

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA EN HONDURAS

Gonzalo Cruz Calderón
José Jorge Escobar
Carlos Tenorio
Conrad Lindholm
Sección de Geofísica
Departamento de Física -UNAH
Norewean Sismic Array (NORSAR)

1. INTRODUCCIÓN

La amenaza sísmica o sea la vibración esperada del suelo ante los sismos, se expresa como gráficas de la aceleración máxima del suelo o aceleración pico del suelo (PGA) en función de la probabilidad anual de que esta sea excedida en un sitio determinado. La amenaza como parámetro probabilístico generalmente se presenta mediante mapas de isoaceleración para diferentes períodos de retorno y mediante espectros de pseudovelocity del suelo (PGV) que muestra su comportamiento en función de la frecuencias sísmicas. Estos resultados son de utilidad y de aplicación inmediata en el diseño estructural, debido a que permiten estimar las fuerzas más probables a que se verán sometidas las estructuras en caso de un evento sísmico en el futuro.

La amenaza sísmica para Honduras, en general, ha sido evaluada en los trabajos de Kiremidjian et. al. (1979), Rojas et. al.(1993c), Escobar, J.,(1996) y Cáceres, y Kulhaneck, (1999). En el presente trabajo se evalúa específicamente la amenaza para 11 lugares y ciudades importantes de Honduras (Fig. 1) y sus respectivos espectros. Los resultados del presente estudio muestran que Honduras está propensa a los

movimientos fuertes del suelo, los que se expresan como valores significativos de la Aceleración Pico del suelo en función de la probabilidad de excedencia anual. Estos valores de PGA en algunos sitios de Honduras son comparables con valores de regiones de intensa actividad sísmica, como la zona de contacto y de deformación entre la placa Caribe y Norteamérica que corre cercana a la parte noroccidental de Honduras y con el contacto de las placas Cocos-Caribe cercano al Golfo de Fonseca en el Sur del país.

2. Metodología y Aspectos Técnicos

2.1 Elementos Teóricos

Las bases probabilísticas en la ingeniería sobre el enfoque moderno en el análisis de la amenaza sísmica fueron establecidas por Cornell (1968), quien reconoció la necesidad de realizar estudios de diseño sísmico que consideraran las incertidumbres intrínsecas asociadas con la fenomenología de los sismos.

De esta forma, las prácticas actuales utilizan una variada información de diferentes fuentes sismológicas y geológicas incorporando las



FIG. 1
Lugares de Honduras donde se calculó la amenaza sísmica. La selección de estos sitios se hizo en base a concentración de población, infraestructura y las condiciones tectónicas.

incertidumbres asociadas correspondientes (Reiter 1990, Coopersmith 1991, Aki y Irikura 1991, Mc Guire 1993).

La metodología utilizada está basada en un análisis probabilístico (Mc Guire, 1976). En este procedimiento, la función de probabilidad que modela la ocurrencia del movimiento del suelo en un sitio prefijado que excede un nivel especificado, es la de Poisson. Además, se incorpora un análisis de incertidumbre de los parámetros en términos probabilísticos, a través de un modelo Bayesiano de riesgo sísmico.

El modelo de ocurrencia del movimiento del suelo en un sitio determinado, en exceso de un nivel específico se asume como un proceso Poissoniano. Bajo este criterio, la probabilidad de que un evento produzca movimientos del suelo en un sitio particular, en exceso de un nivel predeterminado, es independiente de la ocurrencia de otros eventos. La probabilidad de que el nivel de movimiento del suelo "z" sea excedido en un sitio por unidad de tiempo se

expresa como

$$P(Z > z) = 1 - e^{-v(z)}$$

donde $n(z)$ es el promedio de eventos por unidad de tiempo en el cual Z excede a z. El modelo de recurrencia de sismos asume que la razón de recurrencia de los sismos está dada por la relación acumulativa de Gutenberg – Richter:

$$\text{Log } N(M) = a - b M$$

donde $N(M)$ es el número de eventos por año con magnitud mayor o igual a M , el parámetro "a" se relaciona con la razón de actividad, y "b" describe la relación entre el número de eventos pequeños y grandes. Con respecto a la atenuación de movimientos fuertes, el análisis de la amenaza sísmica requiere de la disponibilidad de relaciones de la aceleración máxima del suelo (PGA) para un rango adecuado de distancias y magnitudes.

Es oportuno señalar que las incertidumbres asociadas a la atenuación están entre las que mayor contribuyen a los resultados finales.

En el caso de Honduras hemos utilizado la relación de atenuación de Ambraseys et. Al (1996); debido a que la edad geológica de las estructuras que originan estas relaciones tiene similitud con la corteza del norte de Centroamérica y especialmente con Honduras.

2.2 Formalismo del Árbol - Lógico

Kulkarni et. al. (1984) ha construido el formalismo del árbol lógico en el cual los parámetros

resultantes provienen de las ramas de un árbol computacional, cada rama con su correspondiente peso asignado, y cuya contribución al riesgo total se evalúa por separado y se combina estadísticamente (Dahle, 1994). Un diagrama de flujo donde se indican las fases metodológicas del proceso computacional de la amenaza sísmica se muestra en la figura 2 y el formalismo del árbol lógico se muestra en la figura 3.

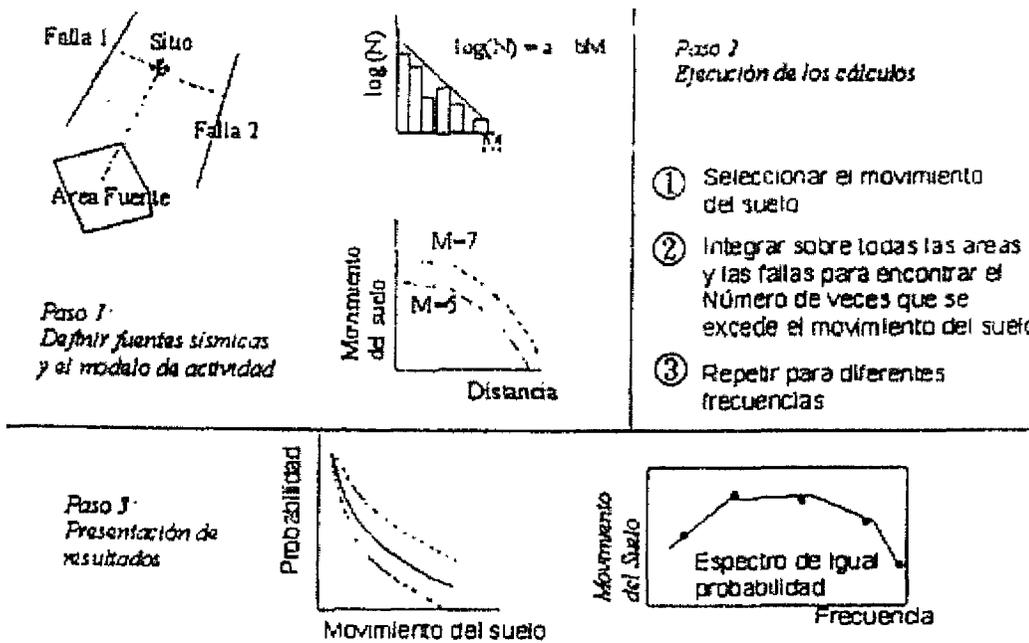
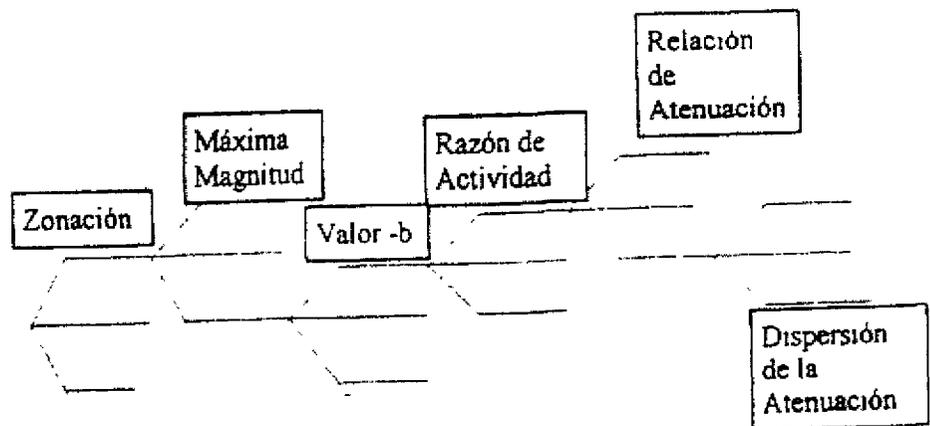


FIG. 2 Esquema que muestra el procedimiento computacional utilizado para estimar la amenaza sísmica.

Fig. 3 Principio del formalismo del árbol - lógico usado en el análisis probabilístico de la amenaza sísmica. Se presentan las ramas del árbol lógico para las fuentes sísmicas.



Para cada nodo terminal de las ramas del árbol lógico que conecta la fuente n , y con parámetros modelo $S_n(m)$, el programa NPRISK calcula la función probabilística ponderada $P(S_n(m))$, (Dhale, 1994). Estas funciones ponderadas se utilizan para calcular la distribución de probabilidad de las variables aleatorias $n_n(z)$, también calcula el número promedio de eventos por unidad de tiempo en el cual el nivel z del movimiento del suelo es excedido y por lo tanto la suma:

$$n(z) = \sum_n n_n(z)$$

2.3. Modelo Sismotectónico y Caracterización de Fuentes Sísmicas

Se identifican tectónicamente distintas regiones para Honduras y áreas adyacentes entre los meridianos 83° y 91° grados de longitud Oeste y 11° y 18° latitud Norte y se asignan parámetros de sismicidad a las zonas en las cuales la sismicidad se supone que es relativamente uniforme.

El procedimiento para identificar el potencial sísmico de las fuentes requiere de una evaluación de la situación tectónica y geológica disponible lo mismo que la sismicidad histórica y la sismicidad instrumental reciente.

Las áreas fuentes han sido modeladas bajo una combinación de información geológica y la estadística de ocurrencia de terremotos (catálogos históricos y contemporáneos). Las magnitudes máximas de los terremotos han sido estimadas en base a consideraciones sismo tectónicas (máximo terremoto conocido de record históricos e instrumentales). Los parámetros de recurrencia "a" y "b" han sido estimados mediante regresiones con la data observada y las profundidades se basa en criterios geológicos y sismológicos.

2.4 Modelo de la Amenaza Sísmica

El cálculo de amenaza está basado en la contribución probabilística integrada al movimiento del suelo debido a las fuentes sísmicas, modificadas por el factor de atenuación sísmica. El procedimiento del árbol lógico se usa para establecer los intervalos de confianza de los resultados a través del modelaje de los parámetros de entrada con diferentes probabilidades. La relación entre un rango de niveles de movimientos de suelo y las probabilidades asociadas de excedencia es establecida, y la medida de la incertidumbre en el resultado final se encuentra en términos de los límites de confianza.

3. Revisión De Datos Y Análisis

3.1 Marco Tectónico y Geológico de Centroamérica y de Honduras

La región de Centroamérica, comprende un ambiente tectónico de gran complejidad, caracterizado por la colisión de cuatro placas tectónicas: las placas de Norteamérica, caribe, cocos y nazca (Dengo, 1968; Molnar y Sykes, 1969). estas placas están limitadas por una variedad de elementos estructurales, que difieren en carácter entre sí (fig. 4).

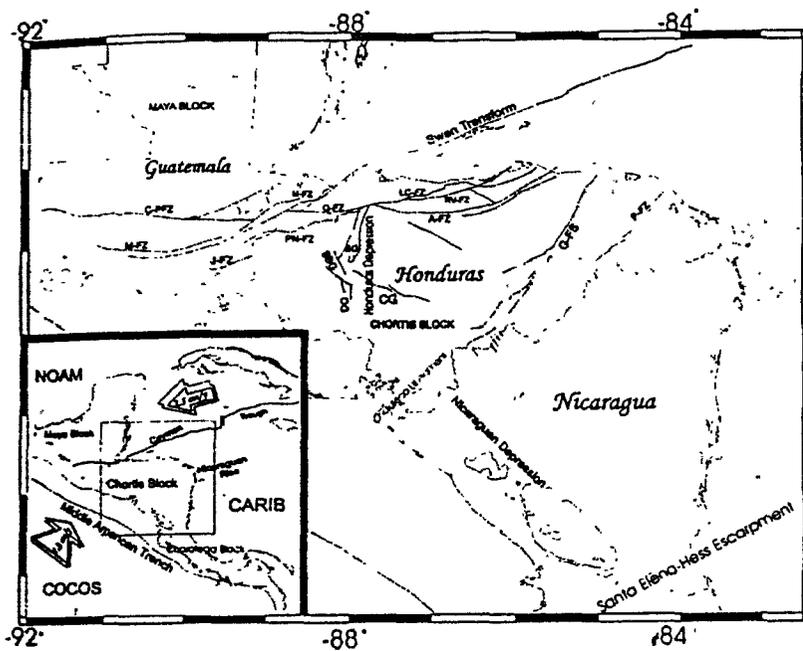


FIG. 4
Ubicación tectónica
de Honduras.
PFZ, Polochis, MFZ, Motagua
JFZ, Jocotán; CFZ,
Quimistán LS, La Ceiba;
RV, Río Viejo; GFZ, Guayape;
AFZ, Aguán; PN, Pueblo
Nuevo; SBG, Graven de
Santa Bárbara; SG, Grave
de Sula CG, Graven
de Comayagua.
(Adaptación Cáceres, 1999).

La zona de subducción en el Pacífico, o Fosa Mesoamericana, marca el límite entre la placa de Cocos y la placa del Caribe, con su correspondiente cadena de volcanes cuaternarios que cruza a Honduras en el Golfo de Fonseca; la zona de fractura de Panamá constituye el límite entre las placas de Nazca y Cocos, y la zona de fallamiento de Motagua y Polochic delimita la frontera entre la placa de Norteamérica y la placa del Caribe.

La cuenca del Caimán constituye la frontera entre las placas de Norteamérica y del Caribe en la zona del mar Caribe al norte y noreste de Honduras. El evento histórico más importante en esta falla es el gran terremoto de 1856 con una magnitud M_l estimada entre 7 y 8 (Osiecki, 1981). **El sistema de fallas Motagua-Polochic** conforman la continuación en tierra firme de (1994). la frontera de placas definida por la fractura del Cisne, el límite meridional de la cuenca del Caimán en el Caribe. El movimiento del suelo durante el terremoto de Guatemala de 1976 confirmó que el desplazamiento a lo largo de la frontera entre placas ocurre a lo largo de esta falla (Schwartz *et al.*, 1979), y que

dicho desplazamiento es lateral izquierdo (Plafker, 1976). Desalineamientos medidos en depósitos de terraza permiten estimar la tasa de desplazamiento de la falla de Motagua entre 1.5 a 6 mm por año durante los últimos 10 a 40 ka (Swartz *et al.*, 1979).

Depresión de Honduras consiste en una serie de *horsts* y *grabens* orientados aproximadamente de norte a sur desde las Montañas Mayas de Belice hasta hasta el golfo de Fonseca, que se conoce en conjunto como "Depresión de Honduras" (Mills *et al.*, 1969) a pesar de que no existe una continuidad entre ellos, sino que más bien se trata de una zona de cuencas extensionales, bordeados por fallas normales con rumbo norte (Muehlberg, 1976).

Falla de Guayape

Aproximadamente a 300 km. al oeste de la falla del Motagua y paralela a ésta en su rumbo NE-SO se extiende la segunda línea tectónica más sobresaliente del bloque Chortís, la falla de Guayape. Esta falla es la estructura continua más larga dentro del territorio de

Honduras, su gran longitud y rectilinealidad indican que es una falla transcurrente. Finch y Ritchie (1991) la definen como "una compleja banda de fallas, desde 2 a 25 km. de anchura, la cual exhibe un rumbo N30° – E35° por 290 km. desde la frontera de Honduras y Nicaragua cerca de El Paraíso hasta la costa caribeña cerca de la boca del río Sico".

Zona de Subducción del Pacífico

La frontera entre las placas de Cocos y la placa del Caribe la constituye una zona de subducción donde la corteza oceánica de la placa de Cocos se hunde debajo de la placa del Caribe. Como efecto de la subducción, se ha formado un *rift* paralelo a la fosa, y asimismo una cadena volcánica cuaternaria que corre desde la frontera de Guatemala con México hasta la parte central de Costa Rica. La cadena cruza a Honduras en el Golfo de Fonseca, donde se observan al menos seis conos volcánicos (Mills *et al.*, 1969).

La tasa de convergencia en la región del Golfo de Fonseca es de 8 cm por año y la zona de Wadatti-Benioff, bien definida por la sismicidad, se prolonga hasta una profundidad de 200 km. (Burbach *et al.*, 1984). Esta convergencia es rápida y se manifiesta en una

intensa sismicidad, la cual es mucho mayor que la de cualquier otra estructura de la región.

3.2 Sismicidad

3.2.1 Sismos históricos (Pre-1990) sentidos en Honduras

La información sísmica pre-instrumental para Honduras, cubre aproximadamente el período 1500 – 1900 para eventos que han sido sentidos dentro del territorio y que han causado daños considerables en varias poblaciones de Honduras, aunque la mayor parte de los sismos reportados se han originado en provincias tectónicas localizadas fuera del país (Kiremidjian *et.al.*, 1979; Sutch, 1981; Rojas *et.al.*, 1993a). En la caracterización de la sismicidad histórica de Honduras, en la literatura se describen alrededor de 35 sismos los cuales oscilan entre rango de intensidades Mercalli desde grado IV hasta grados X – XI y rangos de magnitudes Richter homogenizadas desde grado 3 ½ hasta grados 7 a 8.5.

La distribución de los sismos según sus provincias tectónicas se muestran en el cuadro 1. Asimismo, se encuentra que alrededor de 13 sismos han tenido magnitudes Richter mayores o igual a 6 ½ grados.

Distribución De Sismicidad Histórica Por Fuente

Cuadro 1. Sismicidad Histórica para Honduras

FUENTE	Nº EVENTOS	%
Sistema Motagua - Polachic	14	40 %
Depresión de Honduras	9	25 %
Subducción del Pacífico	9	26 %
Zona Volcánica	2	7 %
Intraplaca	1	2 %

Durante el período en referencia, el mayor terremoto generado en el sistema Motagua Polochic fue el del 4 de agosto de 1856 con intensidad Mercalli de X grados y magnitud Richter estimada entre 7 y 8 grados. Este sismo originó un tsunami que es el más significativo en la Costa Atlántica de Honduras (Sutch, 1981; Cruz y Wyss, 1983; Molina, 1997). En la zona de subducción del pacífico el mayor sismo generado fue el del 8 de diciembre de 1859 con una intensidad Mercalli modificada de XI grados y que alcanzó intensidades de grado VI en Honduras; la magnitud Richter estimada para este sismo fue de 8 grados. Otro terremoto que se generó en la zona de subducción y que fue sentido hasta el Atlántico de Honduras, fue el del 16 de abril de 1854 con Intensidad entre IX y X grados y magnitud entre 7 y 8 grados.

En la Depresión de Honduras los sismos más importantes durante este período fueron los del 14 de octubre de 1774, 20 de julio de 1809 y el 14 de noviembre de 1851 con intensidades Mercalli entre VI y VIII grados y magnitudes Richter entre 5 y 6 ½ grados, afectando considerablemente a las Ciudades de Comayagua, Tegucigalpa y poblaciones cercanas a estas Ciudades.

Principales sismos superficiales que han afectado a Honduras durante el período 1900-1999

La sismicidad tanto regional como local ha sido caracterizada entre otros autores por Dean y Drake, (1978); Molnar y Sykes (1969); White y Harlov, 1993; White, (1991); Rojas et.al.; (1993b); Gordon y Muehlberger, 1994 y Cruz, (1999). Particularmente importantes son los sismos del 29 de diciembre de 1915 ($M_s = 6.3$) y del 03 de diciembre de 1934 ($M_s = 6.2$) que ocurrieron en el occidente de Honduras (White y Harlov, 1993). En el sistema de fallas Motagua – Polochic se ha generado una canti-

dad importante de sismos superficiales, que han afectado considerablemente la zona norte (San Pedro Sula, Puerto Cortés, La Ceiba y las Islas de la Bahía) como los del 12 de septiembre de 1957 ($M = 6.0$) y del 23 de marzo de 1966 ($M = 6.0$) (Molnar y Subes (1969); los del 8 de noviembre de 1967 ($M = 5.4$) y del 25 de febrero de 1969 ($M = 5.4$) Dean y Drake, (1978).

Asimismo, el gran terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976 ($M_s = 7.5$) afectó considerablemente el norte y occidente de Honduras.

Otros sismos originados en el norte del país son los del 4 de julio, 1976 ($M = 4.5$); el del 9 de agosto de 1980 ($M_w = 6.5$) y el del 2 de septiembre de 1980 ($M_w = 5.3$).

En la zona central, cerca de Comayagua se reportó un sismo el 27 de abril de 1982 ($M_w = 5.4$) y en la zona de subducción del pacífico el sismo del 12 de enero de 1982 ($M_w = 5.4$). En el occidente del país, el 29 de septiembre de 1982 se reportaron 2 sismos ($M_w = 4.9$ y $M_w = 5.6$ respectivamente). Varios sismos en los rangos de magnitudes entre 4 y 5 grados han sido reportados a partir de los años 1960 en la región norte, occidental y central del país.

A partir de 1999 se ha detectado una importante actividad asociadas al interior y las fronteras tectónicas de Honduras (alrededor de 800 sismos), actividad que ha superado en forma significativa la sismicidad promedio en Honduras durante los últimos 40 a 50 años (Cruz, 1999). Alrededor de 40 sismos han sido sentidos y varios de ellos han causado daños y pánico a la población. Las magnitudes Richter han variado de valores muy pequeños hasta los 6.4 grados con profundidades entre 10 y 20 km. Particularmente importantes

fueron los sismos del 2 y 3 de abril de 1999 ($M = 6.3$ y 6.4 respectivamente) que ocurrieron en la Golfo de Fonseca y el evento del 11 de julio de 1999 ($M = 6.4$) originado en el sistema Motagua-Polochic (a inmediaciones de Puerto Barrios), y que fue sentido en la mayor parte de Honduras.

3.3 Descripción de Catálogos de Sismicidad y Profundidades Focales

El catálogo usado en este estudio consiste de 16,791 eventos, localizados entre 11° y 18° N y 83° y 91° Oeste y está basado en el catálogo de Rojas etc. al. (1993^a) y catálogos del PDE (USGS, 1999) para la región cen-

troamericana. El mapa de sismicidad utilizado en este estudio se muestra en la figura 5. En relación a las profundidades sísmicas, es bien conocido que la sismicidad en Centroamérica se puede clasificar separando los sismos corticales y sismos profundos en dos categorías. La razón principal para esta clasificación se debe a que la colisión entre la corteza oceánica y continental genera esfuerzos tanto en la corteza continental como en la placa que se introduce mediante el proceso de subducción. Usando este criterio, hemos dividido la sismicidad en dos poblaciones en cuanto a sus profundidades focales en mayores y menores que 40 km.

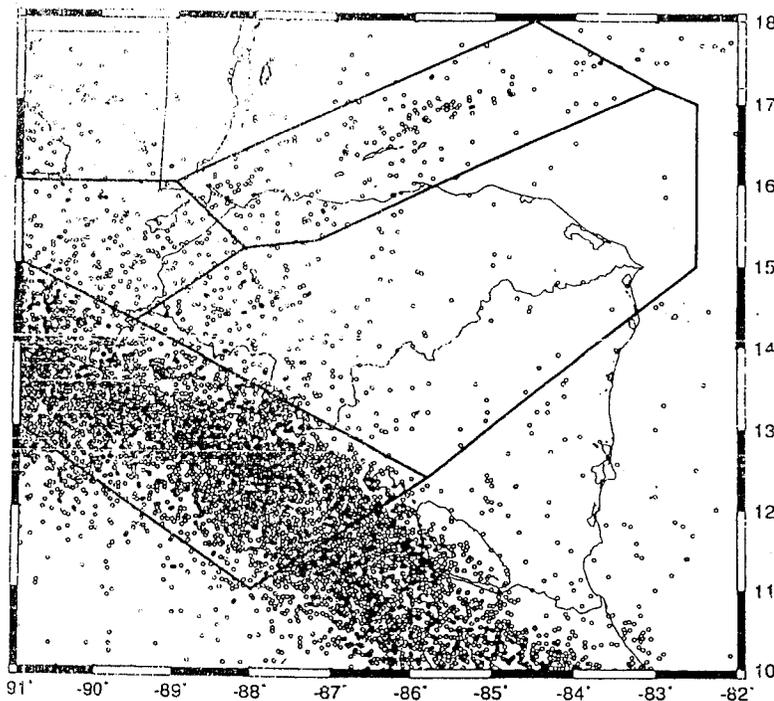


FIG. 5
Mapa de Sismicidad (1505-1999) utilizado para evaluar la amenaza sísmica de Honduras. Las cuatro áreas tectónicas indicadas corresponden al modelo de zonación gruesa del estudio en referencia.

3.4 Estandarización y homogenización de magnitudes

La estandarización consiste en utilizar una única escala da magnitud. Un problema básico con muchas escalas de magnitud es que se saturan

debido a muchos factores. Debido a esto se introdujo la magnitud momento M_w (Hanks y Kanamori, 1979) como una escala lineal con la liberación de energía en todos los rangos de dimensión de los sismos. La magnitud de momento se define como:

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