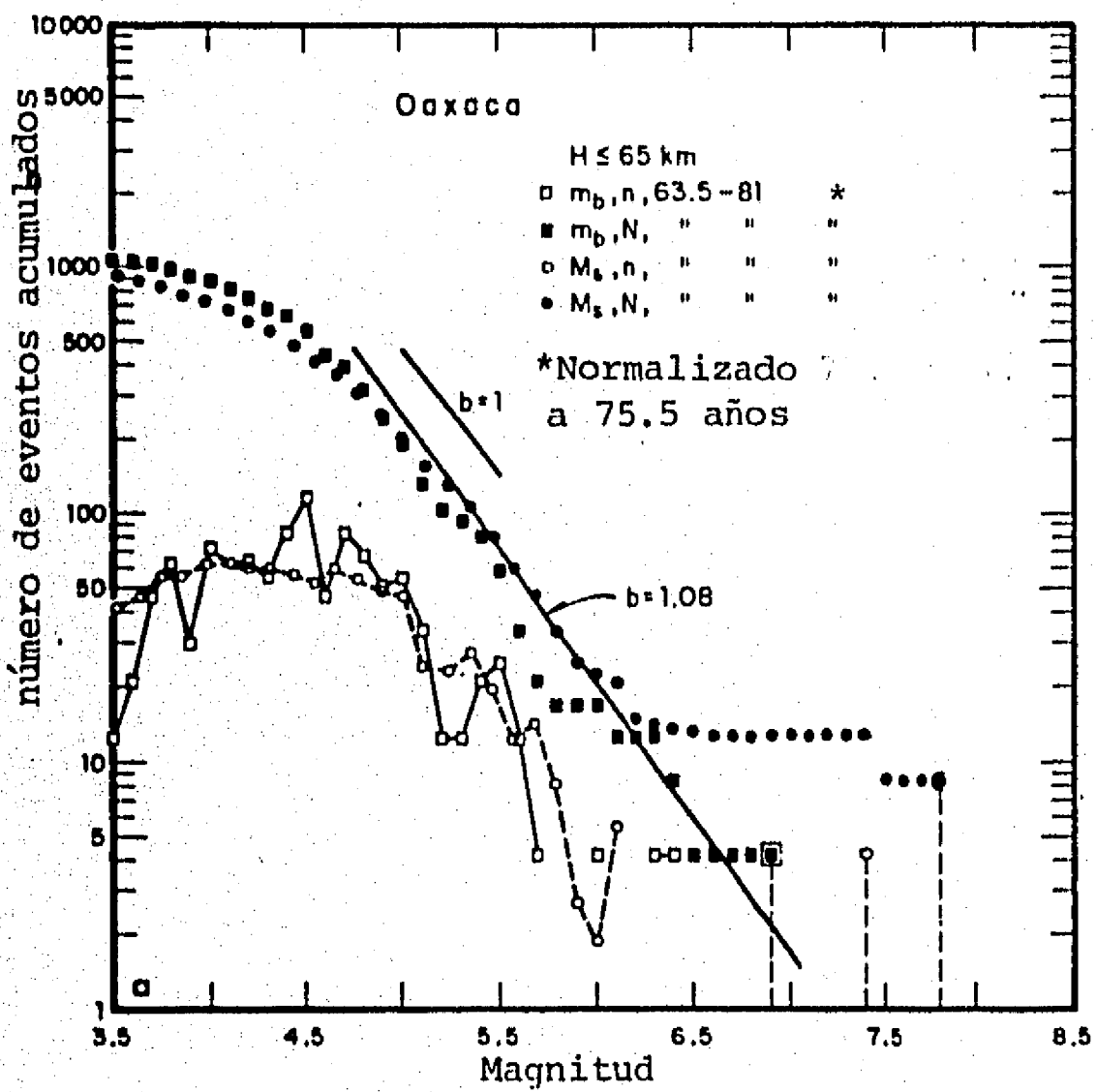


Fig 3.2b Tasa de excedencia en Oaxaca (adaptada de la ref 22)

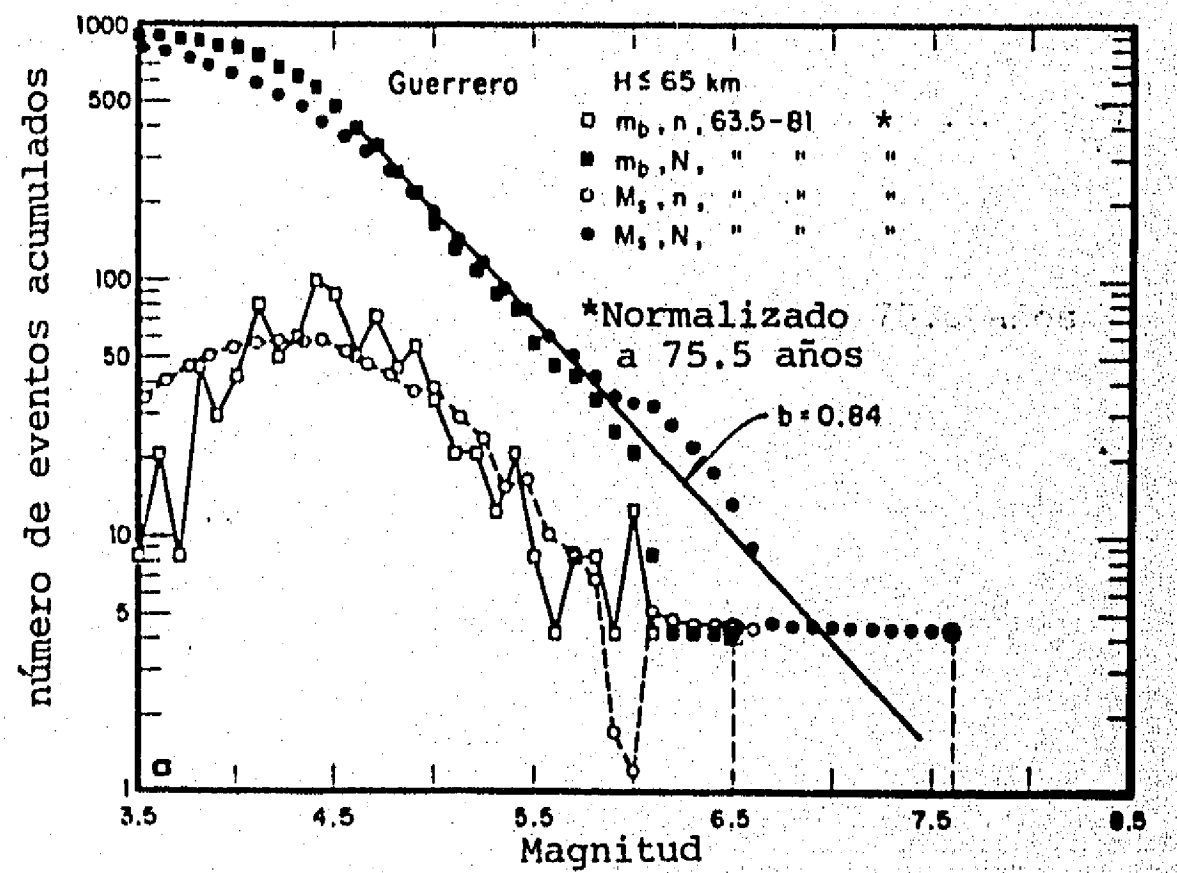


Fig 3.2c Tasa de excedencia en Guerrero (adaptada de la ref 22)

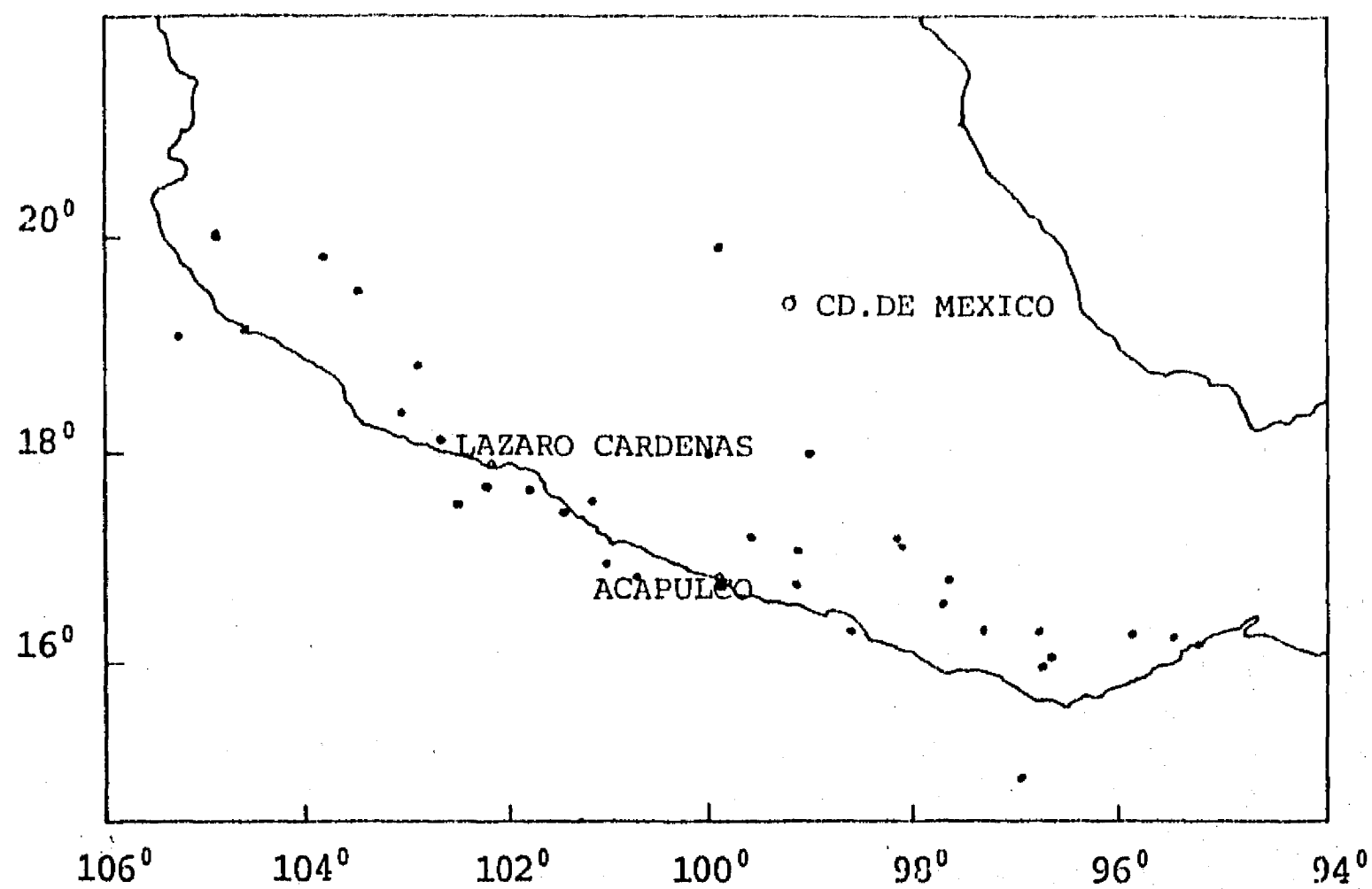


Fig 3.3a Localización de epicentro de los grandes temblores de 1900 - 1985 en la costa occidental de México

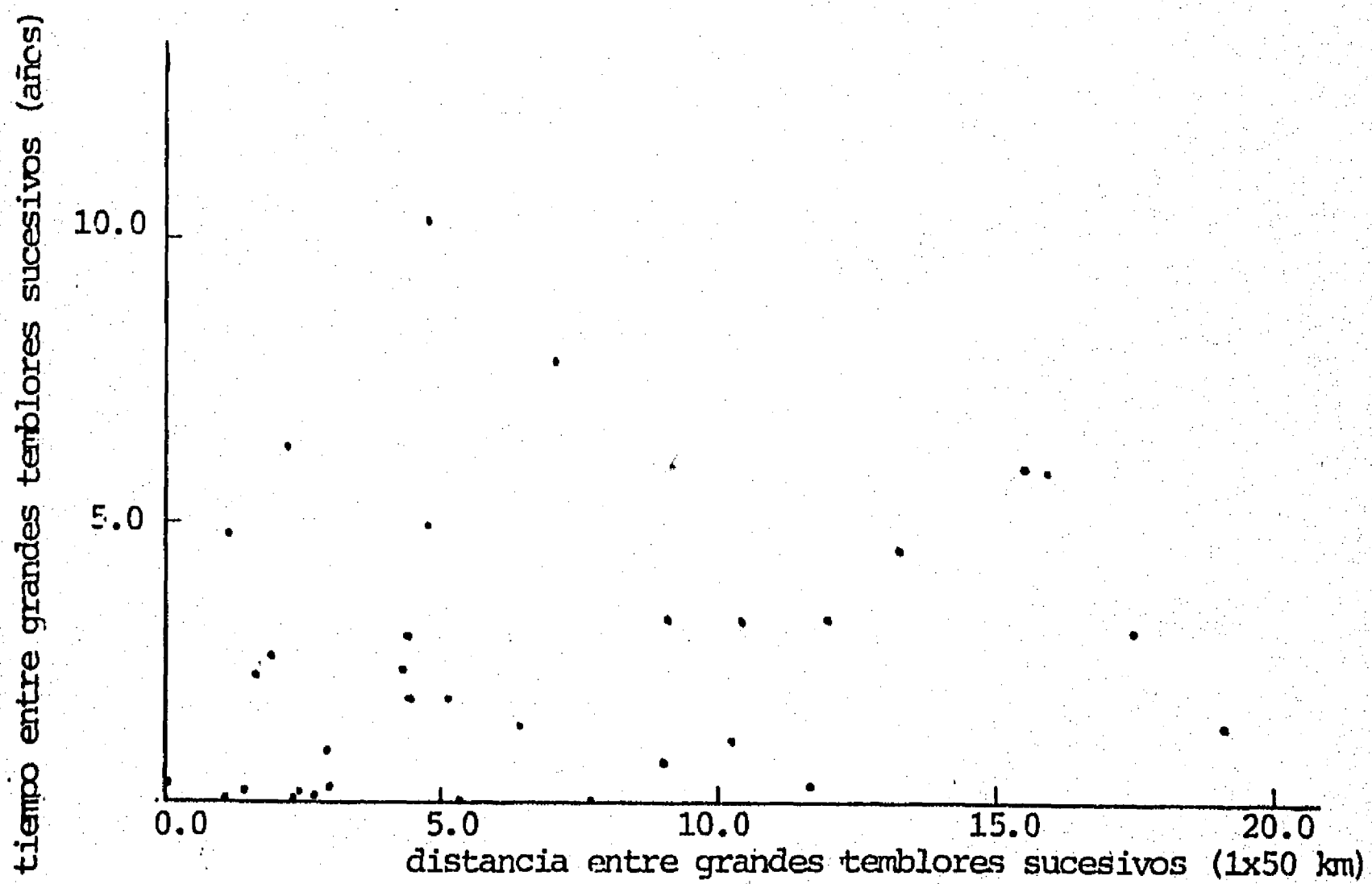


Fig 3.3b Representación de los grandes temblores en el tiempo y en el espacio

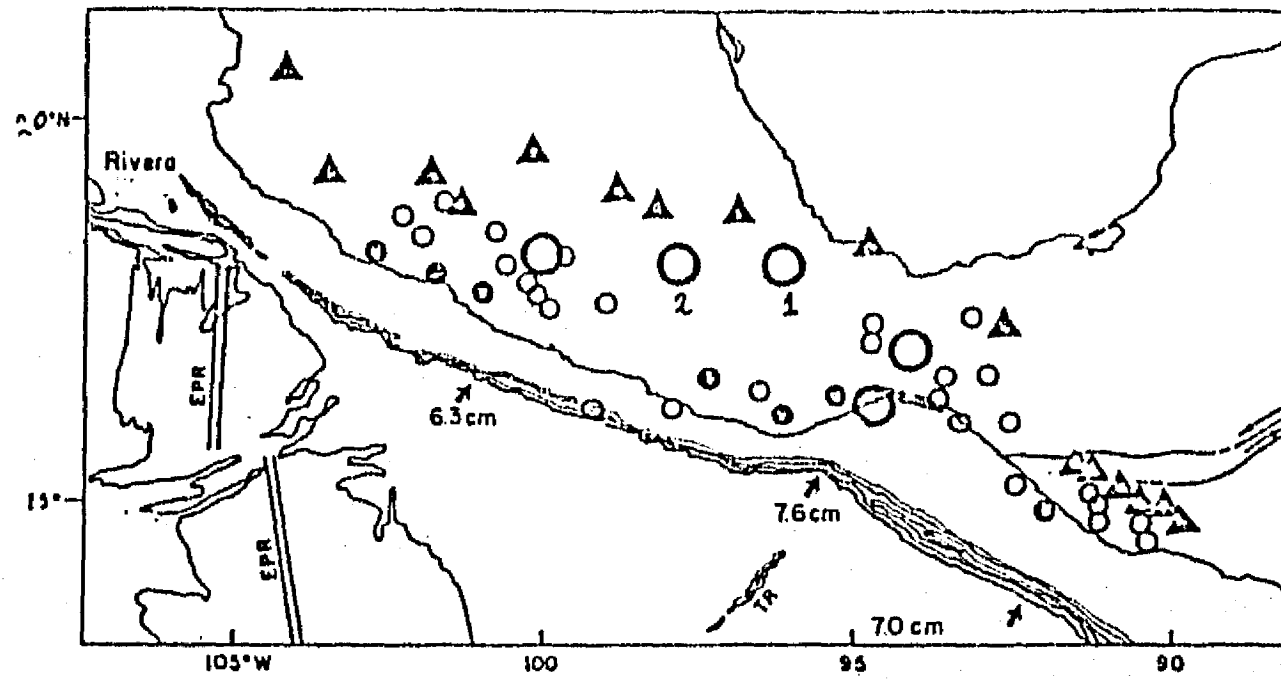


Fig 3.4a Movimiento de las placas (tomada de la ref 27)

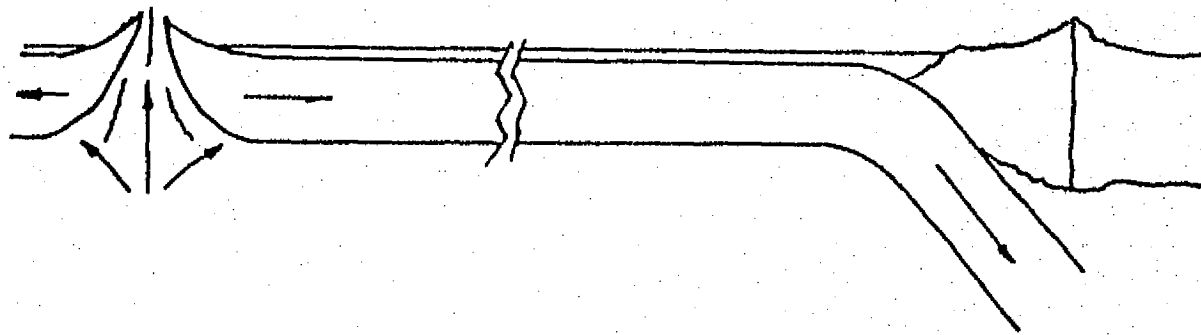


Fig 3.4b Zona de subducción

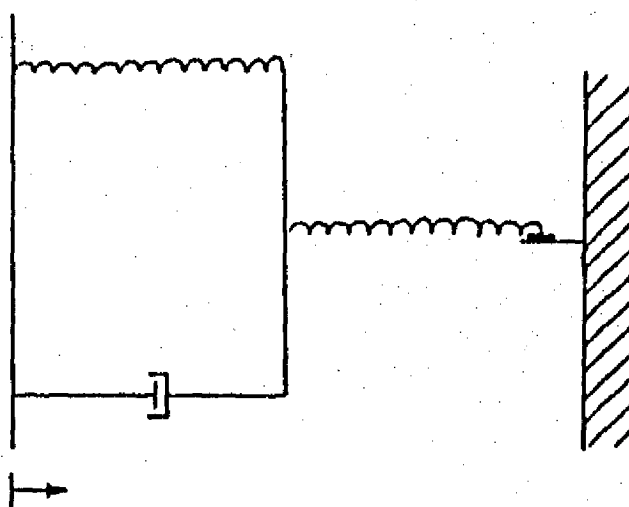


Fig 3.5 Representación de movimiento de dos placas

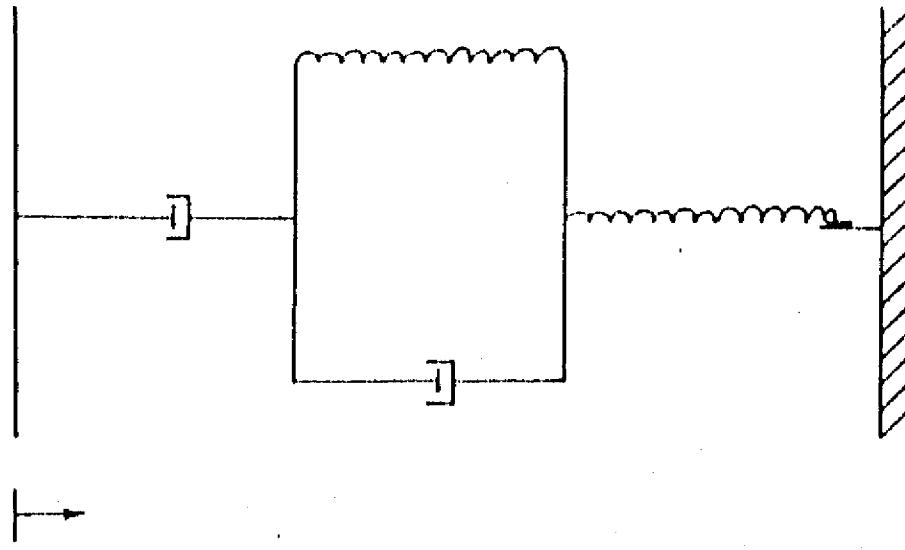


Fig 3.6a Esquema de modelo de masa-resorte- amortiguador)

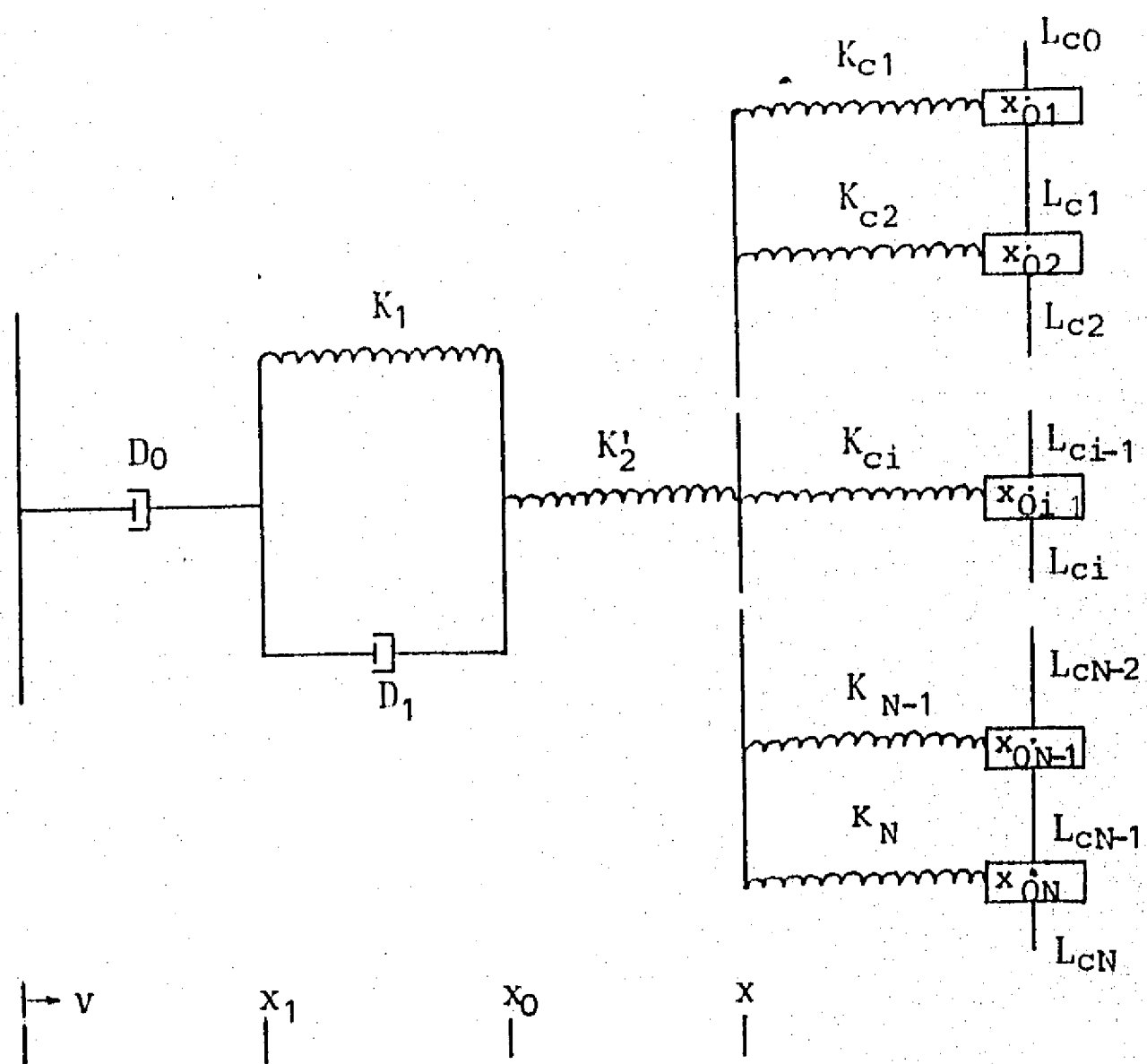


Fig 3.6b Modelo de celdas

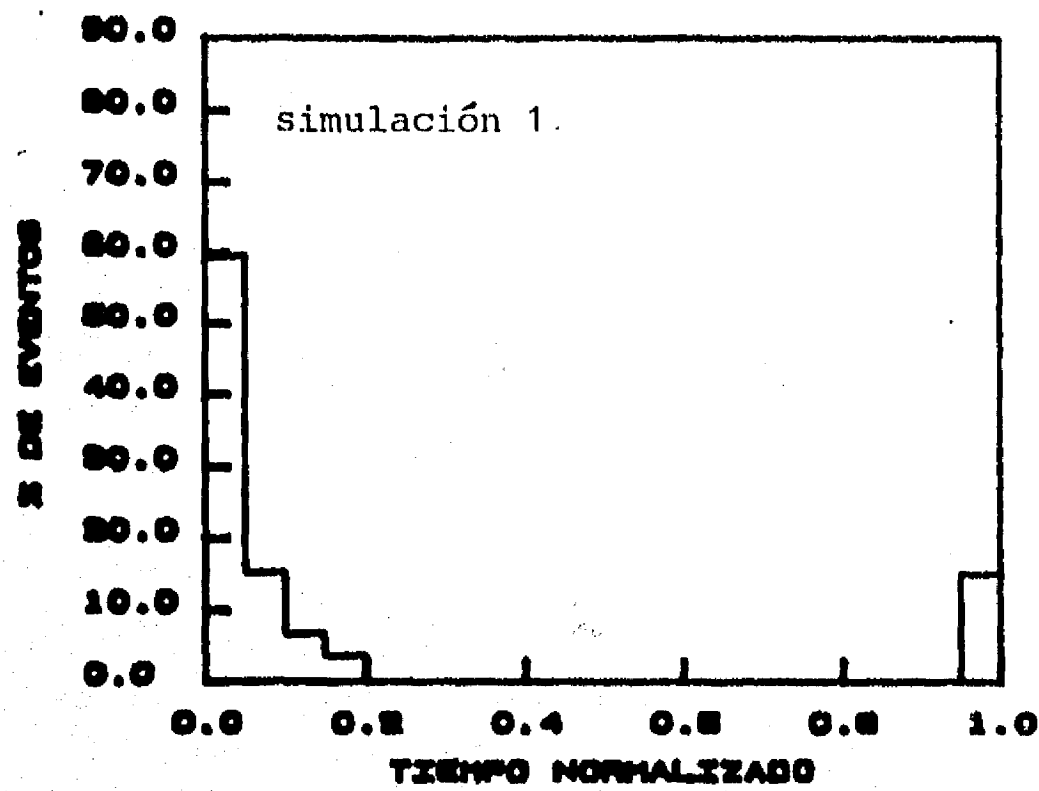


Fig 3.7a1 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

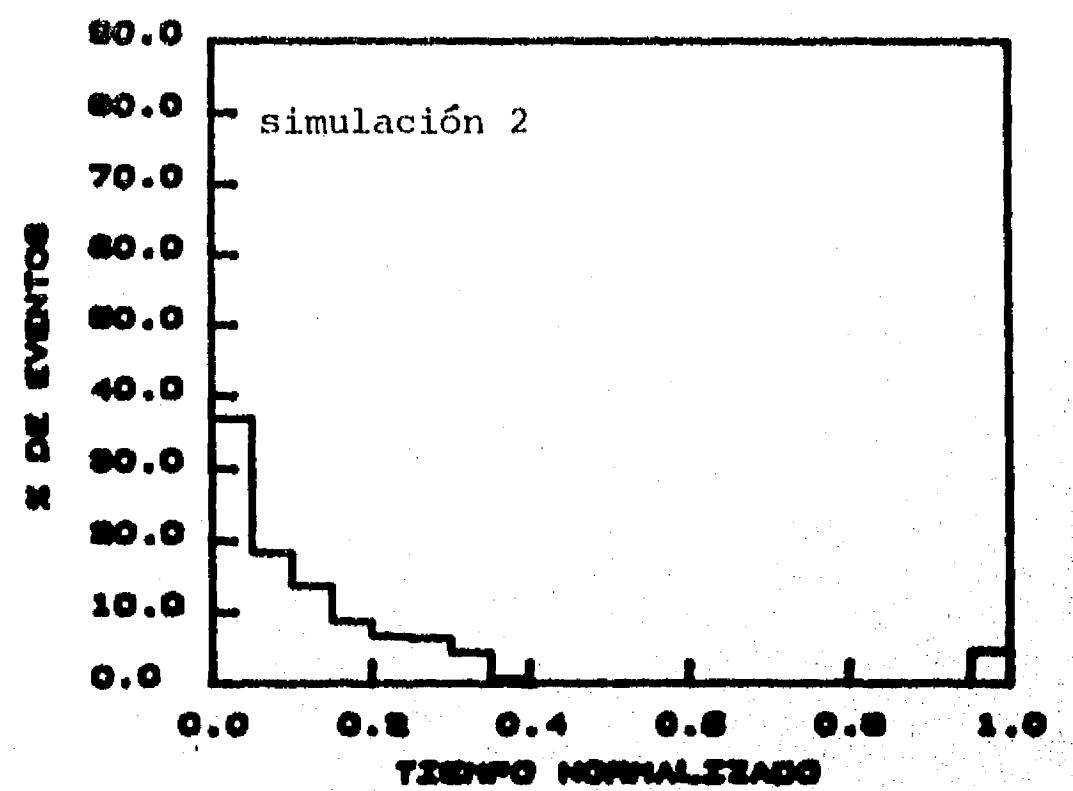


Fig 3.7a2 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

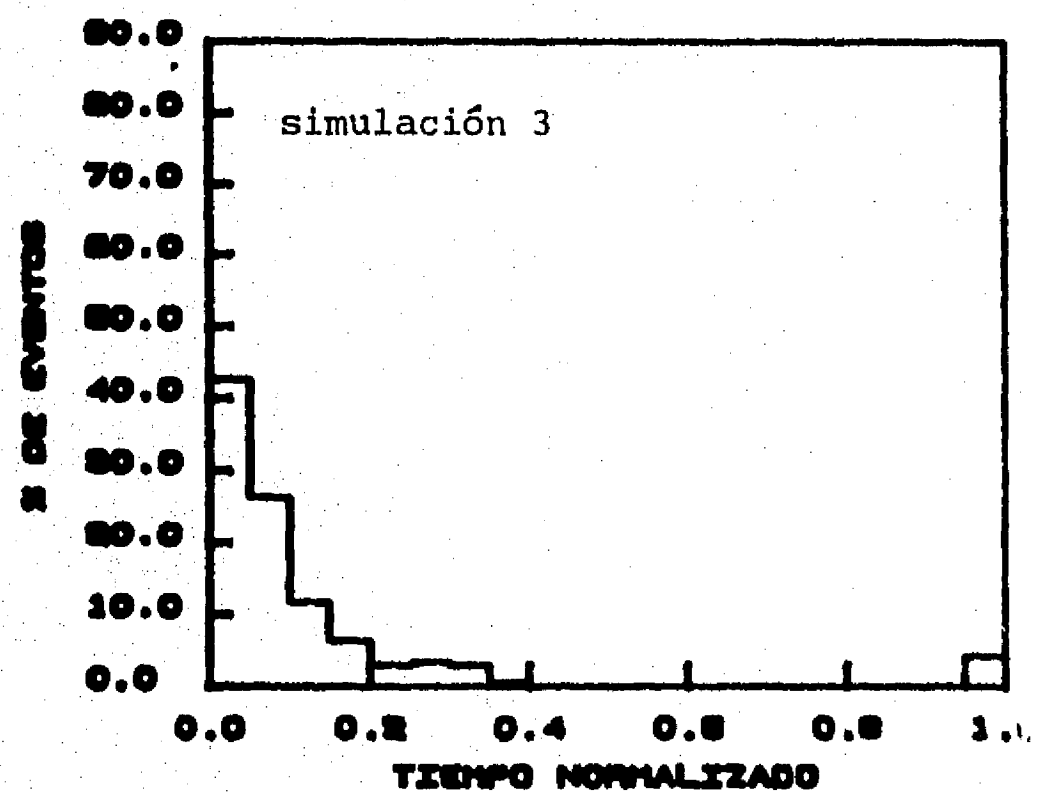


Fig 3.7a3 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

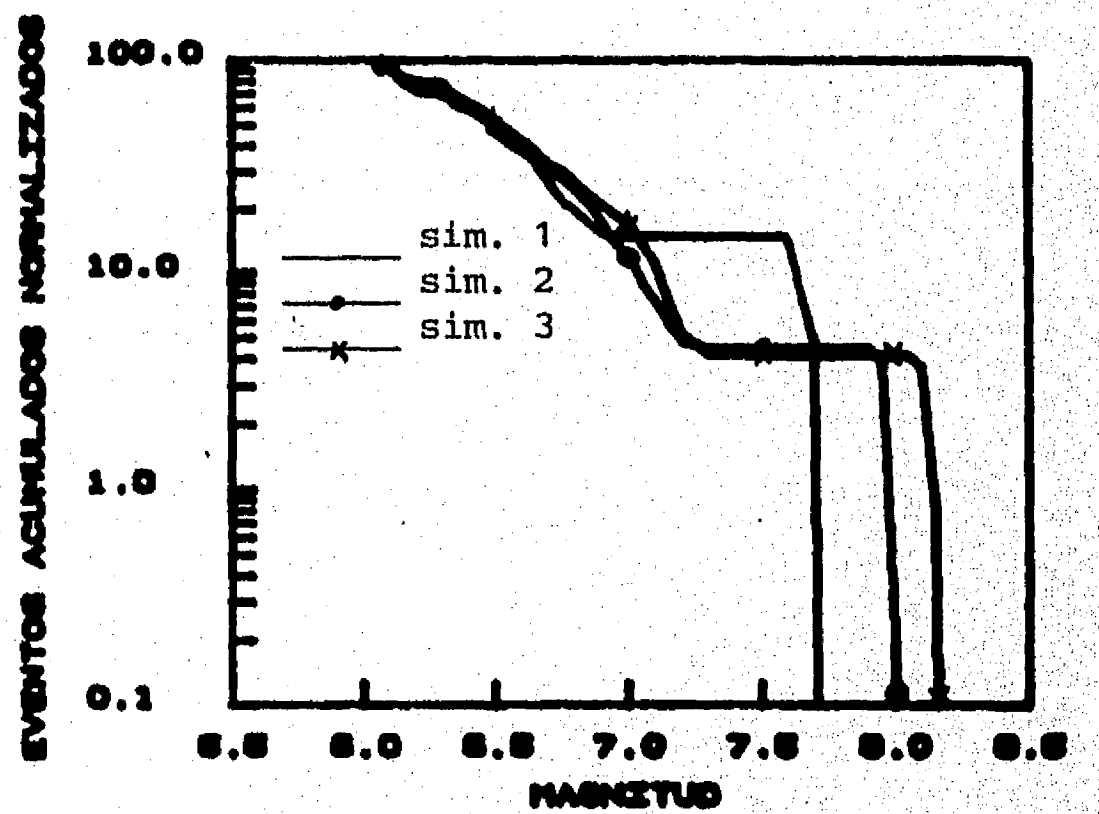


Fig 3.7b Número de temblores vs la magnitud

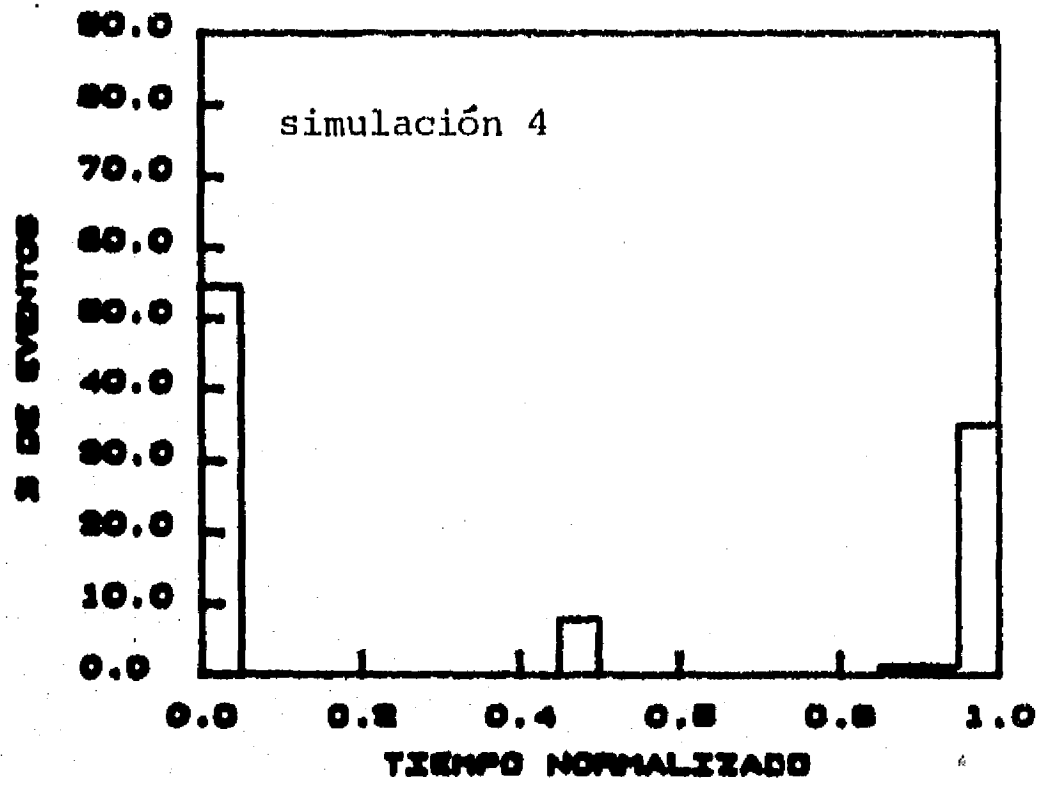


Fig 3.8a1 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

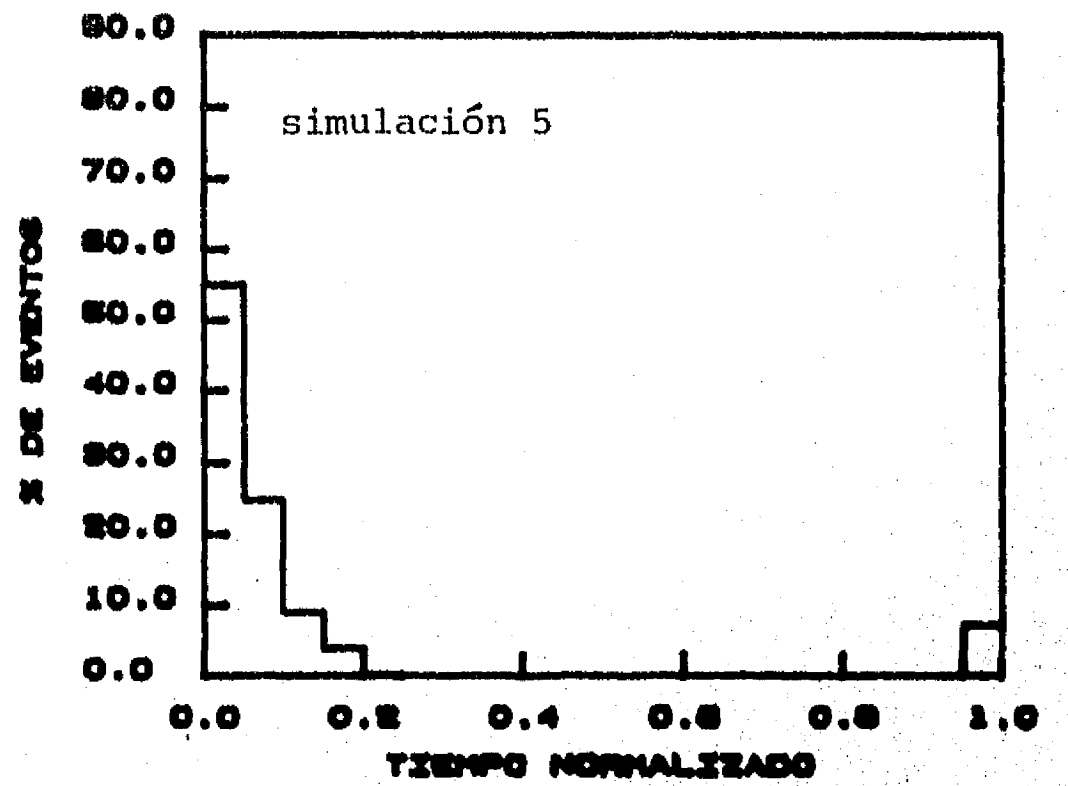


Fig 3.8a2 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

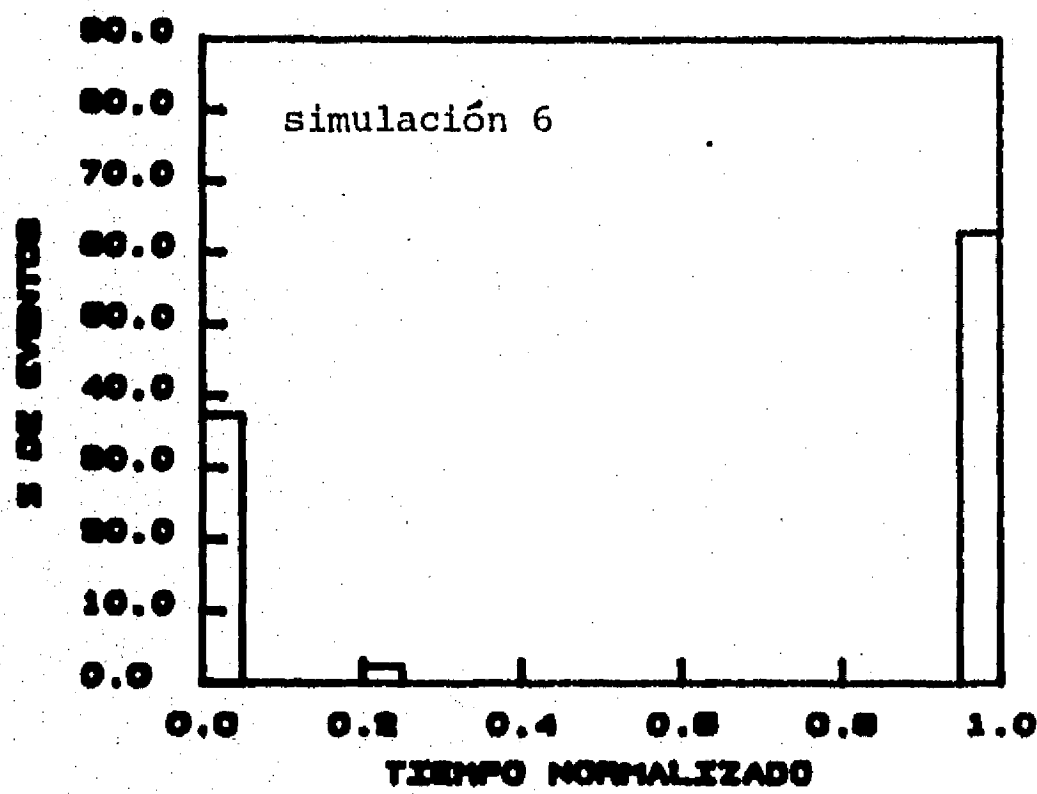


Fig 3.8a3 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

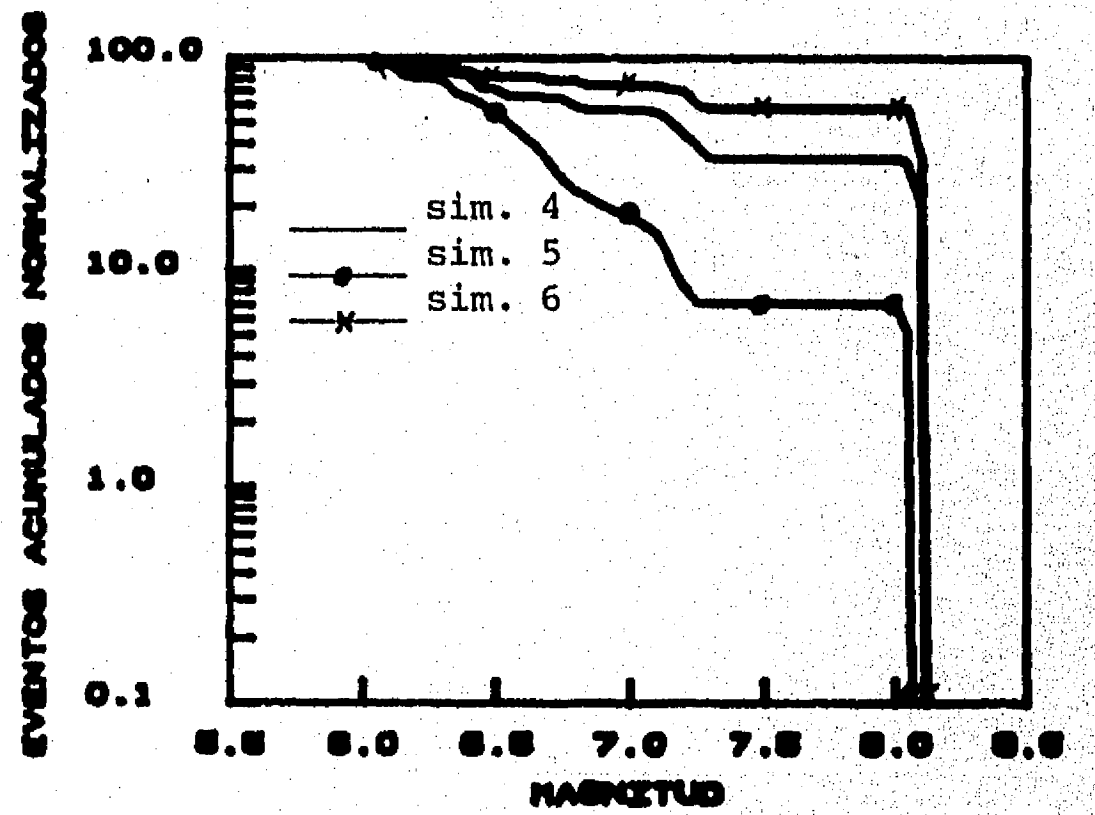


Fig 3.8b Número de temblores vs la magnitud

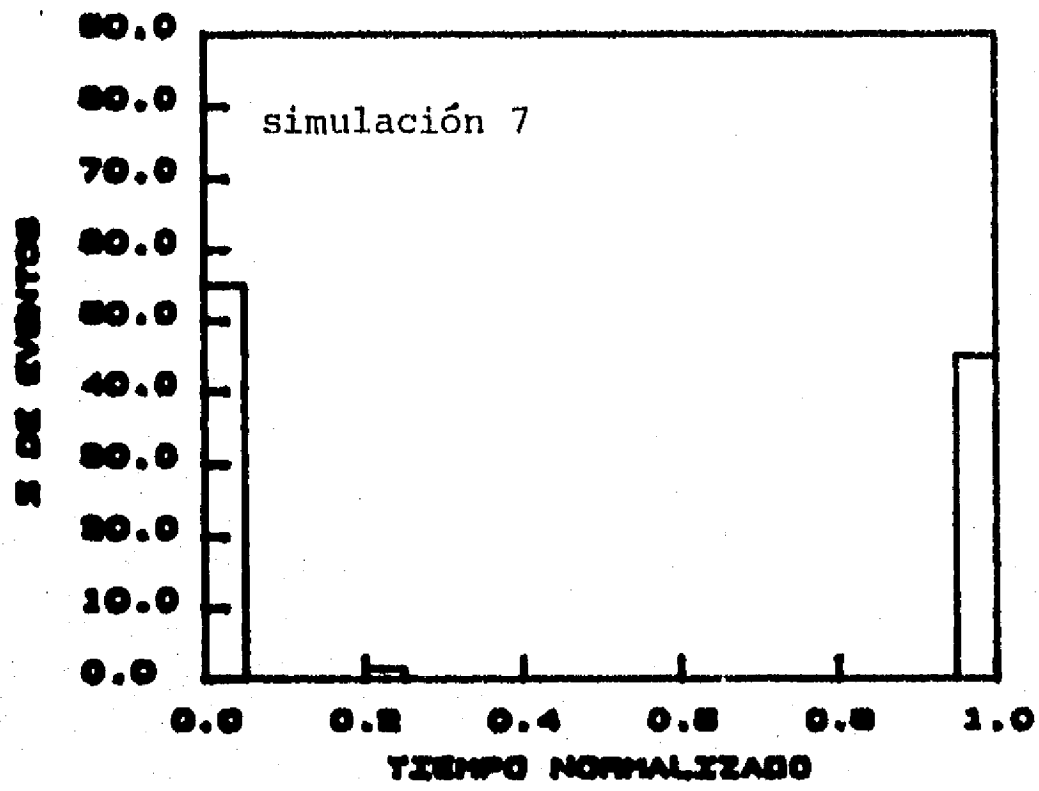


Fig 3.9a1 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

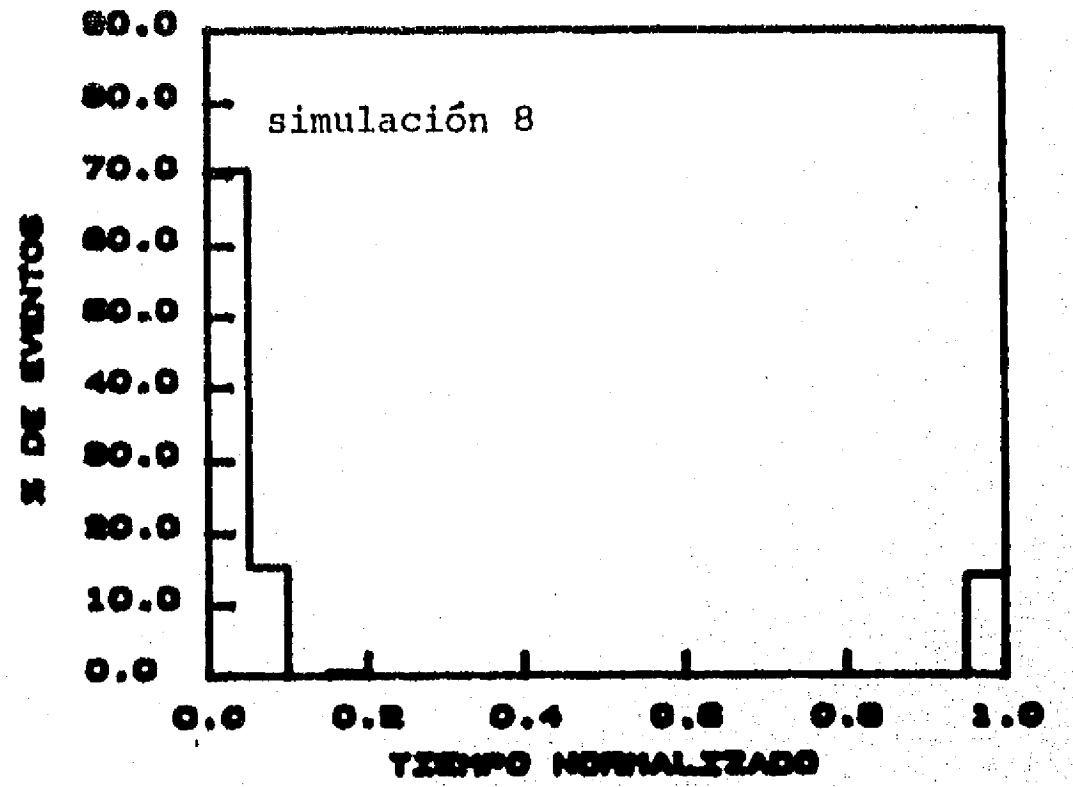


Fig 3.9a2 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

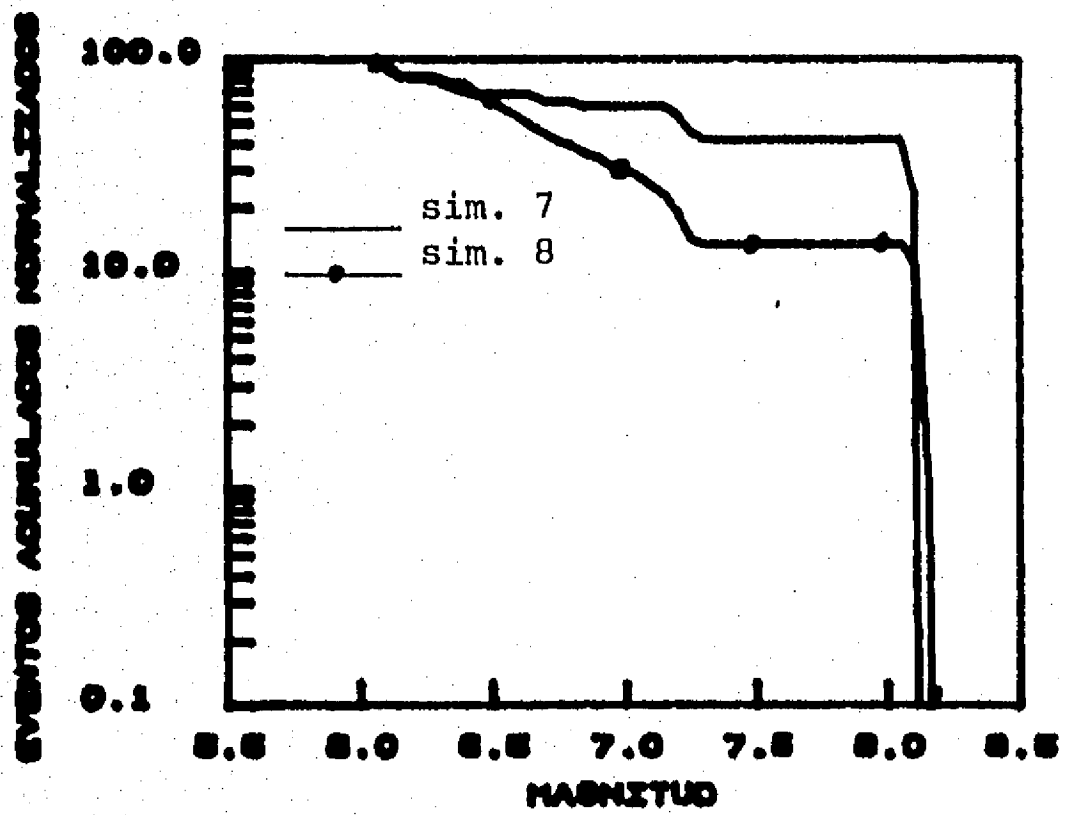


Fig 3.9b Número de temblores vs la magnitud

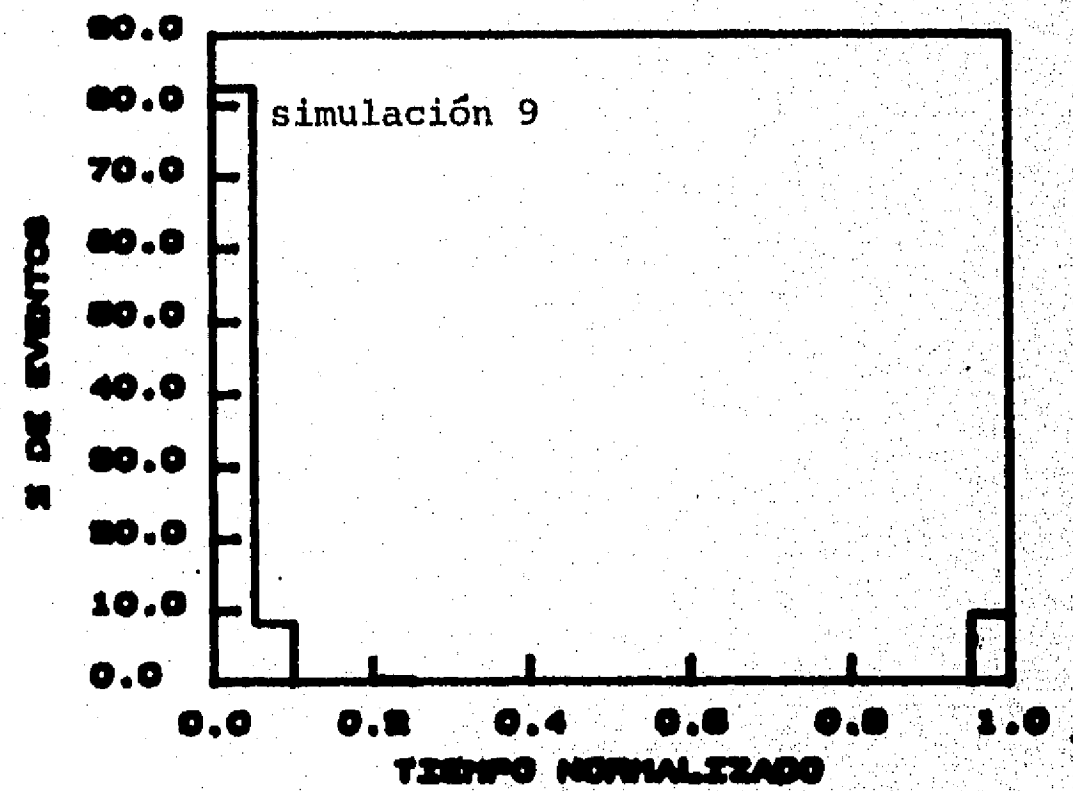


Fig 3.10a1 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

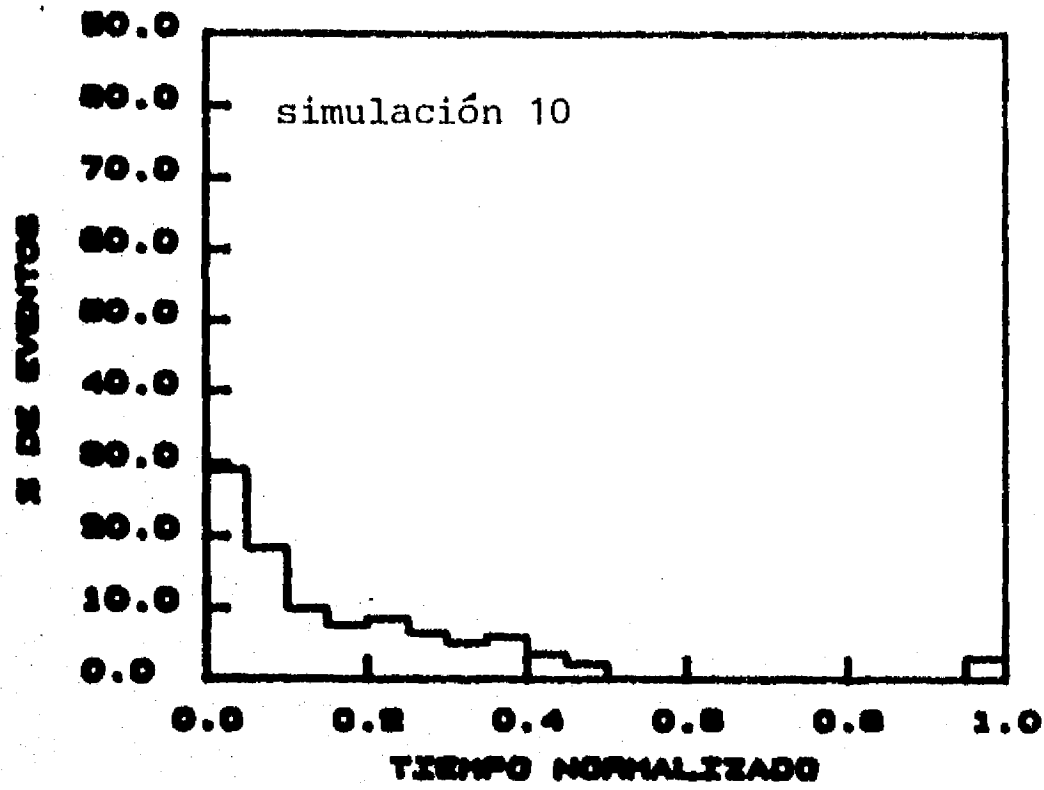


Fig 3.10a2 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

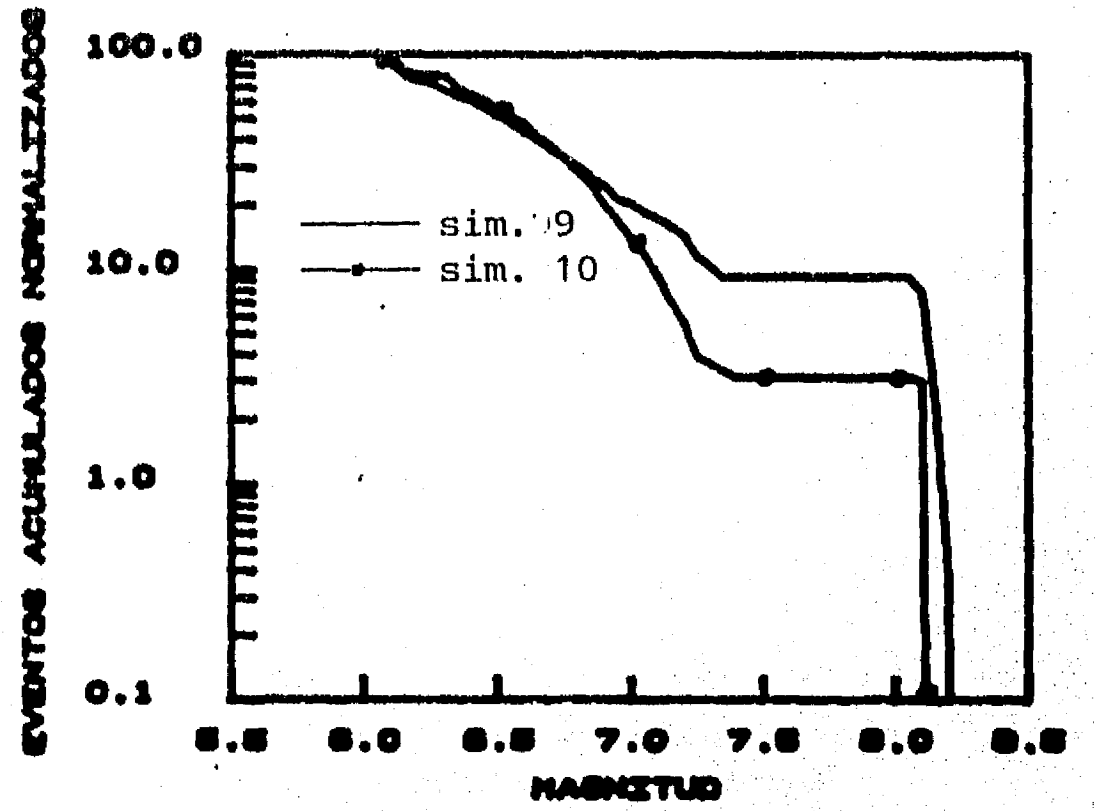


Fig 3.10b1 Número de temblores vs la magnitud

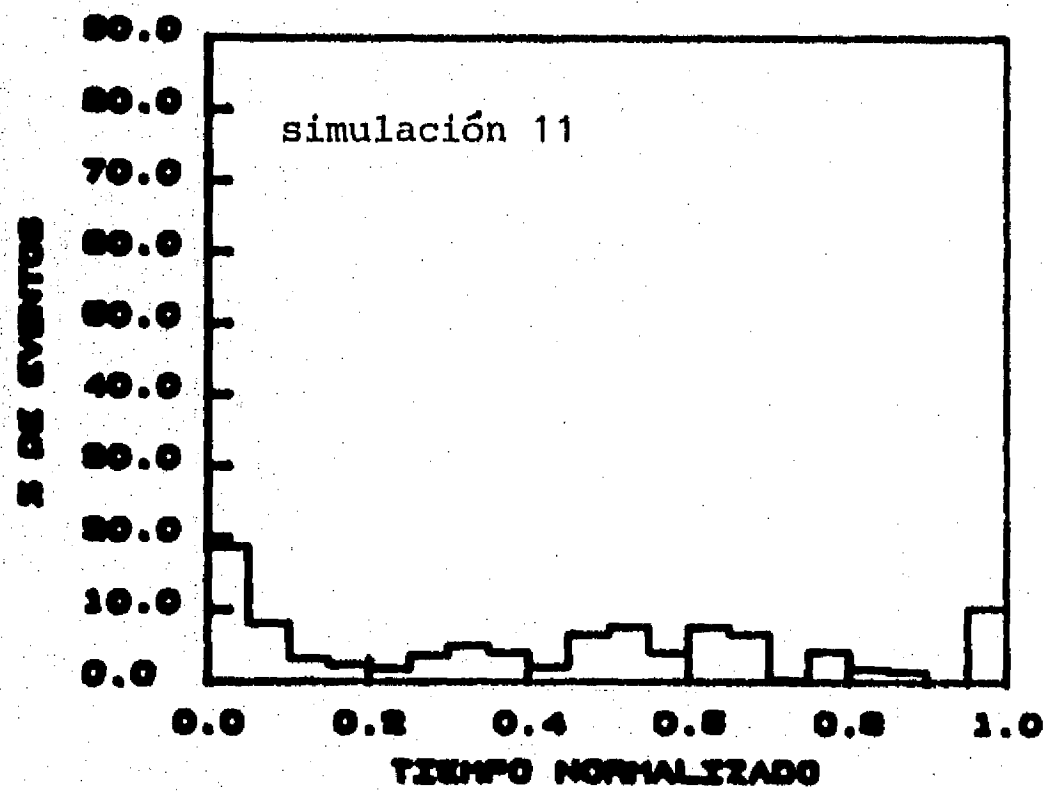


Fig 3.10a3 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

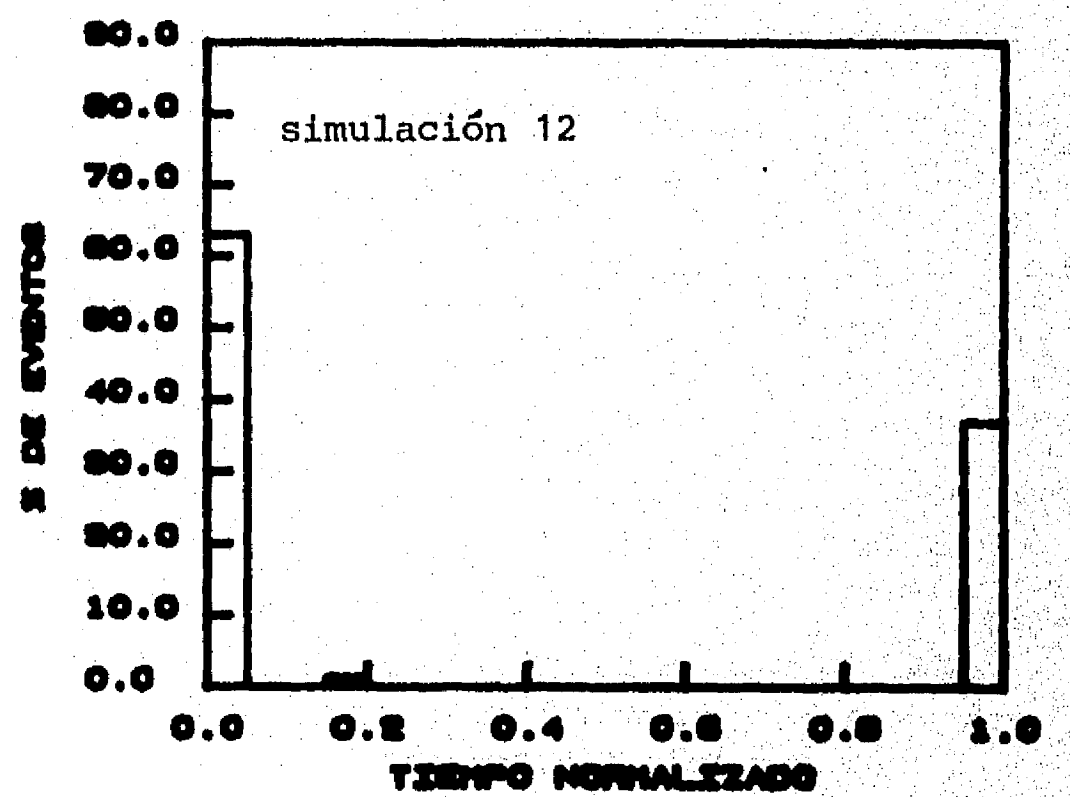


Fig 3.10a4 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

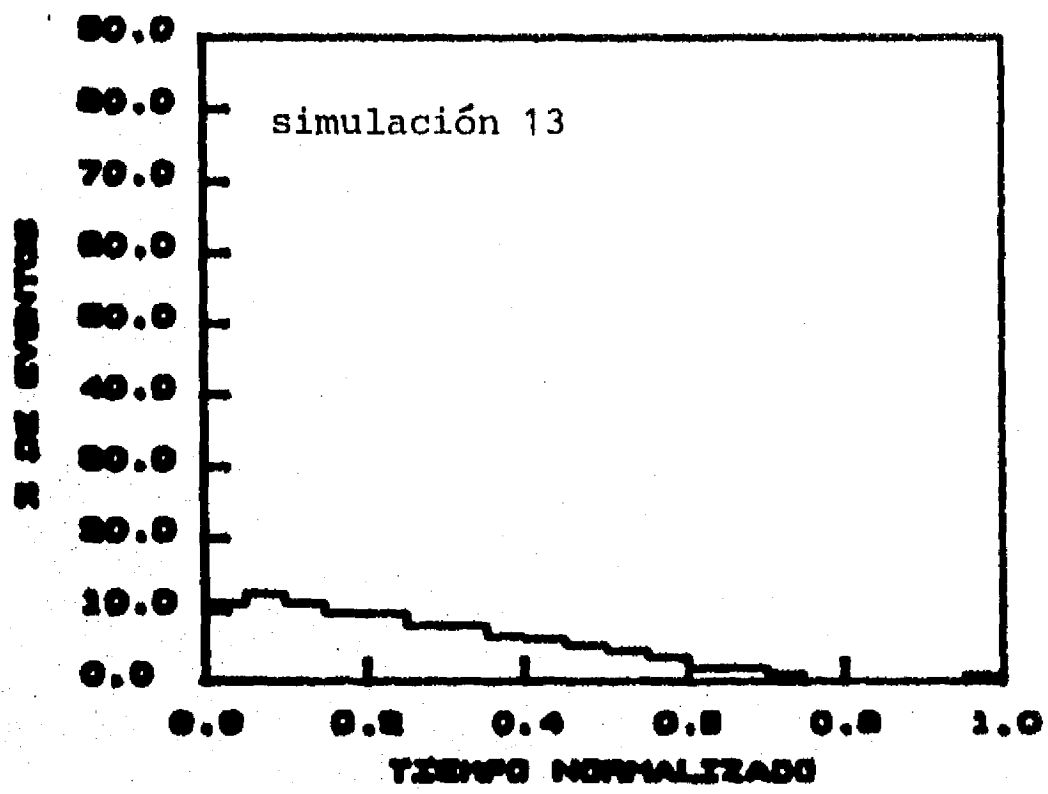


Fig 3.10a5 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

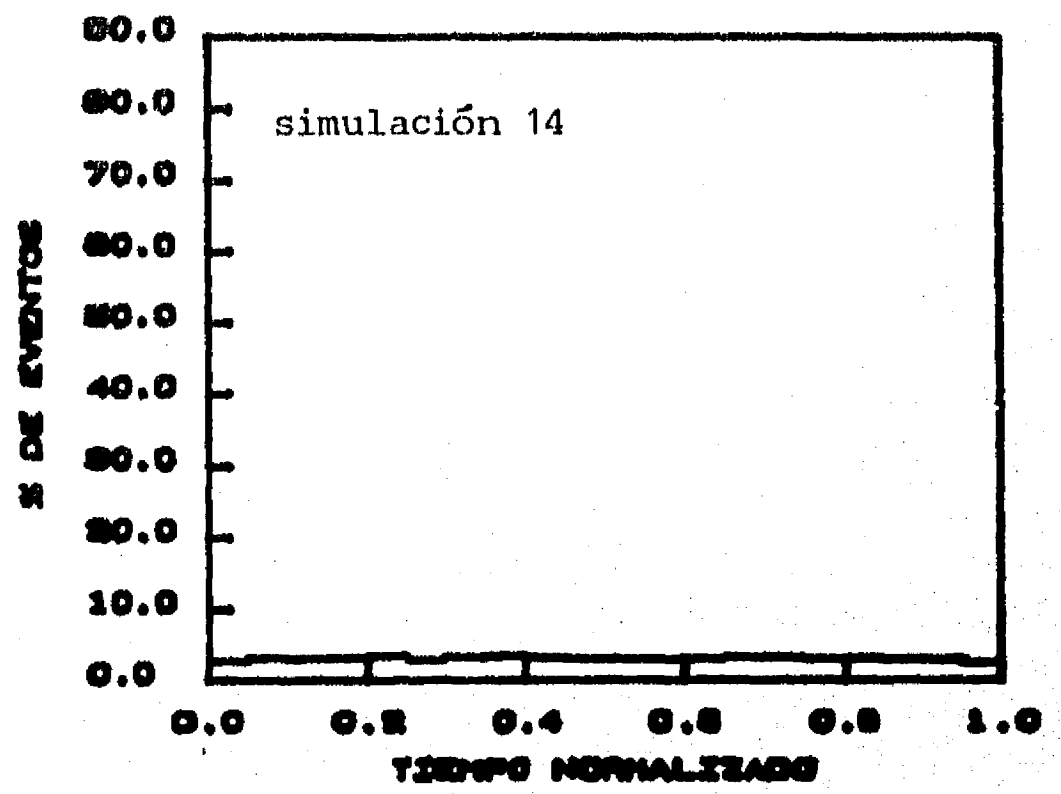


Fig 3.10a6 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

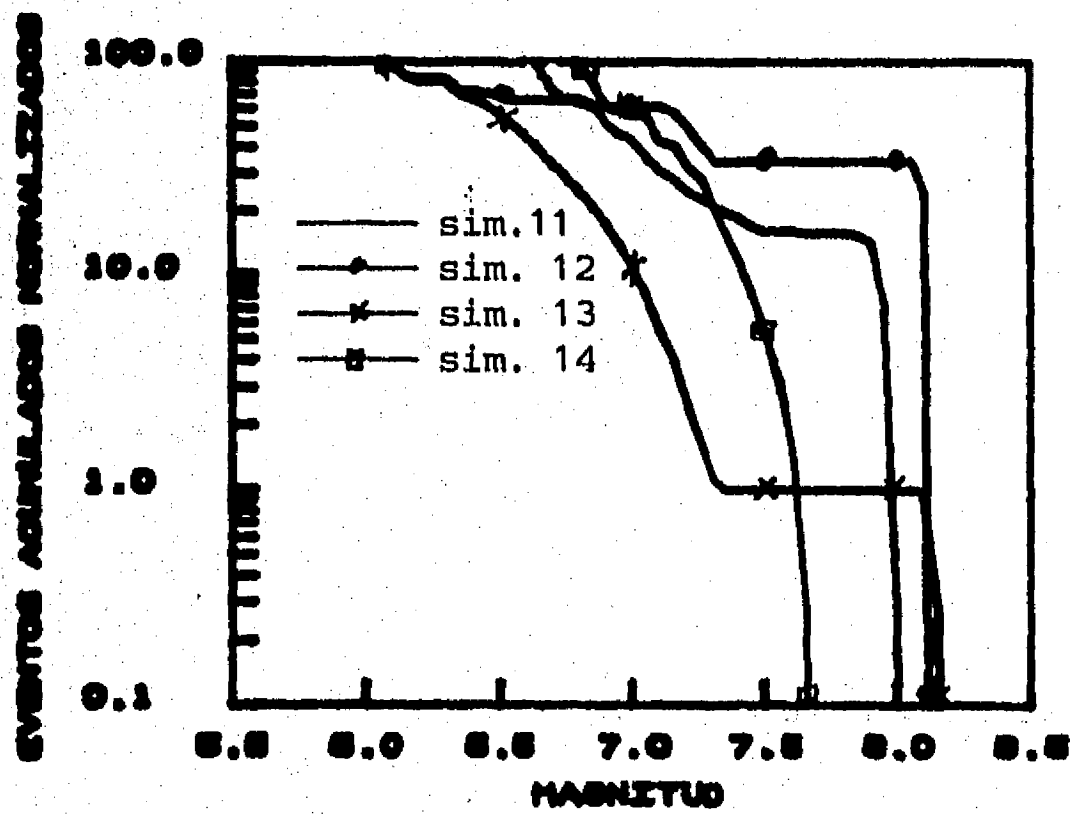


Fig 3.10b2 Número de temblores vs la magnitud

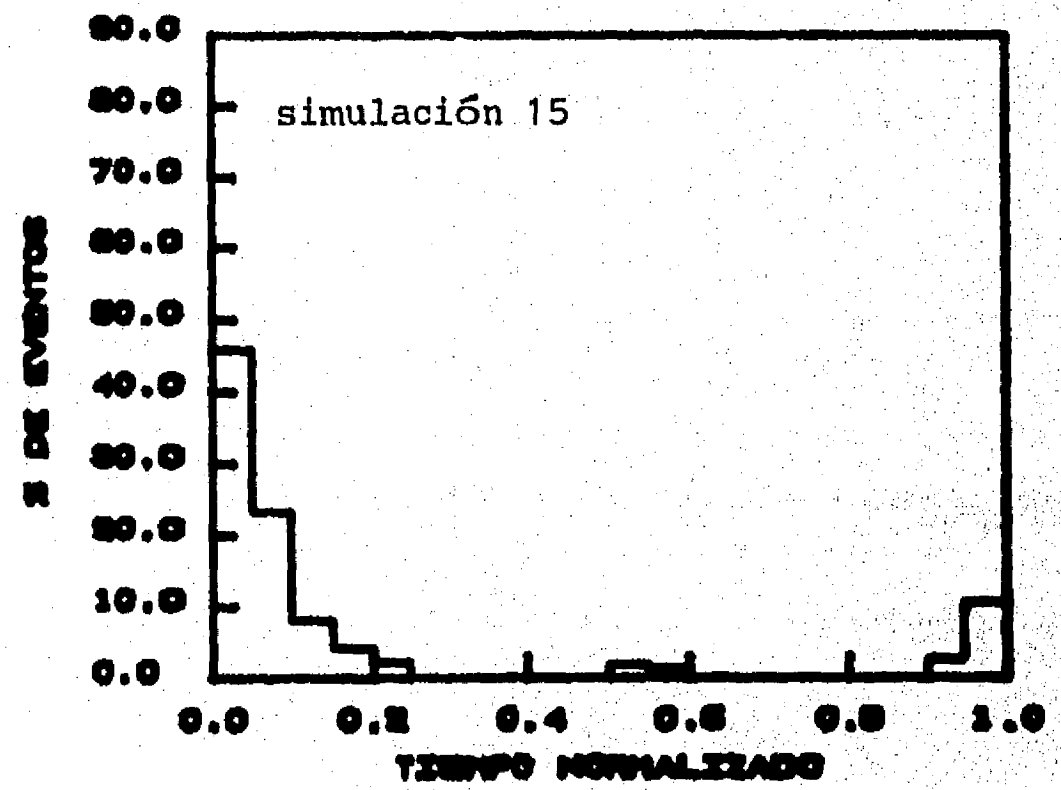


Fig 3.11a1 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

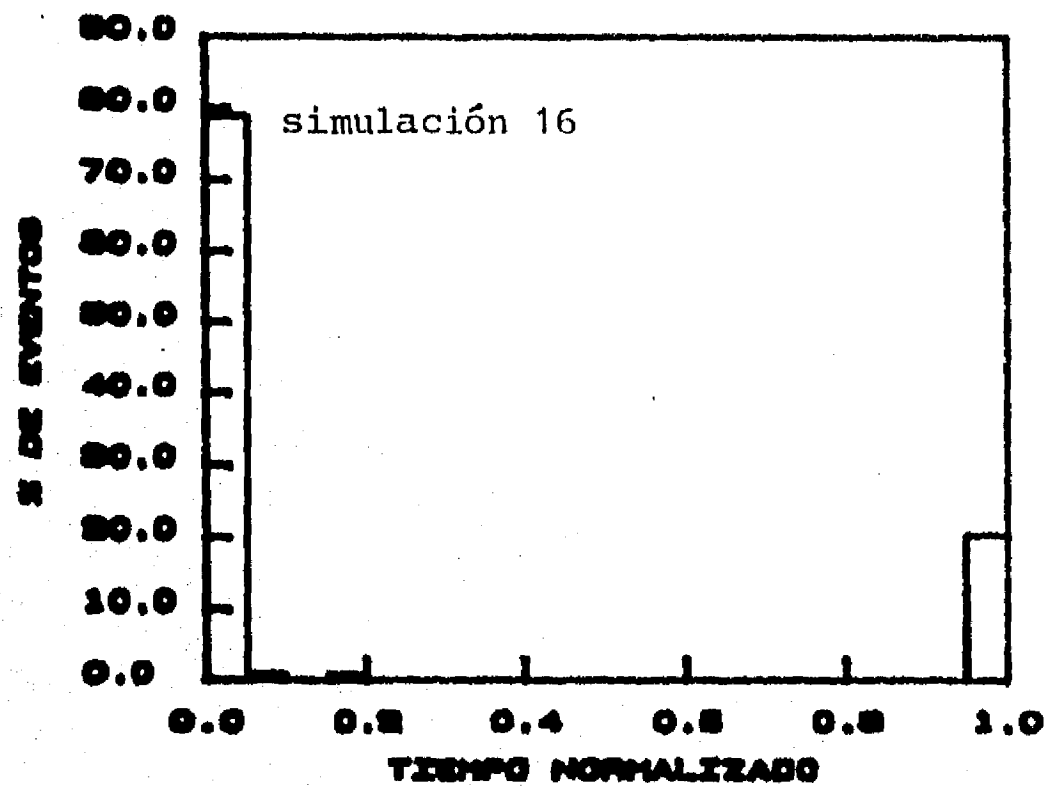


Fig 3.11a2 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

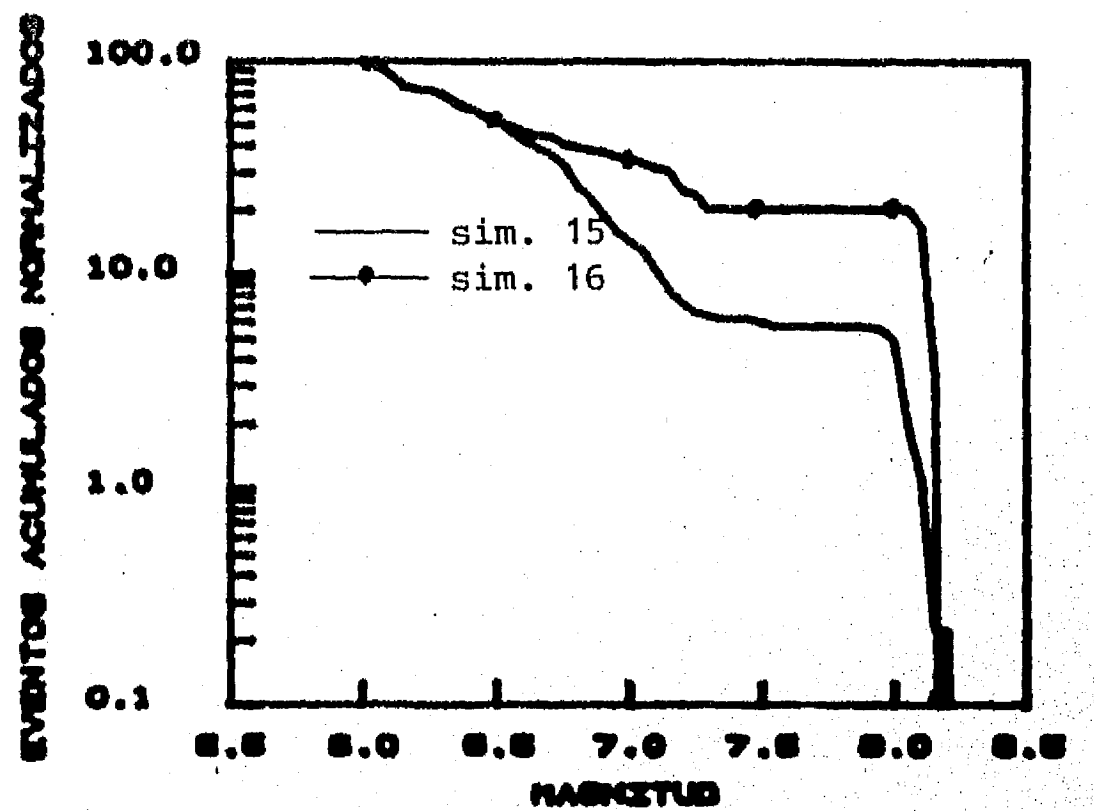


Fig 3.11b Número de temblores vs la magnitud

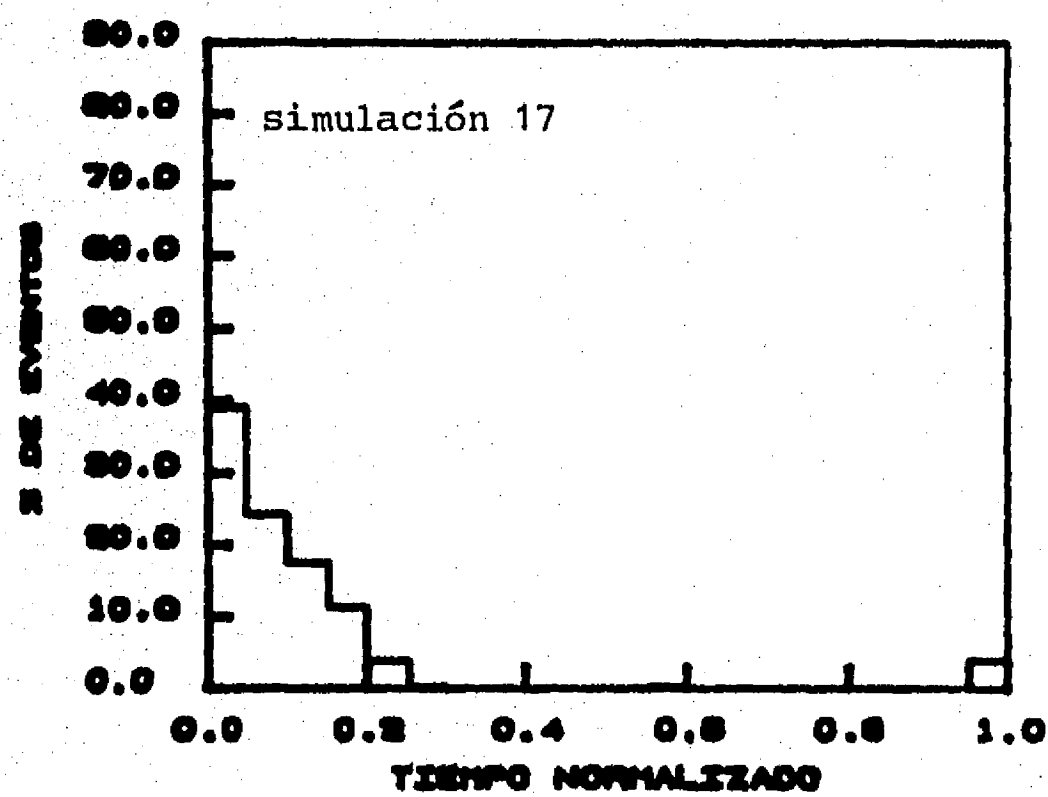


Fig 3.12a1 ocurrencia de eventos entre temblores característicos

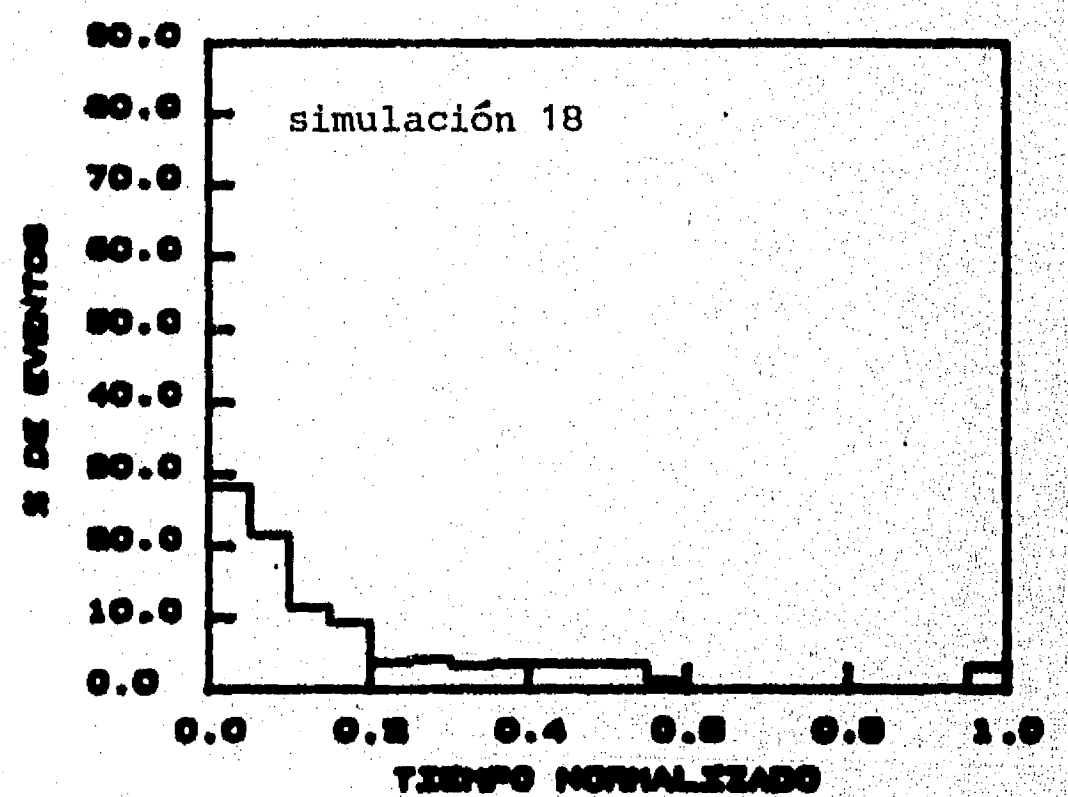


Fig 3.12a2 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

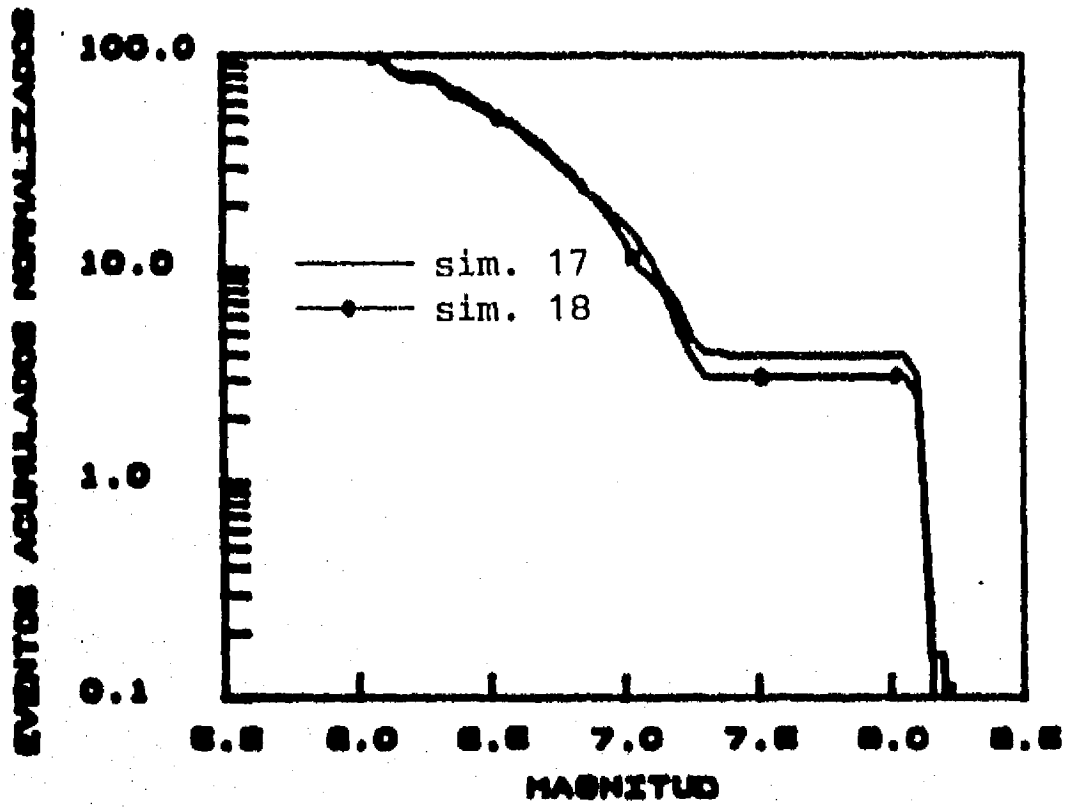


Fig 3.12b1 Número de temblores vs la magnitud

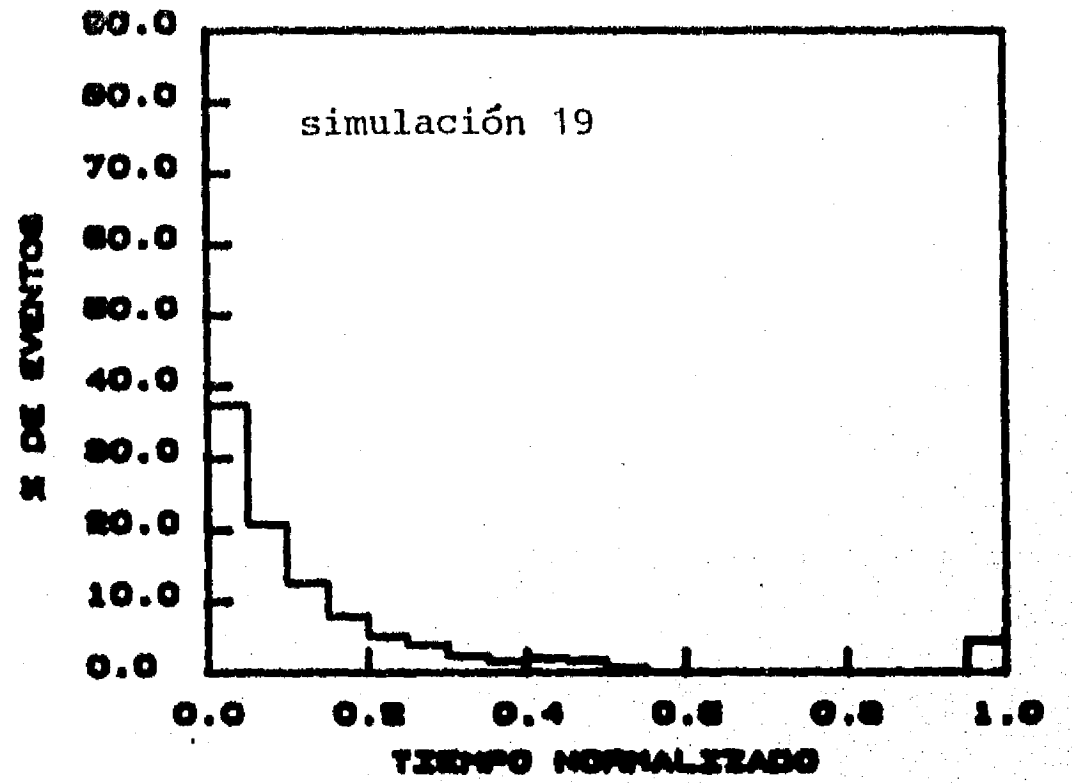


Fig 3.12a3 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

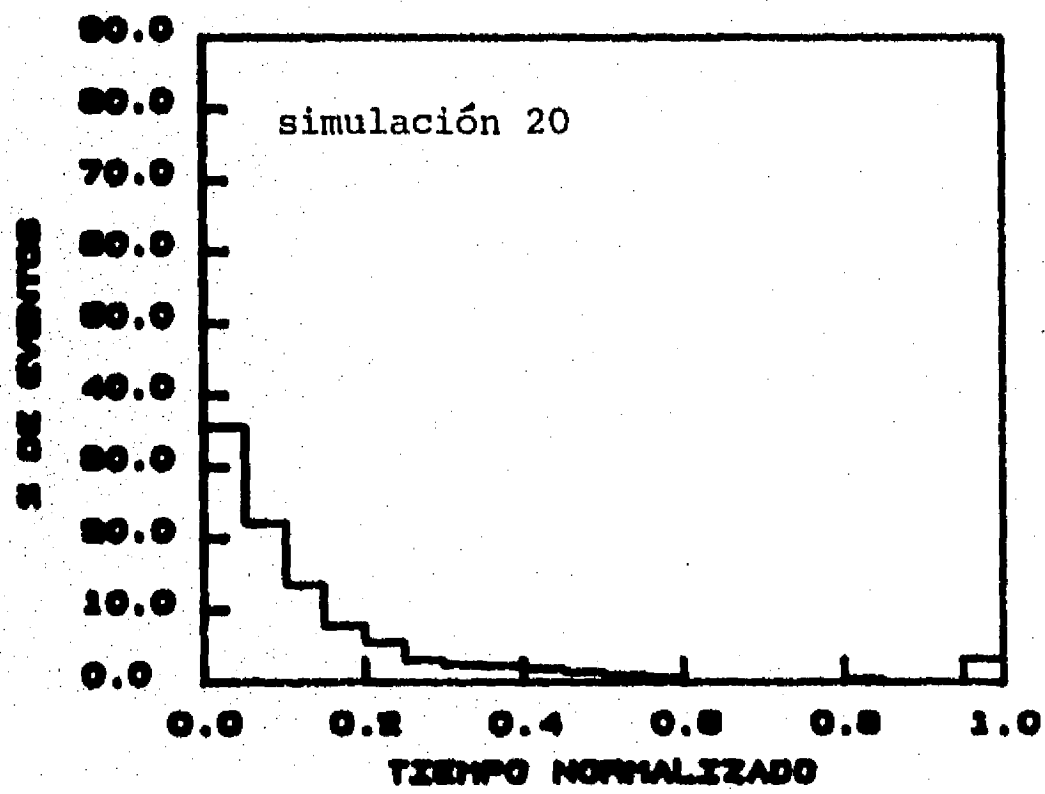


Fig 3.12a4 Ocurrencia de eventos entre temblores característicos

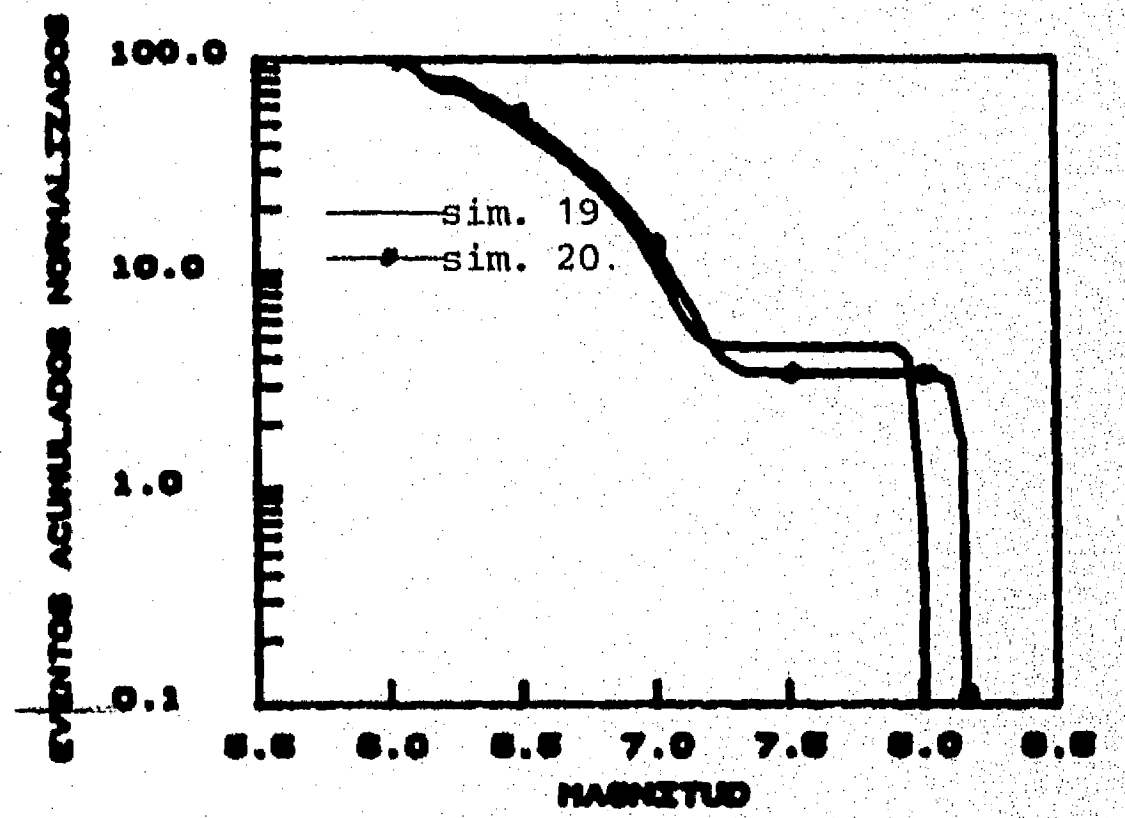


Fig 3.12b2 Número de temblores vs la magnitud

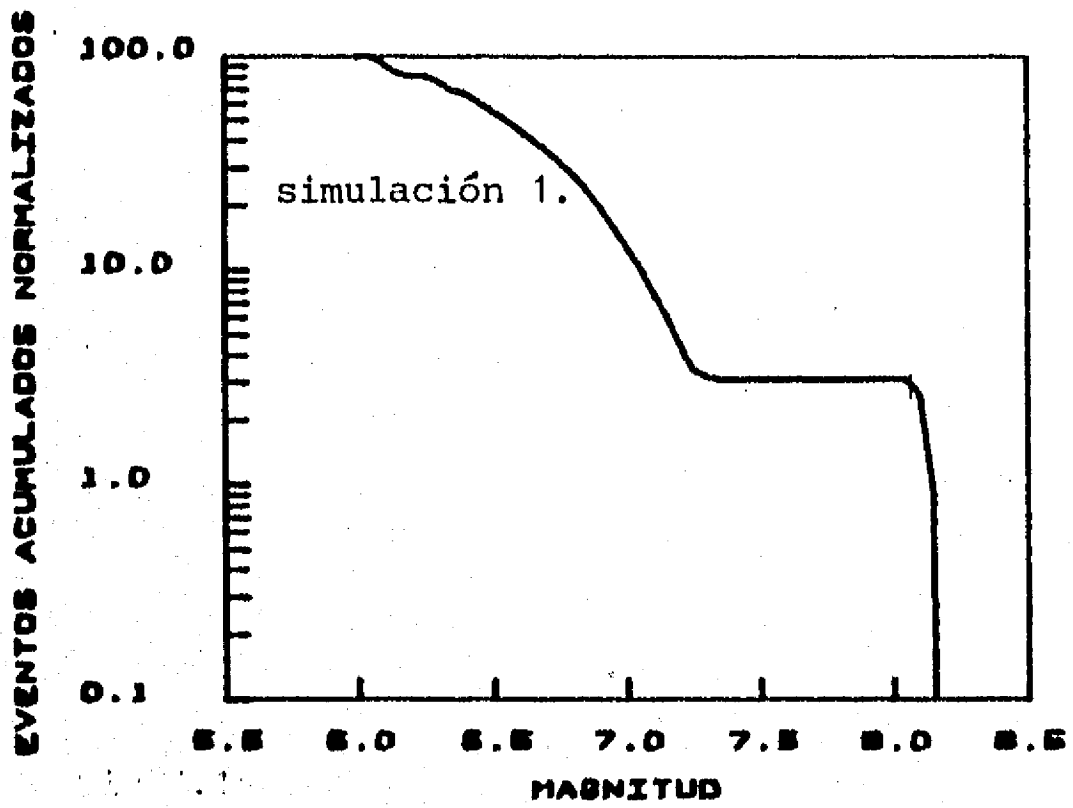


Fig 4.1a Número de temblores vs la magnitud

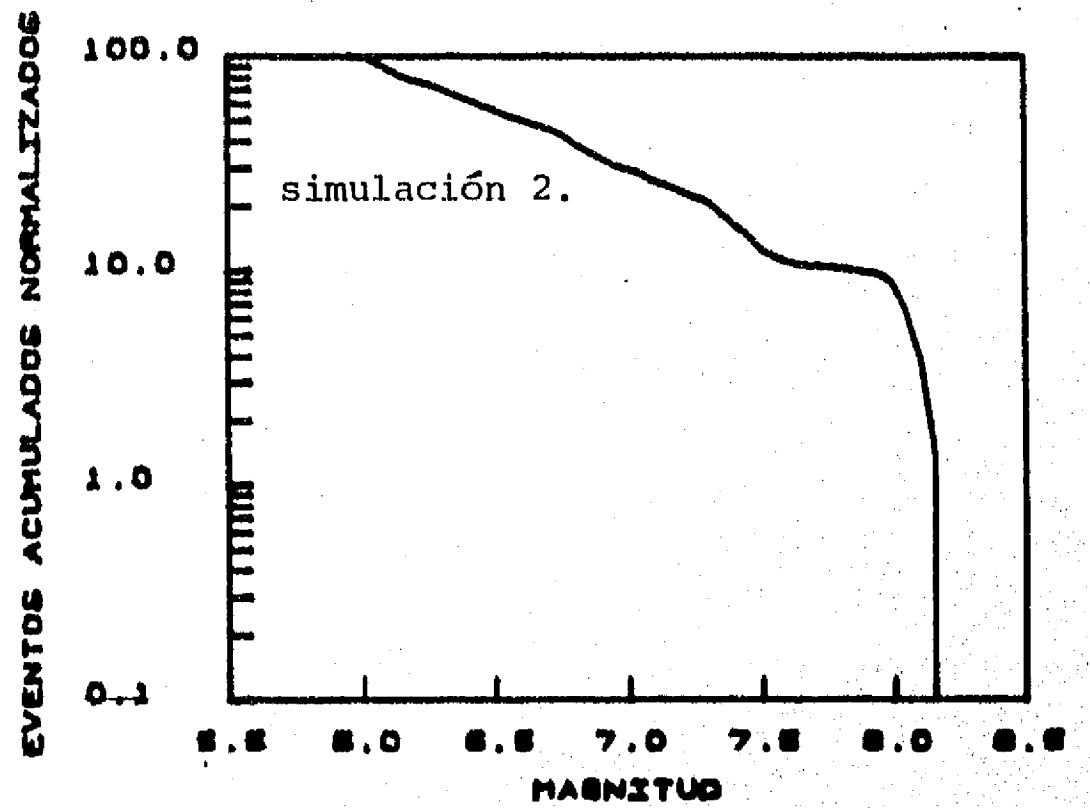


Fig 4.1b Número de temblores vs la magnitud

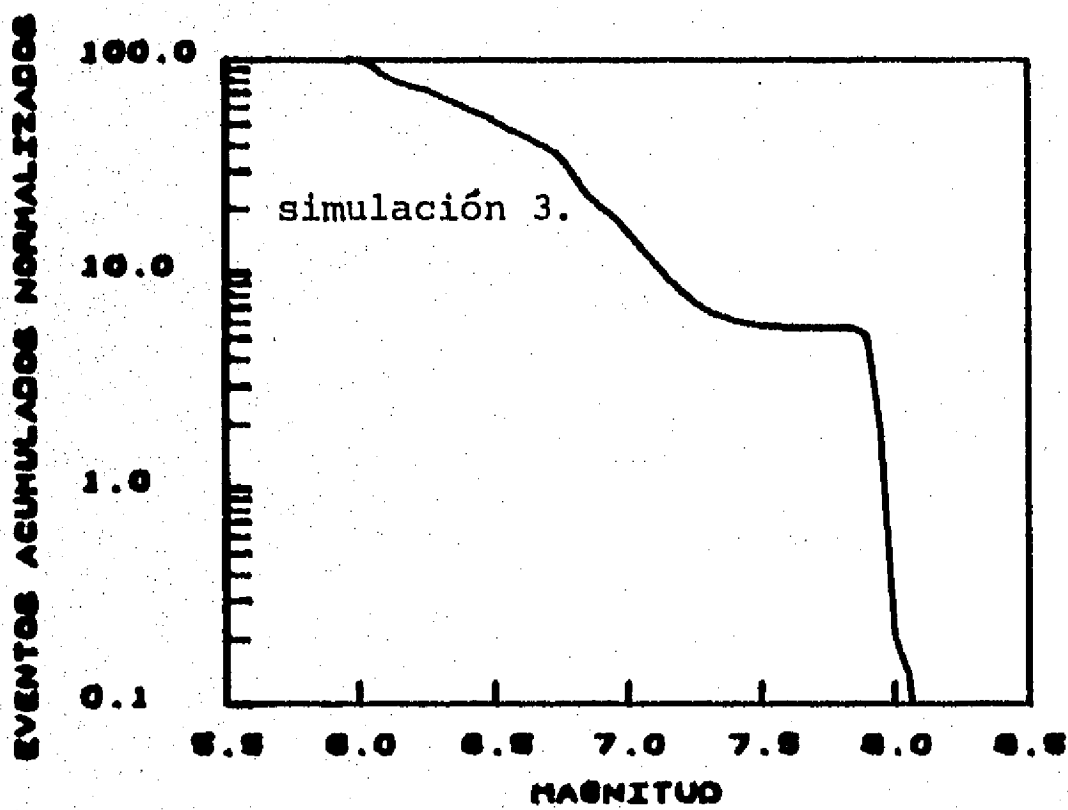


Fig 4.1c Número de temblores vs la magnitud

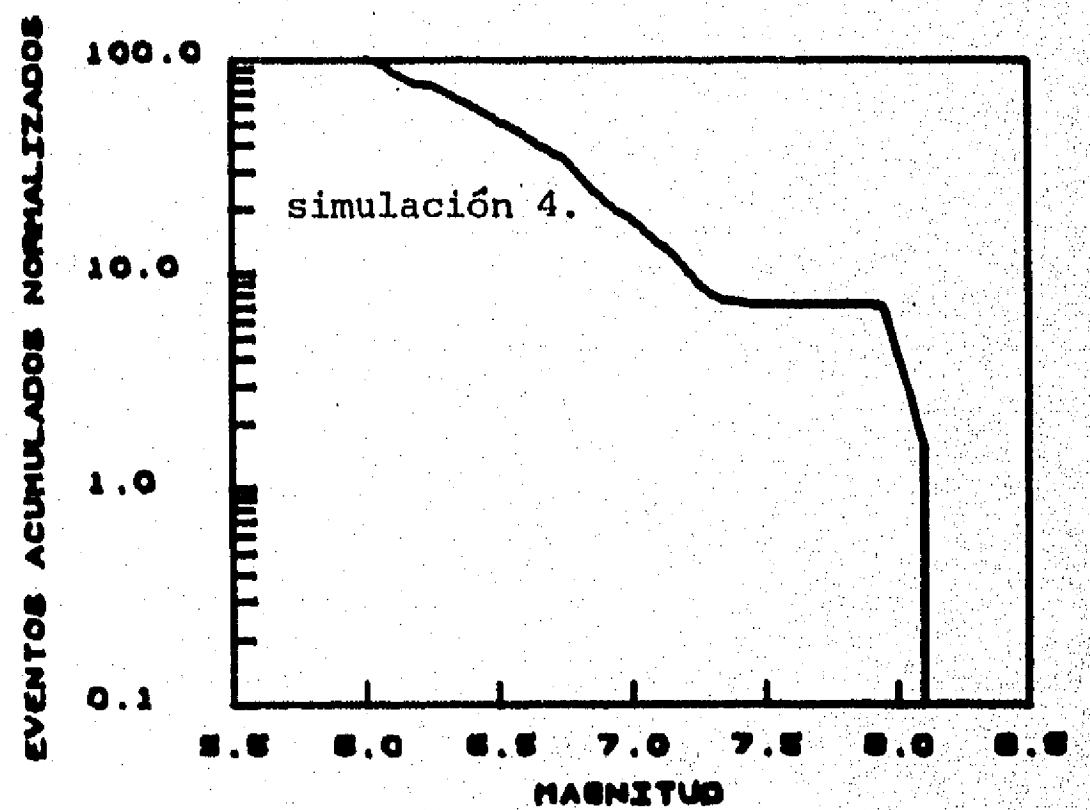


Fig 4.1d Número de temblores vs la magnitud

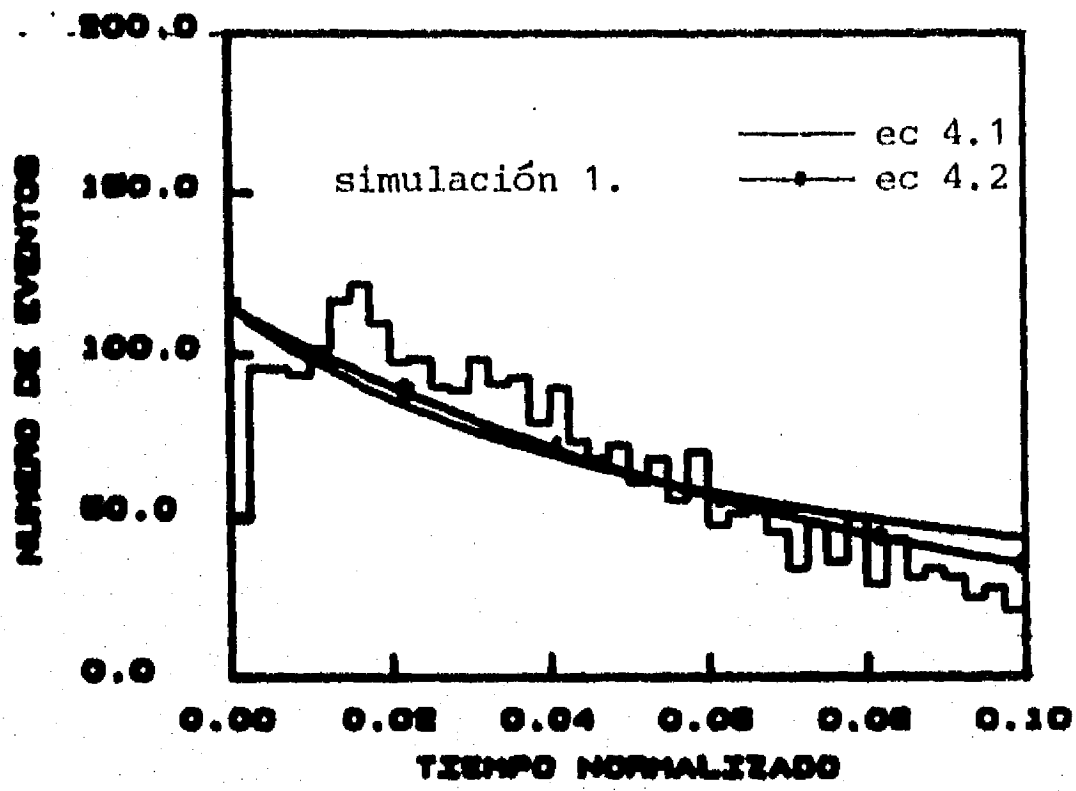


Fig 4.2a Ocurrencia de las réplicas

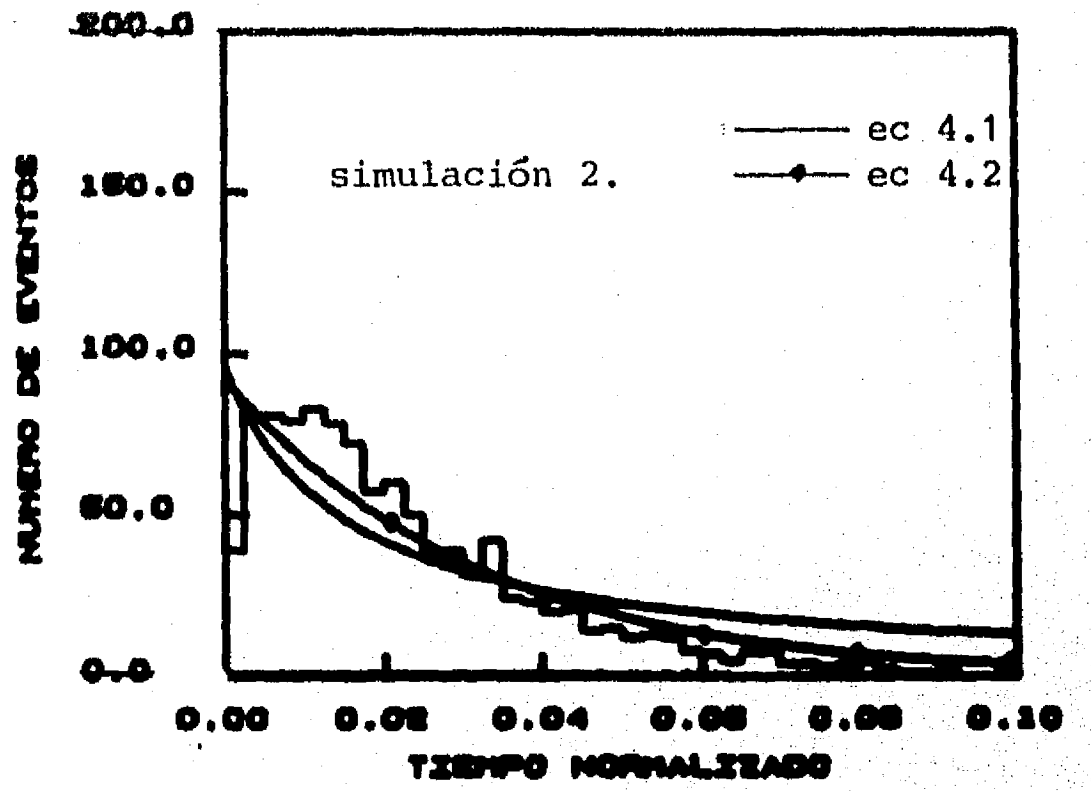


Fig 4.2b Ocurrencia de las réplicas

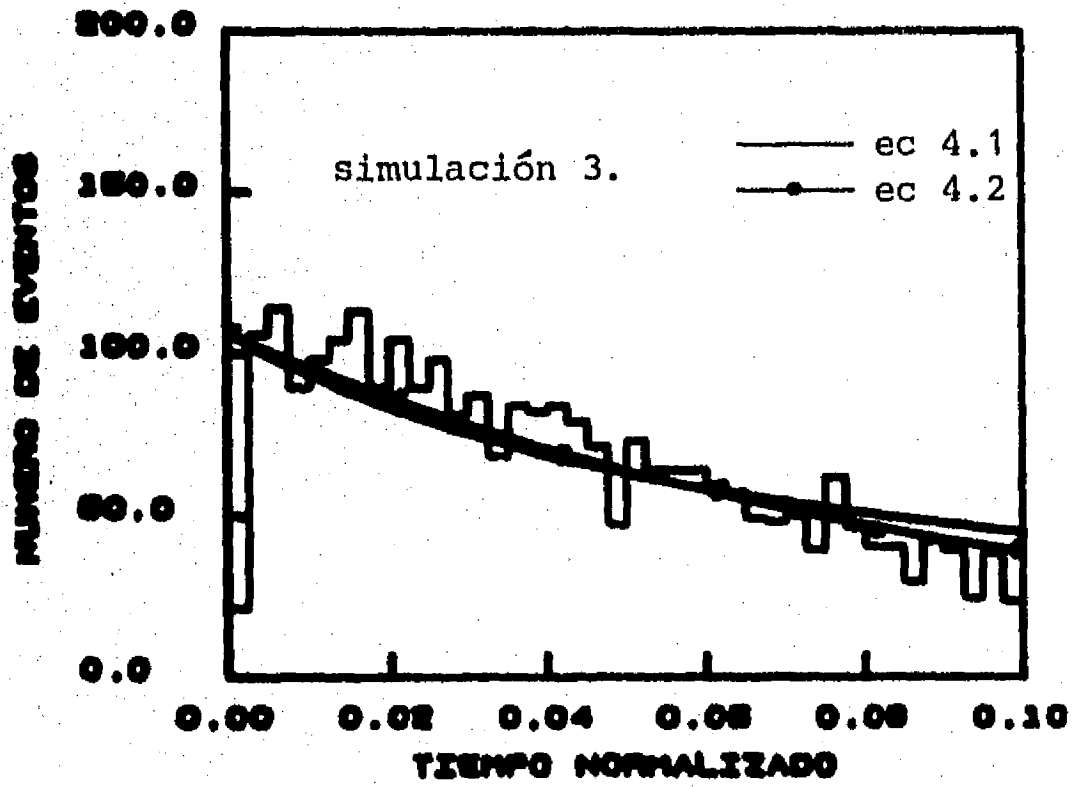


Fig 4.2c Ocurrencia de las réplicas

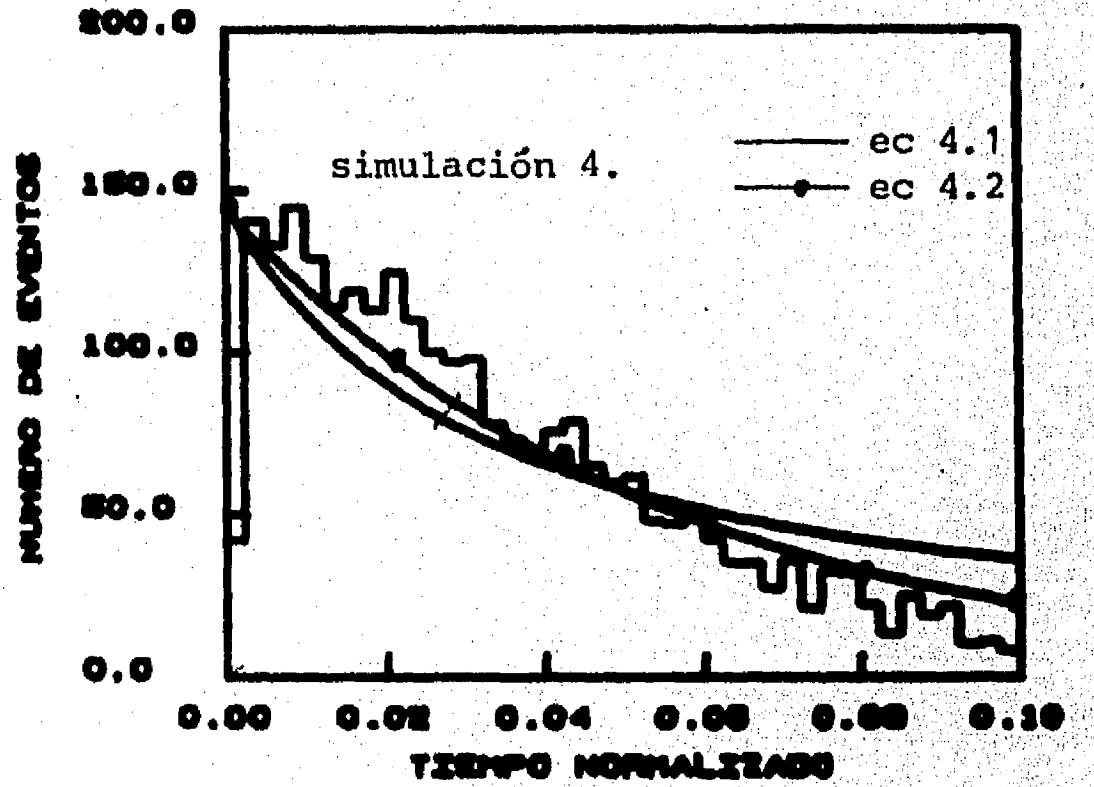


Fig 4.2d Ocurrencia de las réplicas

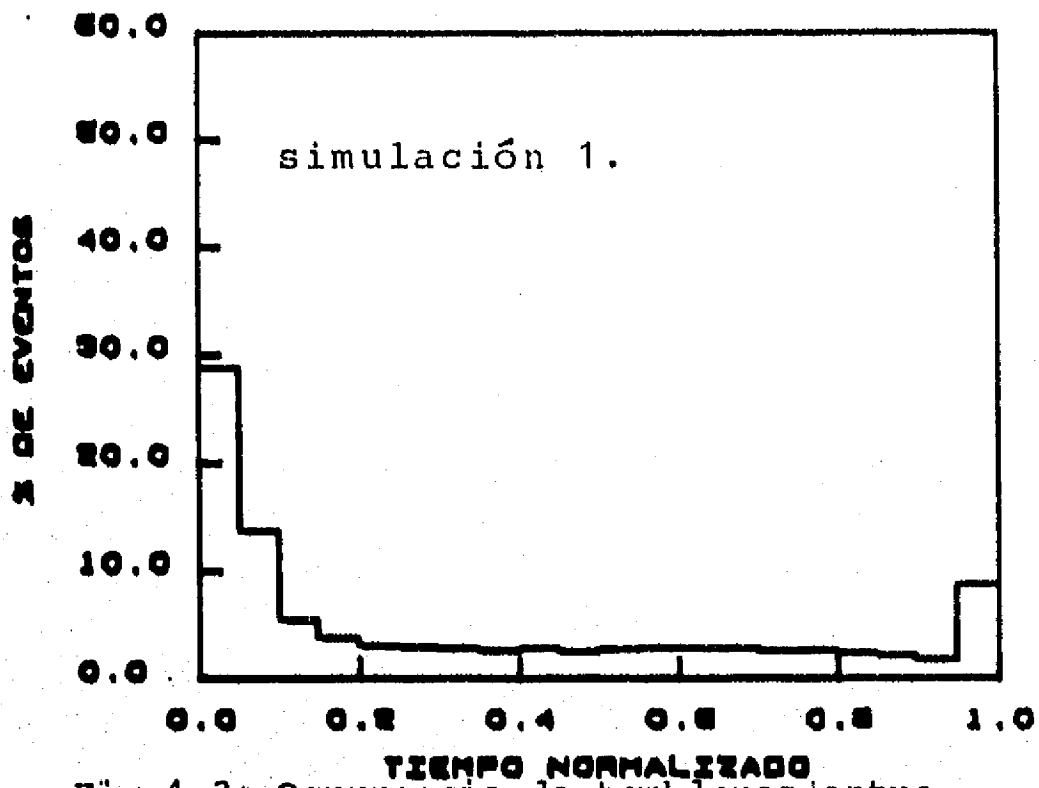


Fig 4.3a Ocurrencia de temblores entre temblores característicos

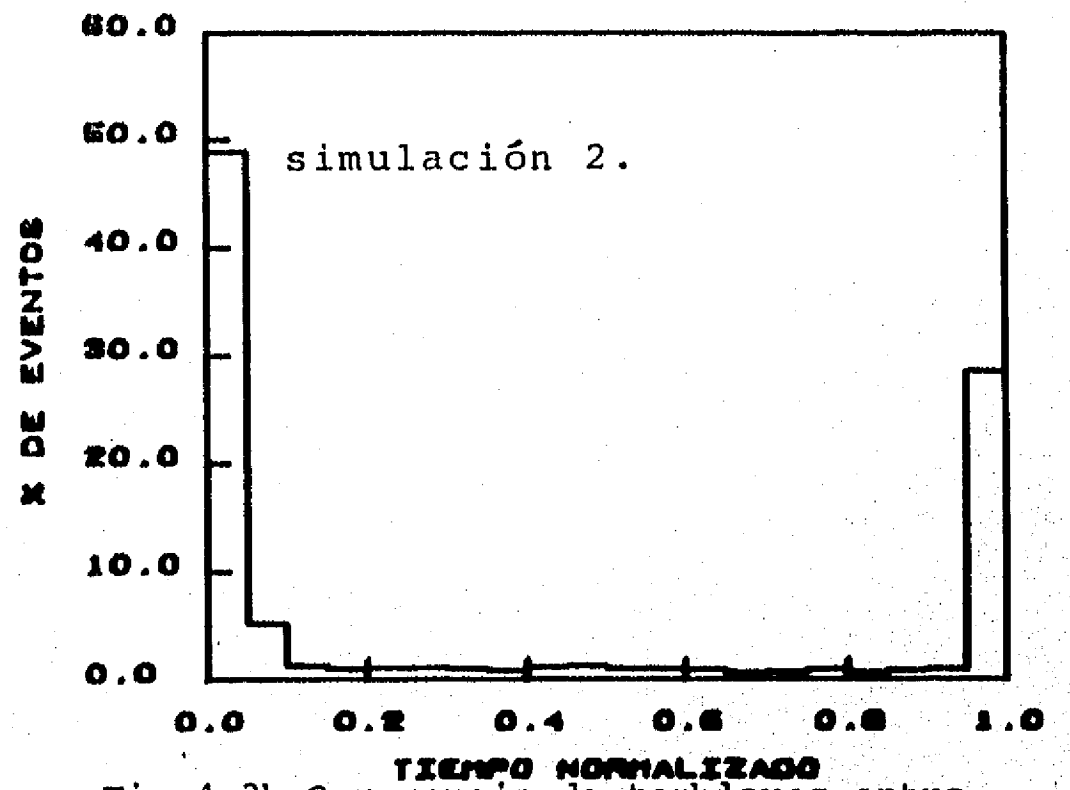


Fig 4.3b Ocurrencia de temblores entre temblores característicos

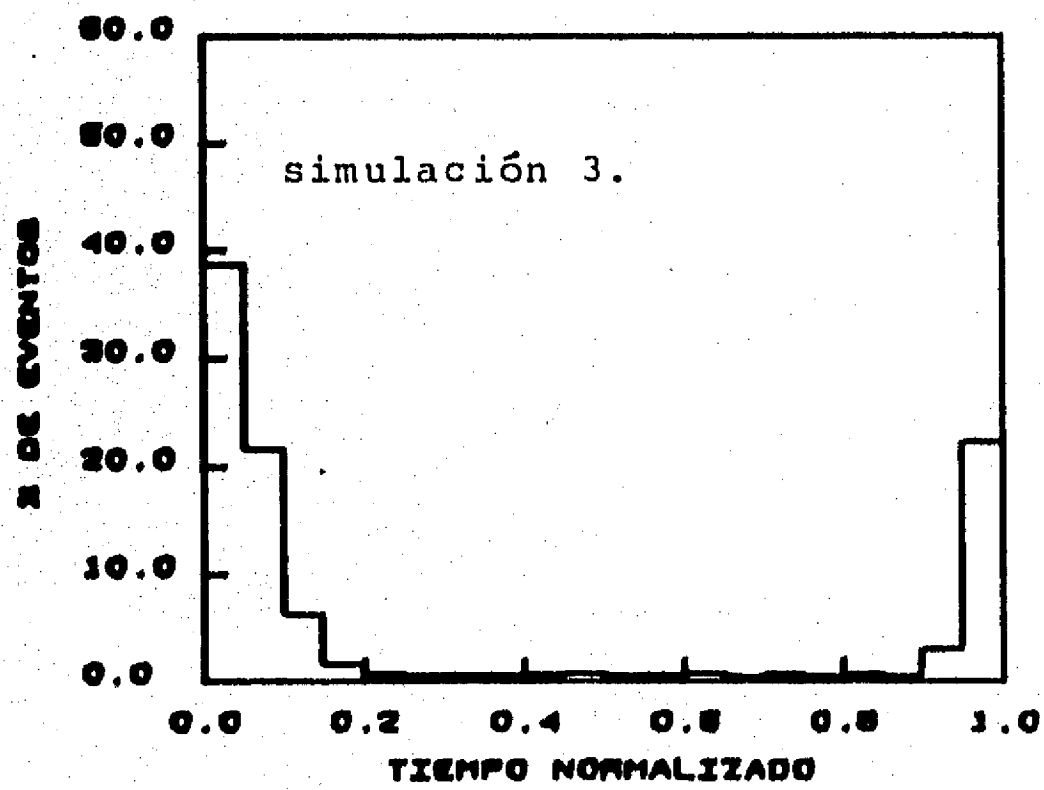


Fig 4.3c Ocurrencia de temblores entre temblores característicos

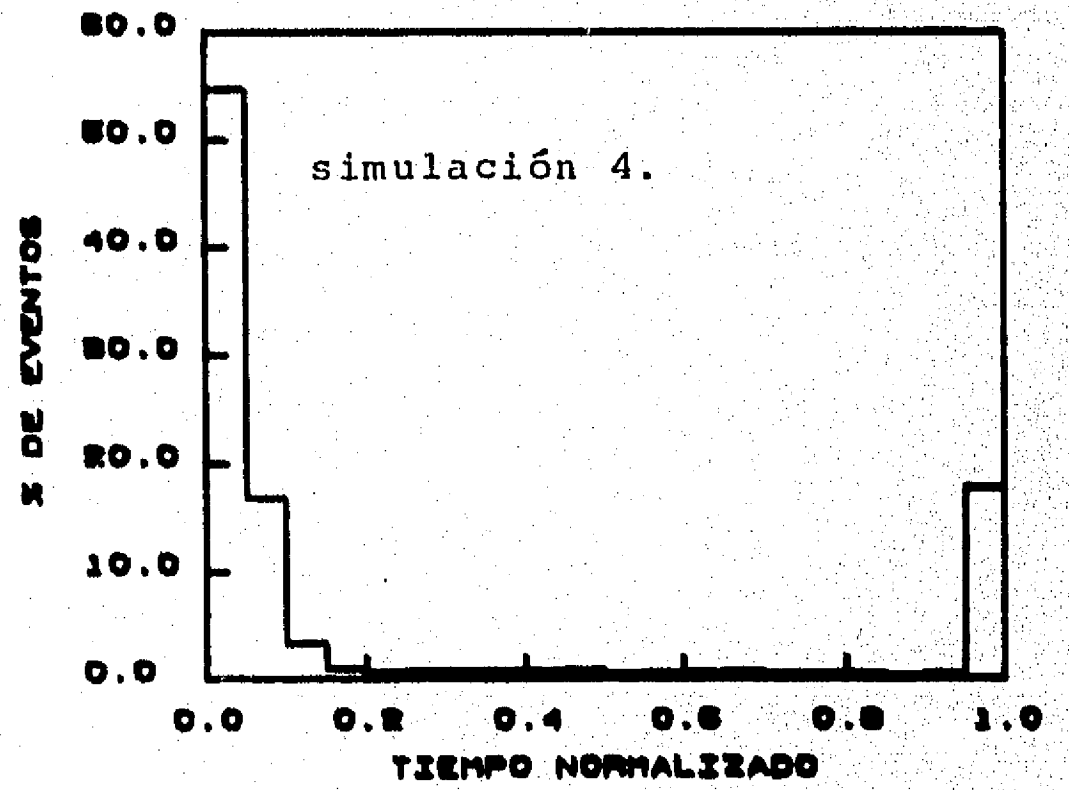


Fig 4.4d Ocurrencia de temblores entre temblores característicos

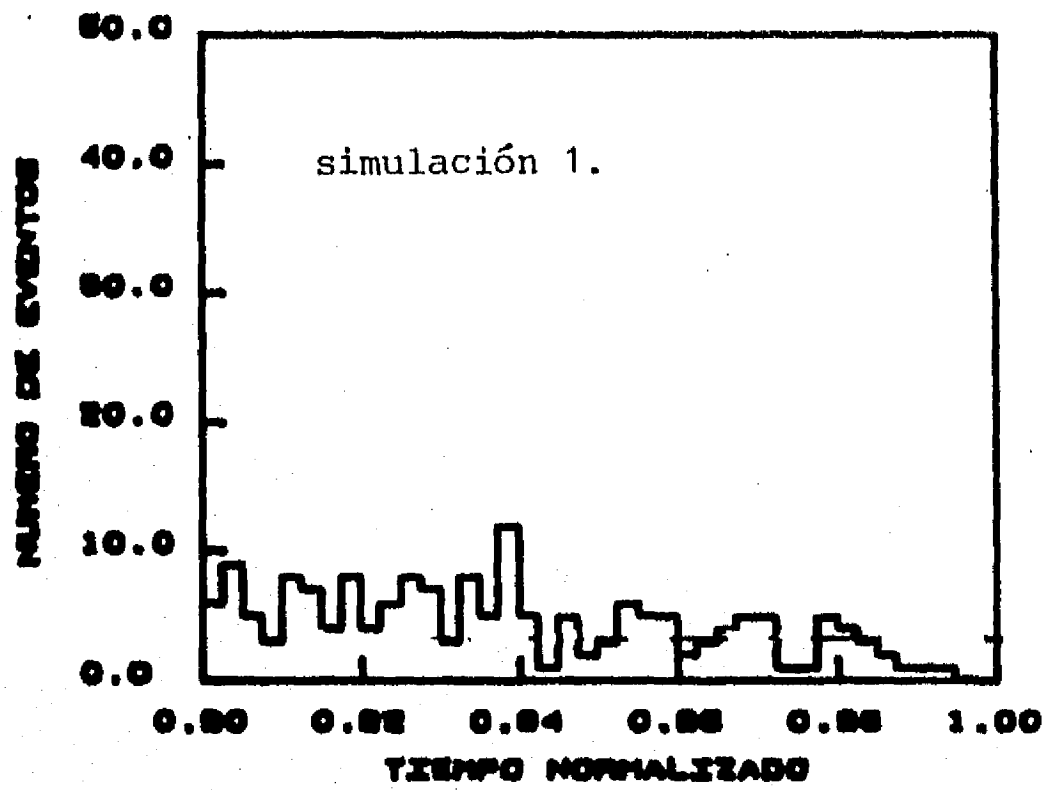


Fig 4.4a Ocurrencia de los precursores

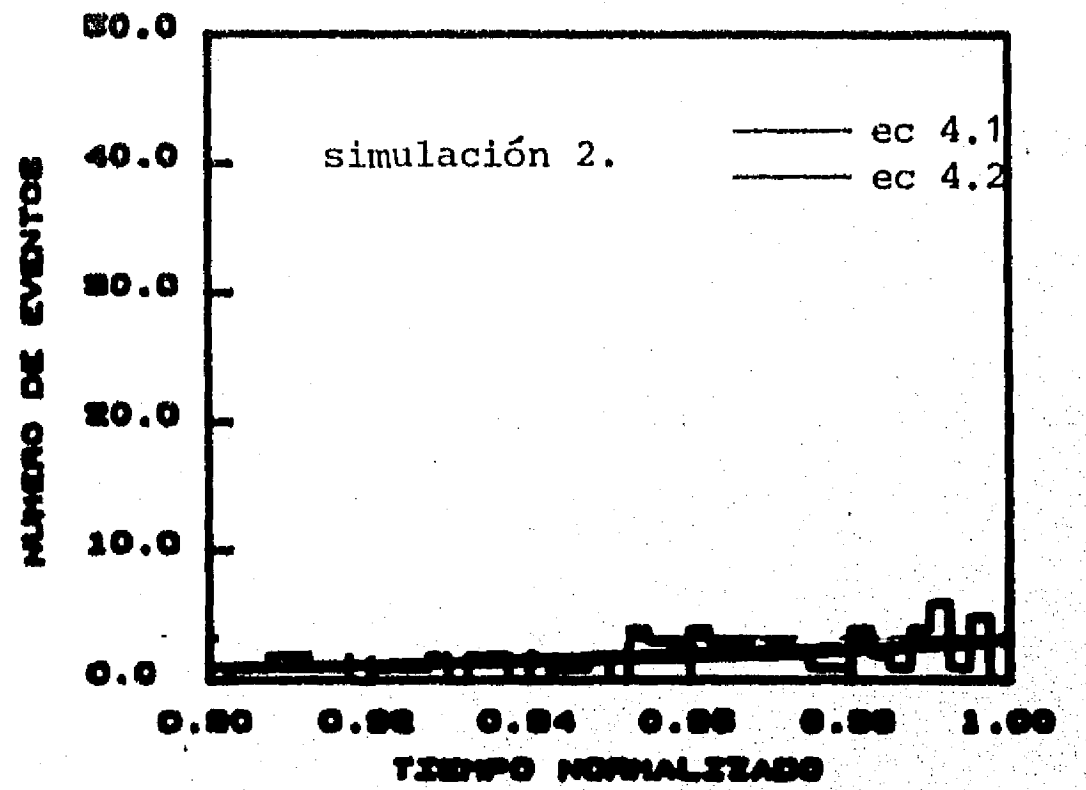


Fig 4.4b Ocurrencia de los precursores

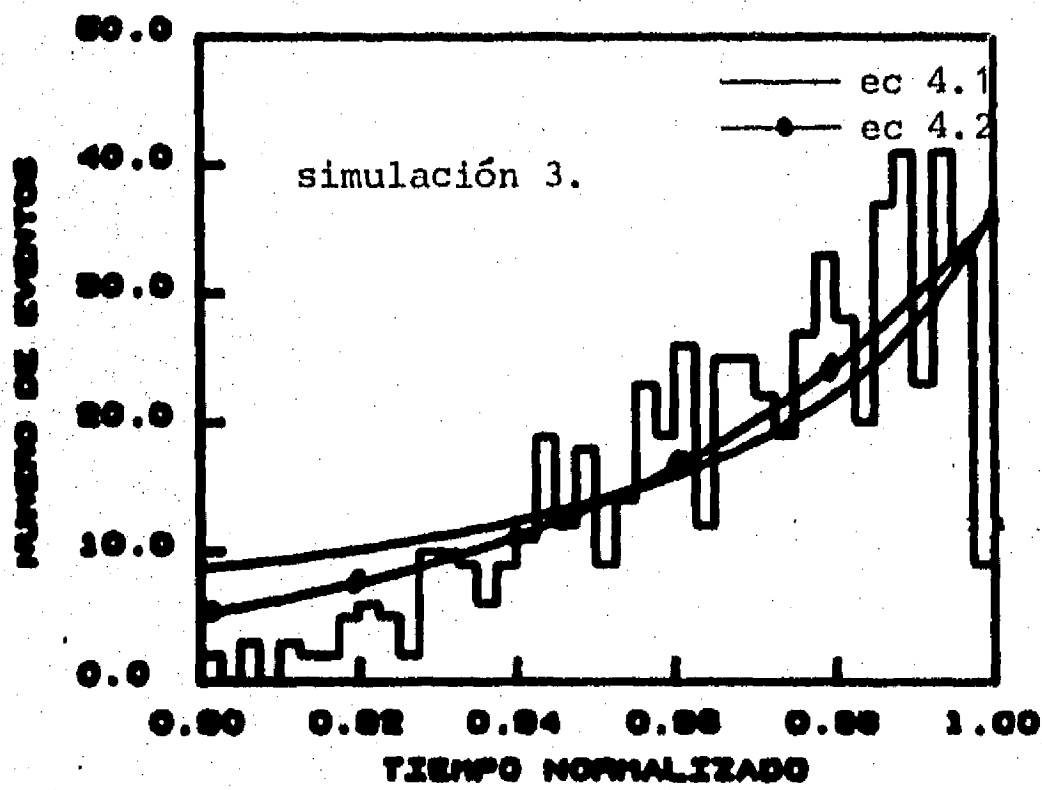


Fig 4.4c Ocurrencia de los precursores

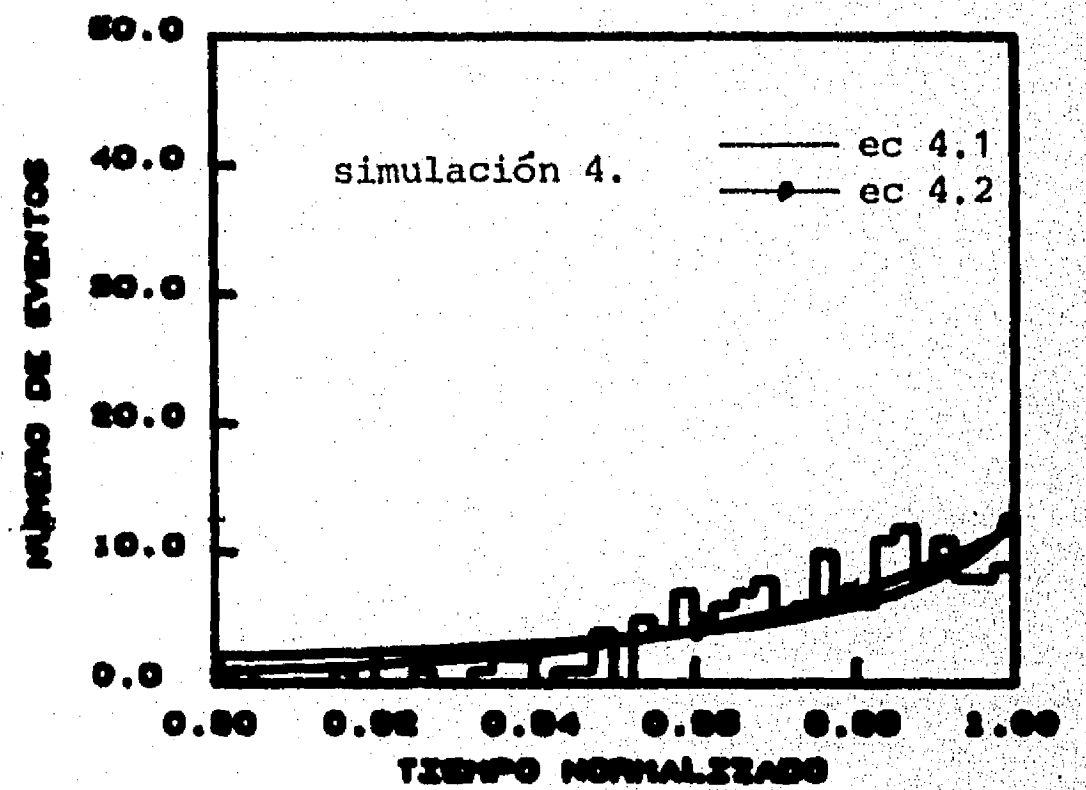


Fig 4.4d Ocurrencia de los precursores

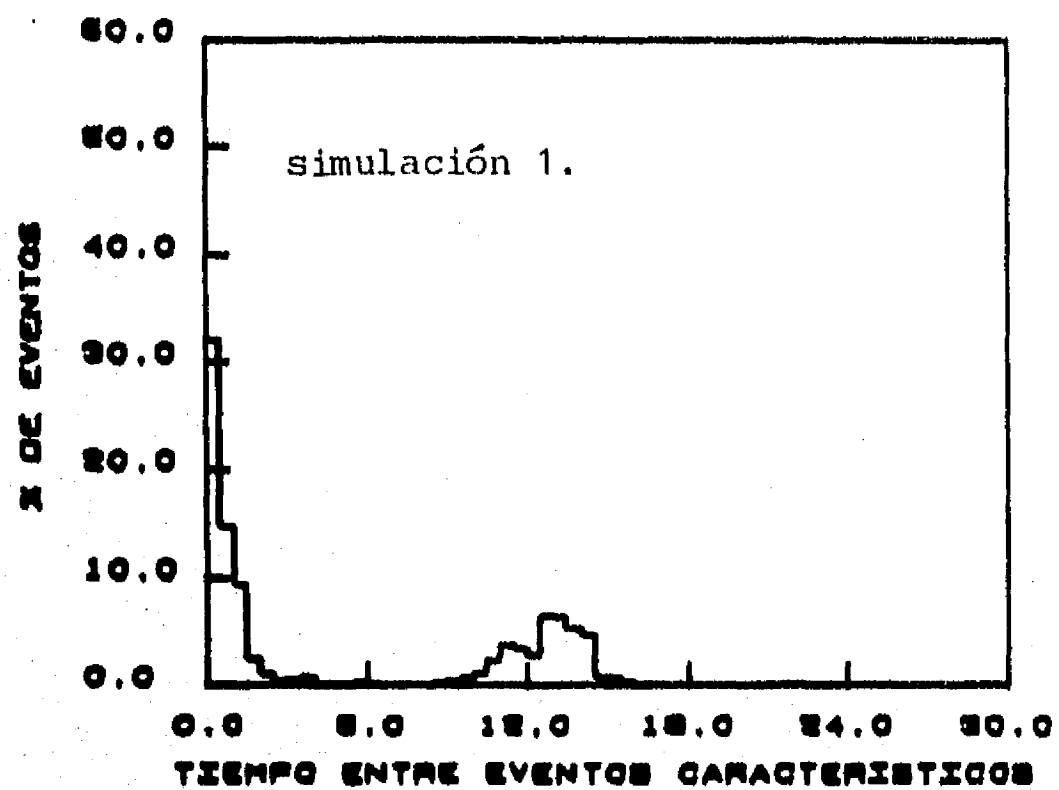


Fig 4.5a Histograma del tiempo entre temblores característicos

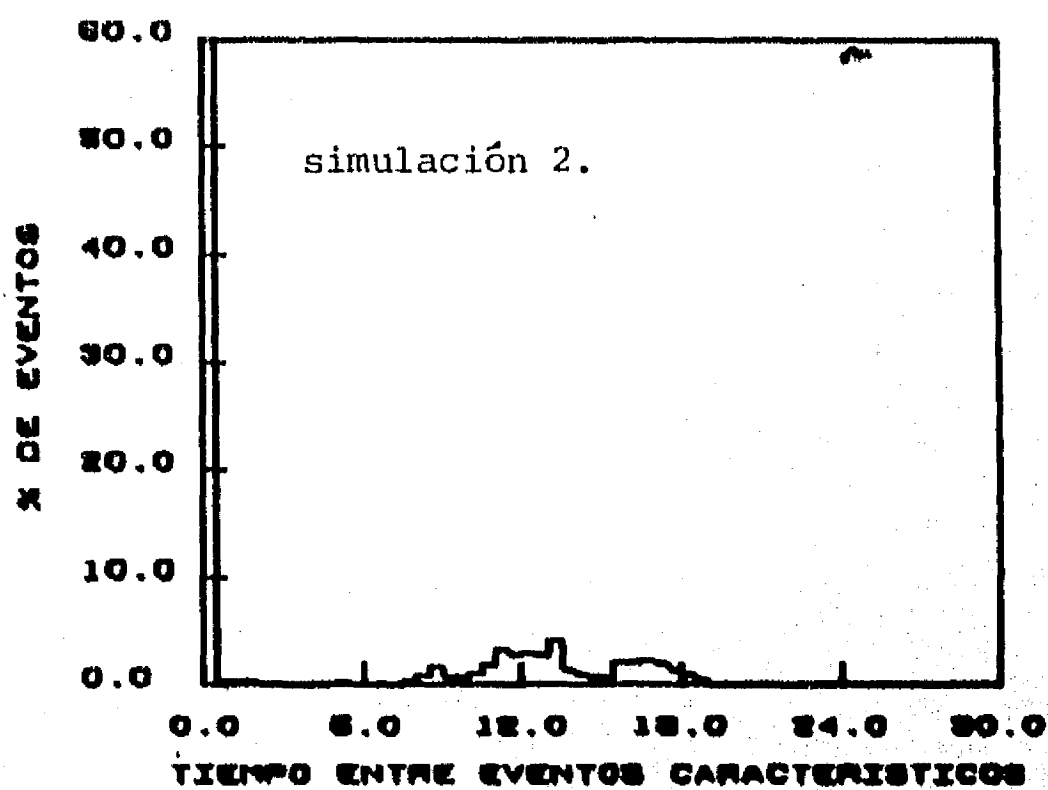


Fig 4.5b Histograma del tiempo entre temblores característicos

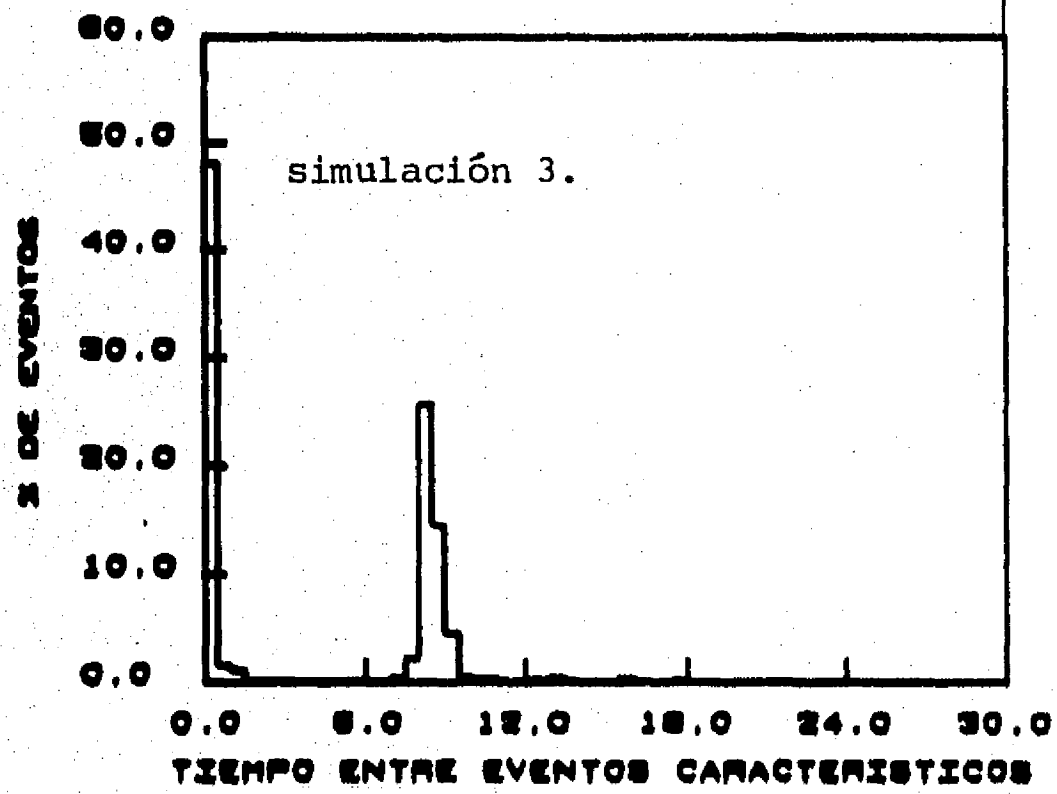


Fig 4.5c Histograma del tiempo entre temblores característicos

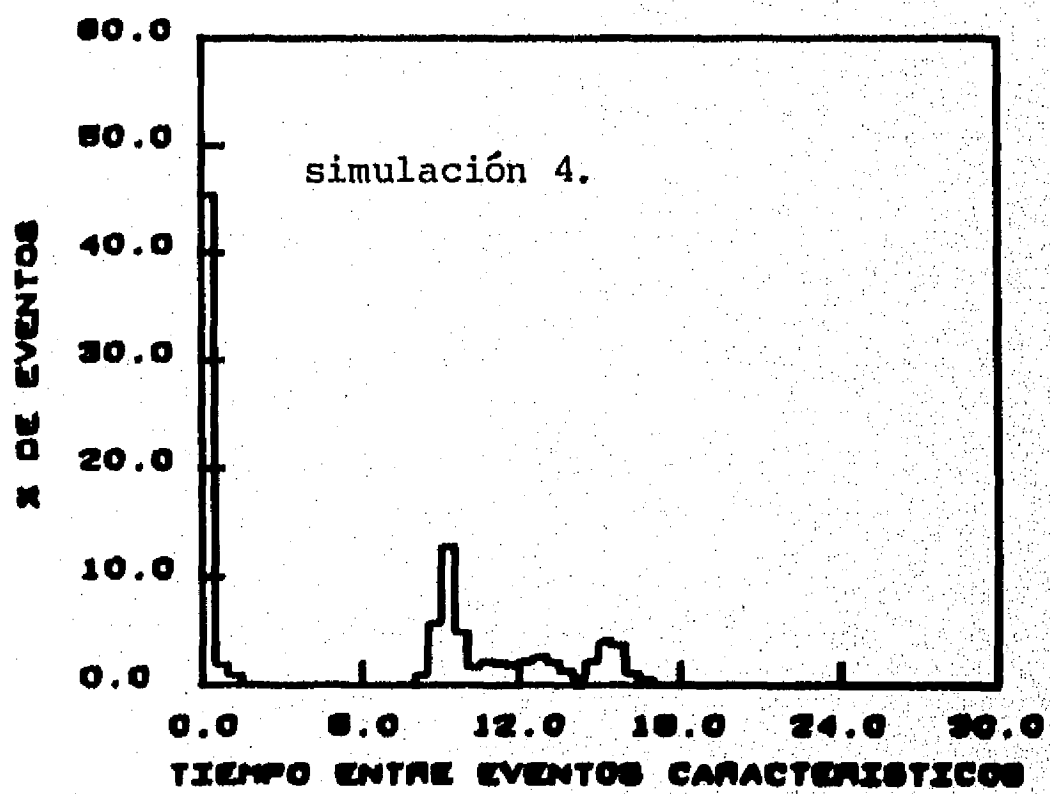


Fig 4.5d Histograma del tiempo entre temblores característicos

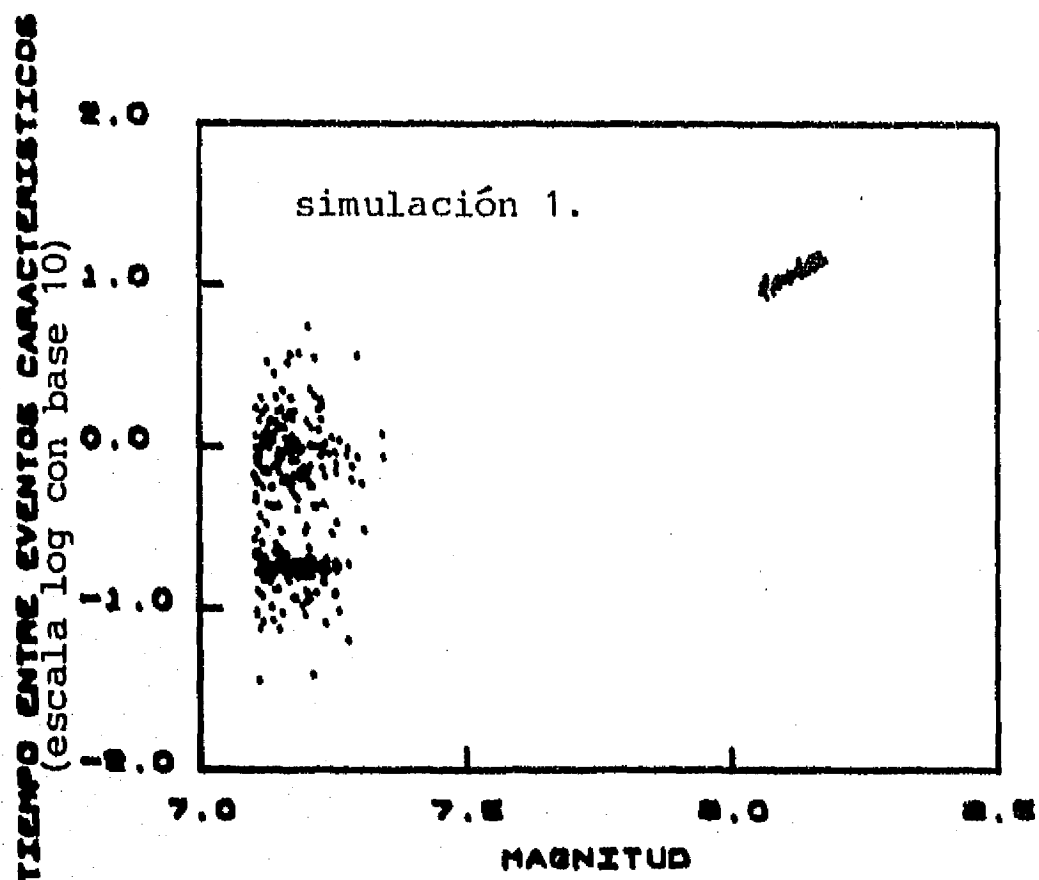


Fig 4.6a Correlación entre el tiempo de espera y la magnitud

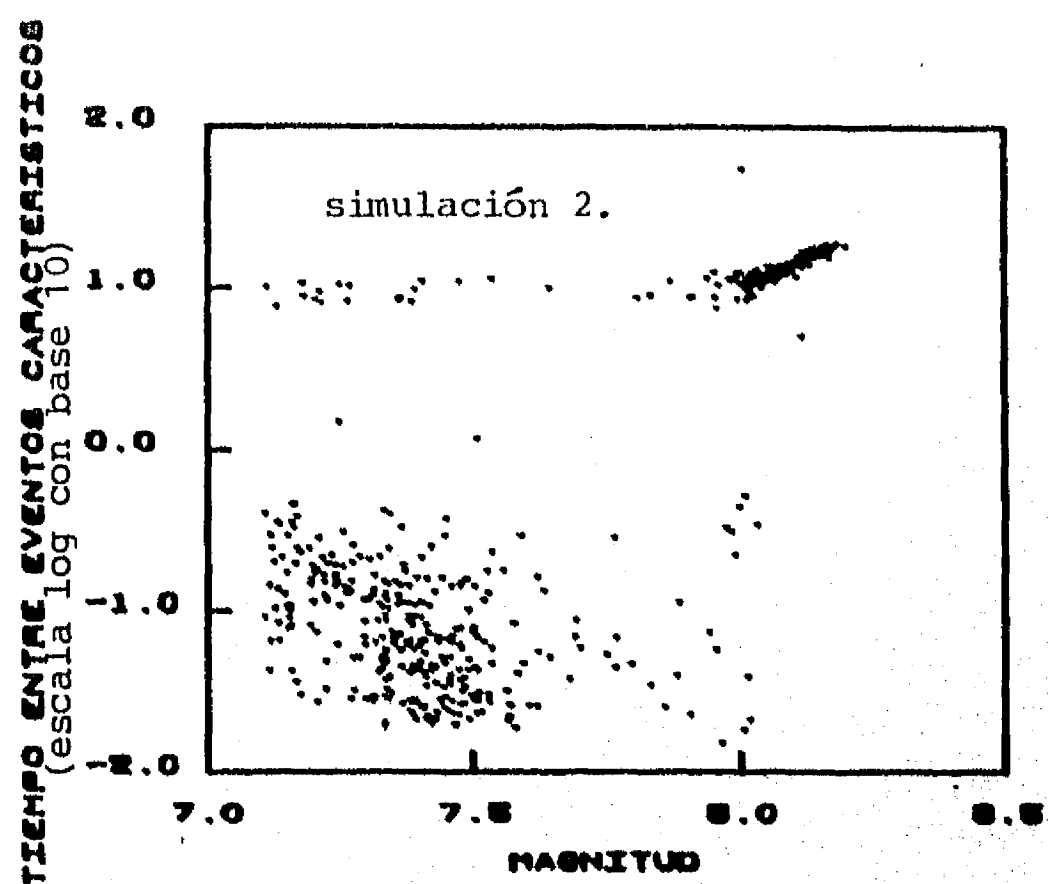


Fig 4.6b Correlación entre el tiempo de espera y la magnitud

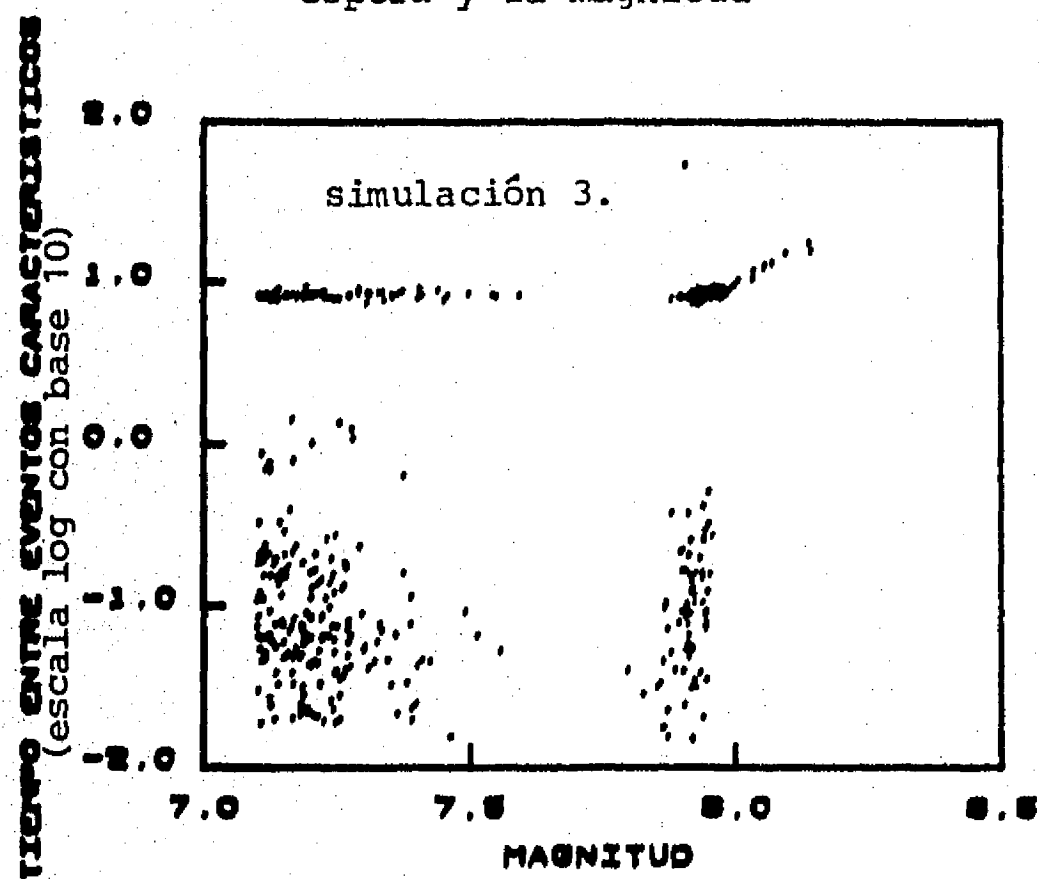


Fig 4.6c Correlación entre el tiempo de espera y la magnitud

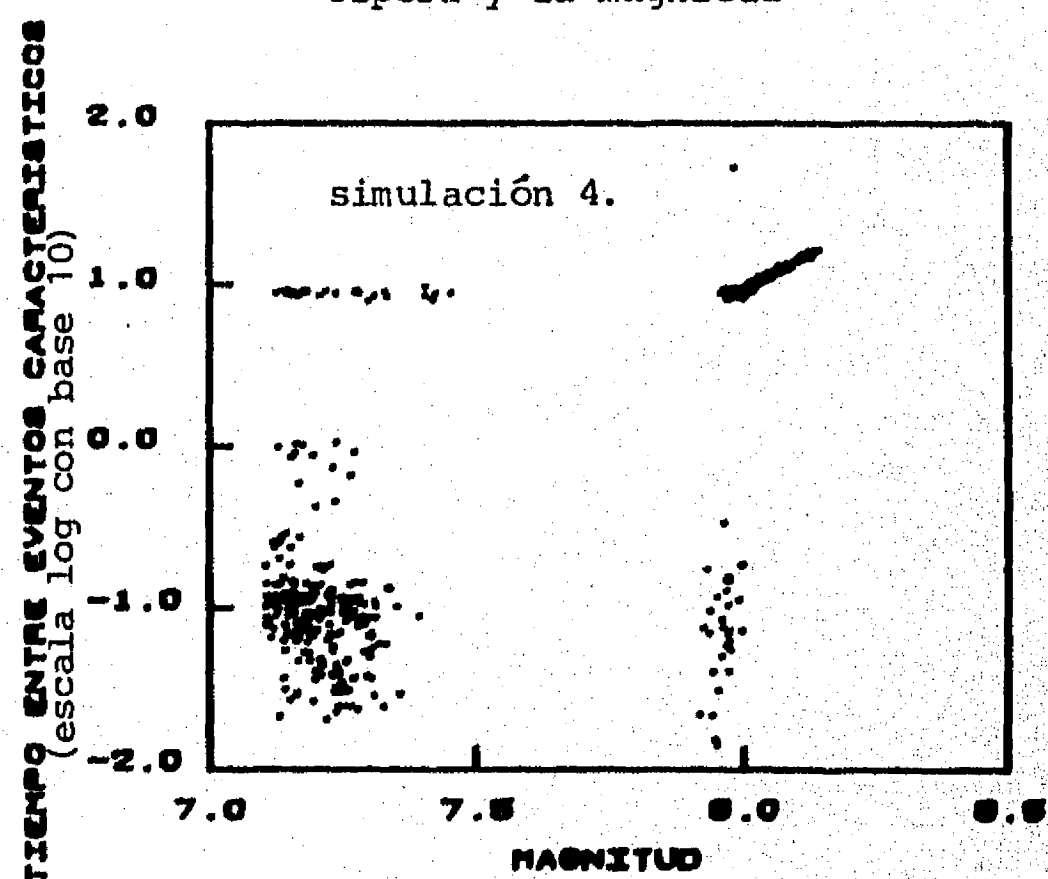


Fig 4.6d Correlación entre el tiempo de espera y la magnitud

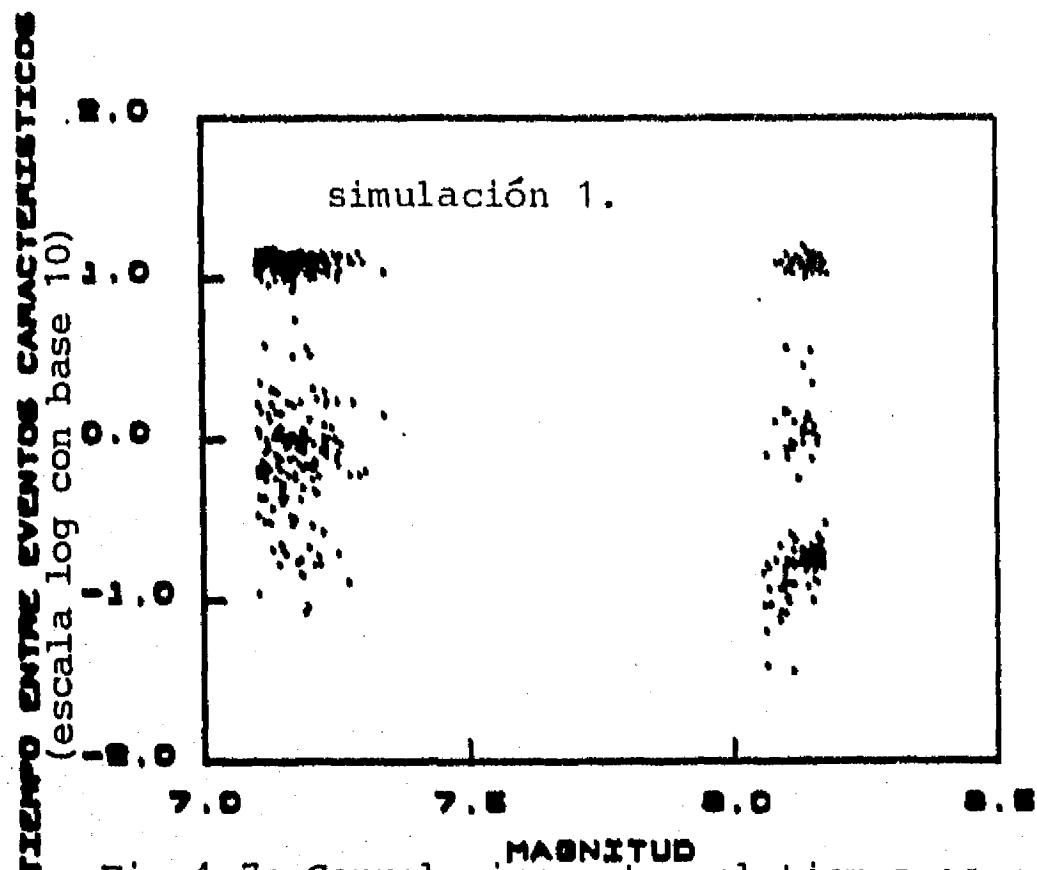


Fig 4.7a Correlación entre el tiempo esperado al próximo evento característico y la magnitud

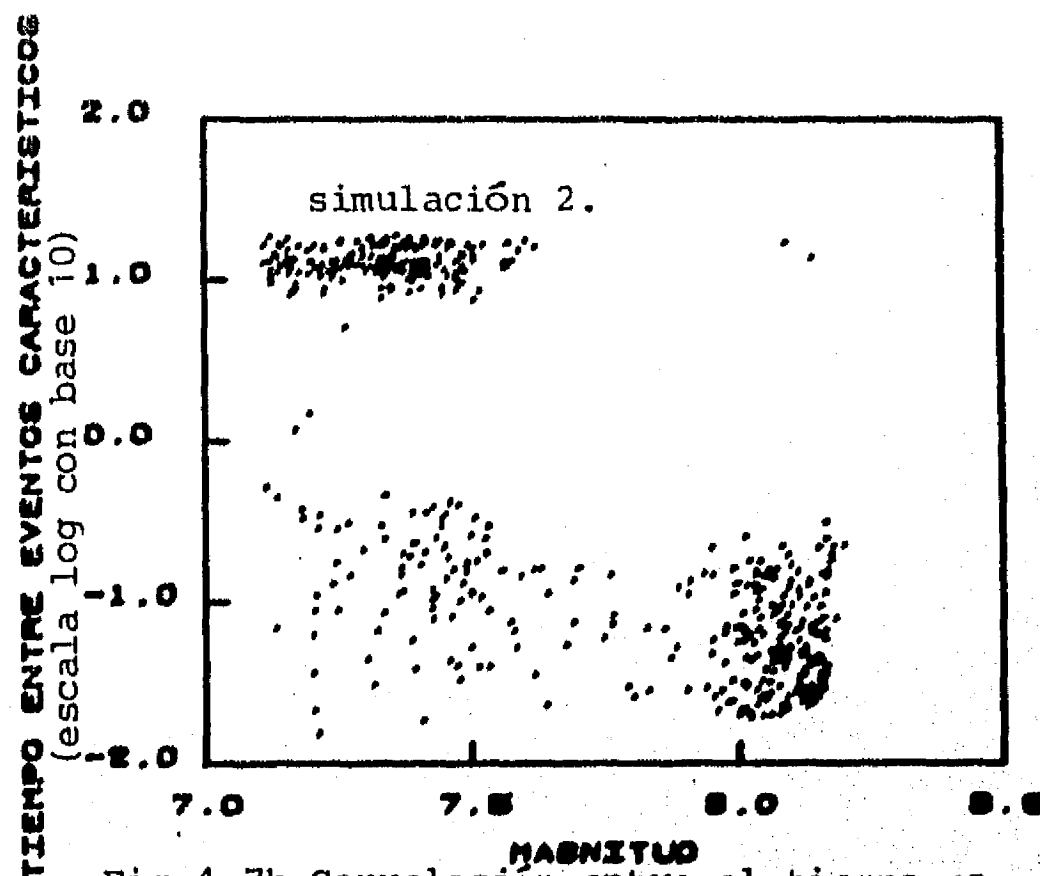


Fig 4.7b Correlación entre el tiempo esperado al próximo evento característico y la magnitud

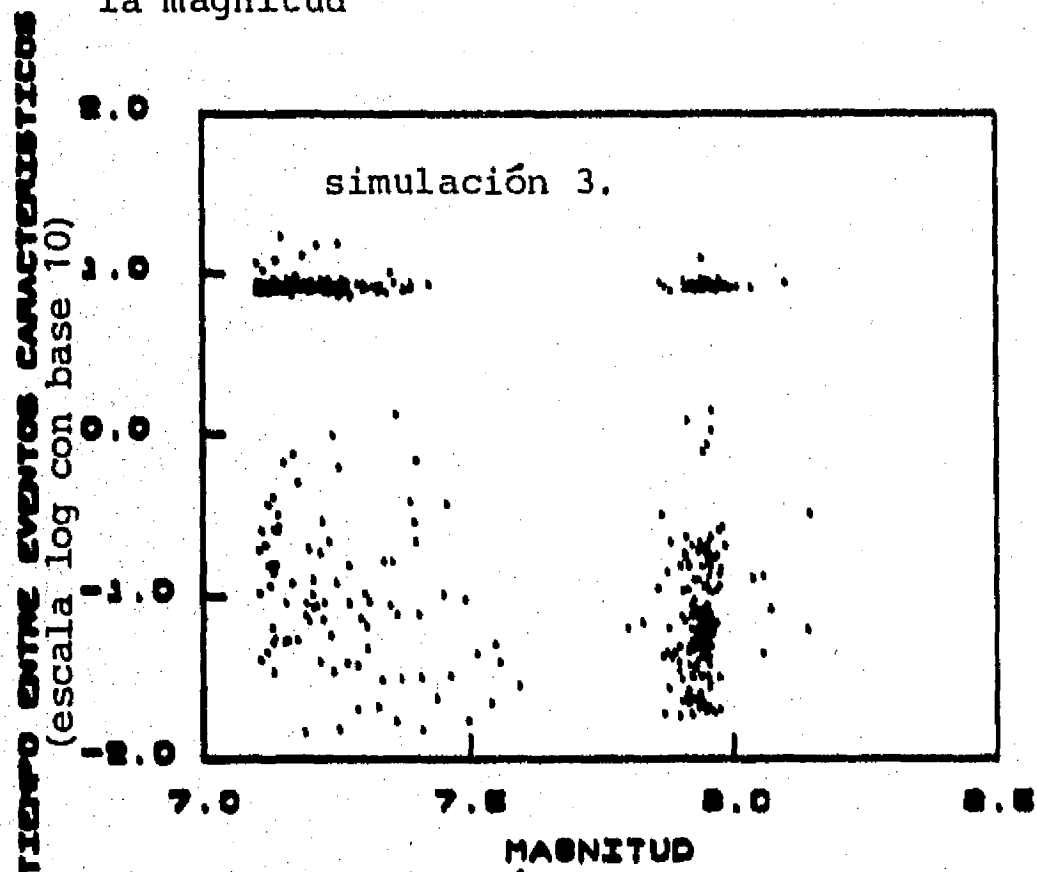


Fig 4.7c Correlación entre el tiempo esperado al próximo evento característico y la magnitud

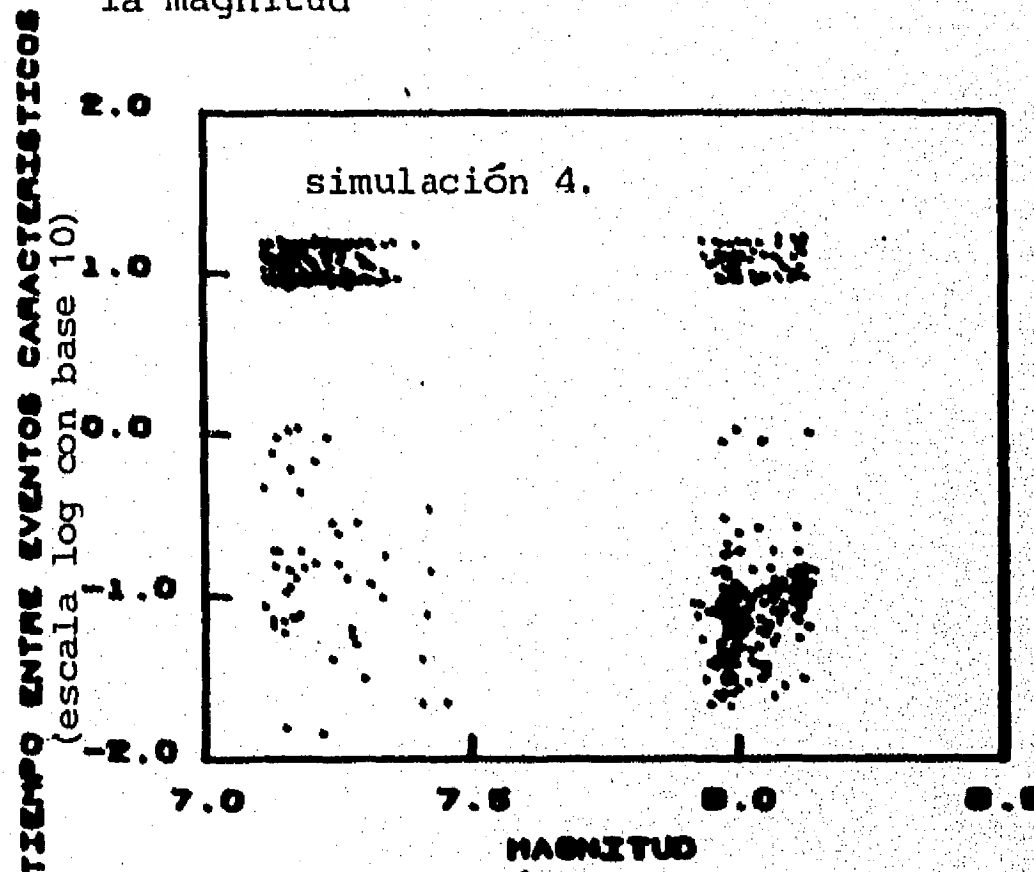


Fig 4.7d Correlación entre el tiempo esperado al próximo evento característico y la magnitud

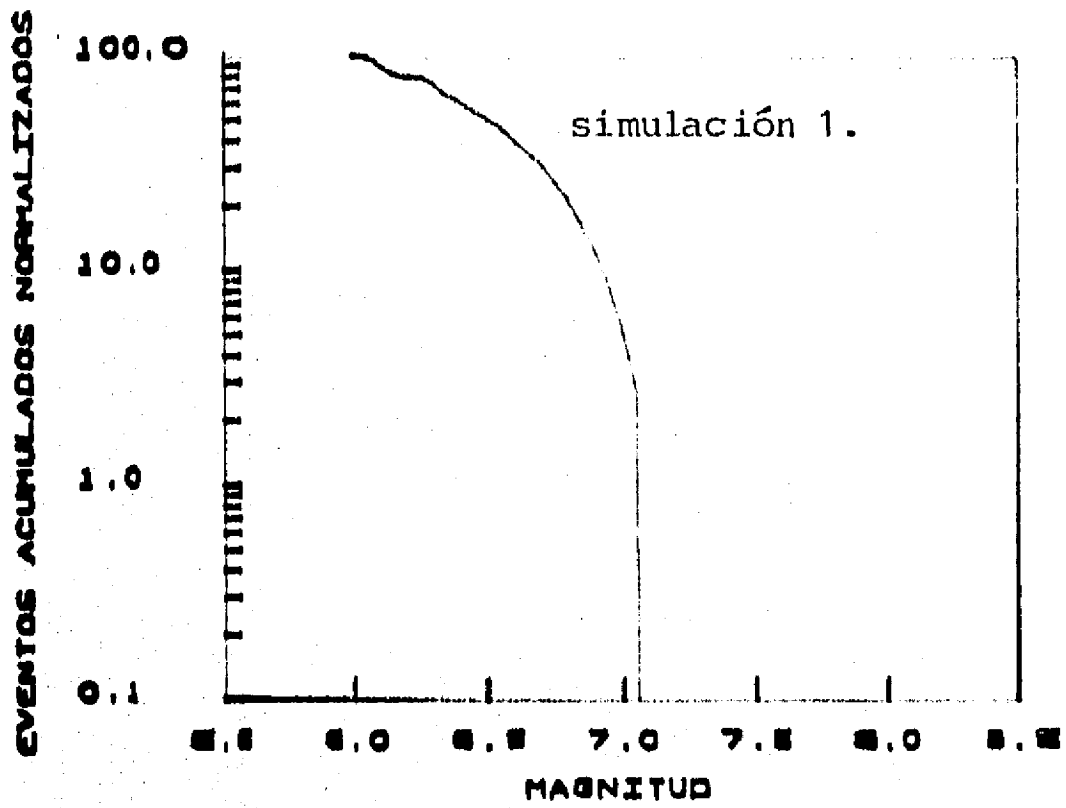


Fig 4.8a Número de temblores vs la magnitud (eventos ocurridos en el intervalo del tiempo normalizado de 0.2 a 0.8)

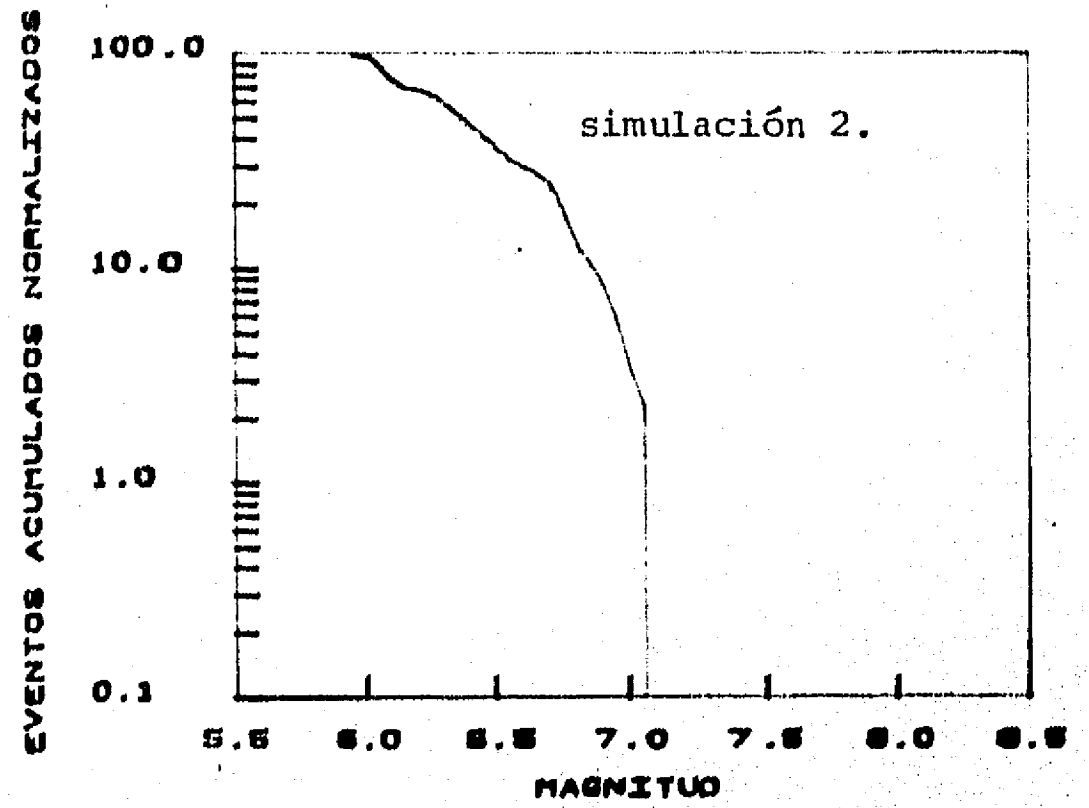


Fig 4.8b Número de temblores vs la magnitud (eventos ocurridos en el intervalo del tiempo normalizado de 0.2 a 0.8)

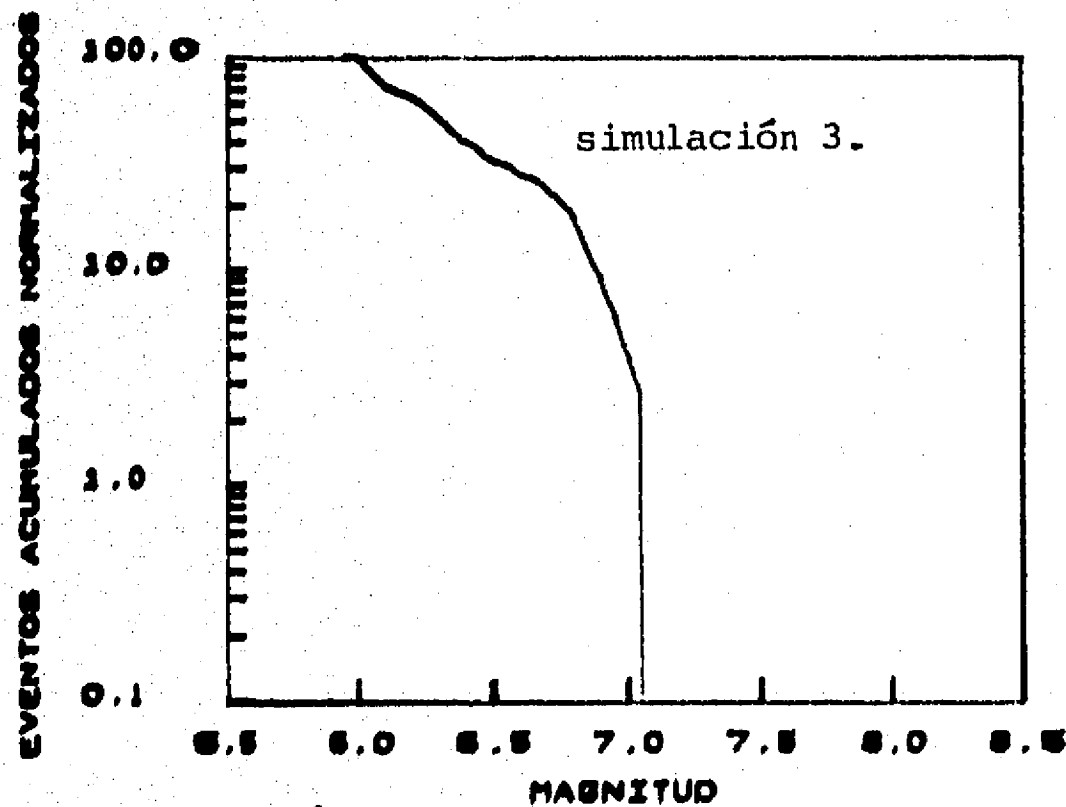


Fig 4.8c Número de temblores vs la magnitud (eventos ocurridos en el intervalo del tiempo normalizado de 0.2 a 0.8)

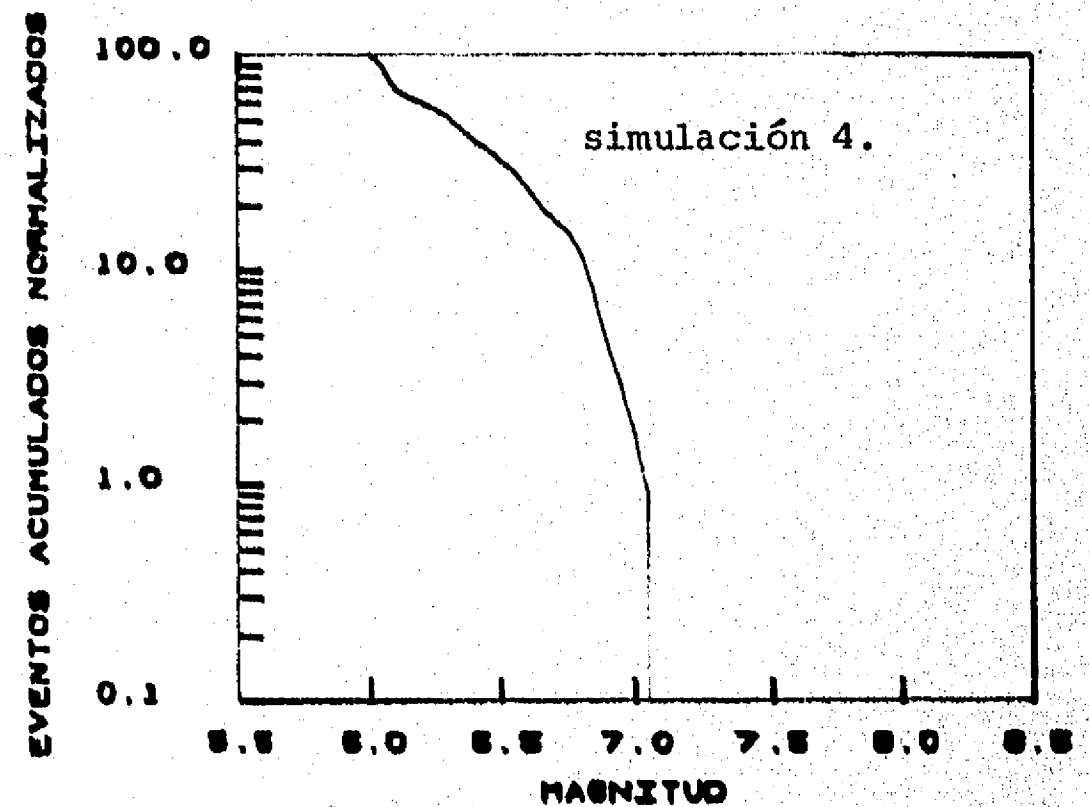


Fig 4.8d Número de temblores vs la magnitud (eventos ocurridos en el intervalo del tiempo normalizado de 0.2 a 0.8)