

UNA CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE RIESGOS SISMICOS EN EL ECUADOR

José Palacio Gonzáles *

Efrén Blum Gutierrez *

Colaboradores científicos: Raúl Maruri Díaz **
Hector Ayon
Jacinto Rodríguez

RESUMEN

Se presenta un método probabilístico para obtener la aceleración máxima esperada en cualquier sitio del país, con un determinado nivel de probabilidad de excedencia. Para esto se discute la identificación de áreas fuentes en la zona. Se estudia un sitio en particular y se recomienda un espectro de diseño.

Guayaquil, agosto 1984.

* Investigador del IIEA

** Profesor del IIEA

1/PROC-51/2000/72-401/1000/5000/3000/

AGRADECIMIENTO

El Autor deja expresa constancia de su agradecimiento a la Universidad de Guayaquil, y en particular al Instituto de Investigaciones y Estudios Avanzados de la Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, a sus directivos y demás personal, por el apoyo incondicional a la presente investigación.

Asi mismo, desea expresar su agradecimiento a las siguientes personas:

Al Sr. José Egred y demás compañeros del Observatorio Astronómico del Ecuador, por haber facilitado desinteresadamente toda la información a su alcance, incluyendo material inédito.

Al Sr. Miguel Fabre Moreno, por su participación en la interpretación, elaboración de los gráficos, diagramación general y concepción artística con que ha sido tratado el presente artículo.

A la Sra. Janeth Vera de Intriago, Secretaria del IIEA, por su participación en el trabajo de mecanografiado y revisión del presente reportaje.

1.- GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCION

La República del Ecuador se encuentra localizada en el Cinturón de Fuego del Pacífico, la zona que registra la mayor parte de la actividad sísmica del globo terrestre y en la cual están localizados numerosos volcanes, algunos de ellos aún activos. Como consecuencia en nuestro país se han presentado sismos de gran magnitud que ocasionaron numerosas víctimas y cuantiosos daños materiales. Por lo tanto es imprescindible establecer los niveles de riesgo sísmico a que una determinada localidad estará sometida con el fin de reducir los daños:

El riesgo potencial en una localidad depende de la sismicidad regional, de la forma como se atenúa el movimiento con la distancia y de las características del suelo local. Desde el punto de vista de ingeniería sísmo — resistente, la determinación del nivel de riesgo debe ser expresada por parámetros de diseño esperados de suceder con un nivel de probabilidad de excedencia.

Lo ideal consistiría en conocer la aceleración máxima o velocidad máxima de las partículas, la densidad espectral y su frecuencia probable, así como la posibilidad de que la localidad en estudio esté expuesta a pulsos largos. Esto implicaría disponer de espectros de diseño (o acelerogramas) debidos a terremotos correspondientes a áreas fuentes de los alrededores y definir su probabilidad. Sin embargo estamos muy lejos de esta meta y solamente el conocer las cantidades que representan las sacudidas fuertes del terreno ya constituirían un gran avance (Referencia 26, pág. 12).

El objetivo del presente trabajo es establecer el nivel de aceleración esperada en roca de ser excedida con un específico nivel de probabilidad en un período de tiempo dado. Este trabajo es parte del esfuerzo del IIEA (U. Guayaquil) por establecer un mapa de isoaceleraciones y de ser posible de isovelocida-

des para todo el país y en términos optimistas proponer una regionalización sísmica del país.

Un objetivo adicional del artículo es discutir la posibilidad de la construcción de un espectro de diseño para un sitio específico de estudio, que tome en cuenta el efecto del suelo local. Como ejemplo de aplicación se escogió a ATAHUALPA, localidad de la Península de Santa Elena, como el sitio de estudio.

1.2.- SISMO – TECTONICA DEL ECUADOR.

El territorio ecuatoriano geográficamente presenta tres regiones bien definidas:

- a) La Costa o Región Occidental
- b) La Sierra, Región Central o Interandina
- c) El Oriente o Región Oriental

En todas estas regiones ha tenido lugar actividad sísmica y se encuentran recorridas por numerosas fallas y esta división geográfica en términos generales se relacionan con la tectónica del país, pero la tectónica es mucho más compleja que esta división geográfica. Casualmente la Sismicidad del Ecuador se explica dentro del contexto del modelo mundial deducido de la moderna tectónica de placas, que considera a la litósfera dividida en segmentos o placas en continua interacción, de lo cual resulta que en algunos lugares las placas se deslicen de manera trascurrente mientras que en otros se enfrenten o se separen.

Del enfrentamiento de una placa oceánica con una placa continental se produce el fenómeno de subducción, por el cual la placa oceánica, más rígida y fuerte, se introduce por debajo de la placa continental y sigue hundiéndose hacia el manto, en donde se consume al alcanzar grandes profundidades. Todo este proceso origina acciones mecánicas, fricción, magnetismo, trayendo como consecuencia sismicidad y volcanismo. También como consecuencia se produce una fosa frente a la costa, la misma que puede alcanzar grandes profundidades.

La zona en la cual se localizan los focos sísmicos producidos en la placa oceánica que subducciona se llama Zona de Benioff, y el buzamiento de esta zona es variable en las diferentes regiones del globo terrestre en que se produce subducción.

En el Ecuador tiene lugar este fenómeno de subdicción, al enfrentarse la placa Americana con la placa Pacífica, concretamente la concurrencia de las placas Nazca, Sudamericana y Cocos frente a las costa ecuatoriana, en donde ha sido identificada la trinchera y el hundimiento de la placa Nazca bajo la placa continental (Referencias 12,15,21 y 24), donde específicamente podemos encontrar las siguientes características principales:

- Un arco volcánico activo cercano a la zona de subdicción. por el Este;
- Una trinchera o fosa mar afuera, paralela al arco volcánico, al oeste del arco;
- Una prisma de acreción, que se manifiesta en el margen continental con una cordillera costera. Una cuenca de ante — arco separa la cordillera costera del arco volcánico;
- Una zona de Benioff que, desde la trinchera, se introduce con bajo ángulo por debajo del arco volcánico. Esta zona es sísmicamente muy activa, con hipocentros someros cerca de la trinchera y generalmente de profundidad mediana a grande bajo el arco volcánico.

La zona de subducción se caracteriza principalmente por la diferencia de buzamientos al Norte y al Sur de aproximadamente el paralelo 2°. S. Hacia el norte, la zona de Bonioff tiene un buzamiento del orden 28°. al NE; hacia el sur, la misma zona buza apenas unos 10 directamente al E.

A partir del mismo paralelo 2°. S la trinchera cambia de dirección de N — S a NNE — SSW, y esta línea es también el límite meridional de la zona de volcanes activos de los Andes colombianos y ecuatorianos. En el mismo paralelo 2°. S se inicia la deflexión de la Cordillera de los Andes, desde una dirección

general N— S, al Norte, a la dirección NNE — SSW, al Sur.

Todas estas características de la subducción podrían ser consecuencia de la presencia de la Dorsal Carnegie. Los reales efectos de su presencia son discutidas en varias publicaciones (Referencias 15,17).

El examen de las imágenes de radar y fotografía aéreas han permitido localizar las fracturas prominentes en la región (Referencia 25). La notable coincidencia de altas concentraciones de fracturas con flujo tectónico (Referencia 20) elevados insinua la presencia de fallas activas en estos sectores.

La Referencia 25 presenta un mapa donde se localizan algunas fracturas con rasgos geomorfológicos característicos: alineaciones rectilíneas, desplazamientos verticales y horizontales importantes en formaciones relativamente jóvenes (Pleistoceno, Holoceno).

La verdadera actividad de las fallas se determinará únicamente con estudios muy detallados de campo y con análisis instrumentales muy minuciosos.

2. METODOLOGIA (*Marco Teórico*)

La existencia de sismos destructores plantea un problema de gran importancia y complejidad. Es necesario evaluar el riesgo que se corre al construir una obra en una zona sísmica, y determinar parámetros de diseño adecuados para disminuir en lo posible las consecuencias derivadas de los movimientos del terreno en una localidad.

Los conocimientos actuales no permiten determinar ni siquiera con un margen razonable cuando ni en que punto ni con que fuerza se producirán los sismos futuros, por lo cual el riesgo sísmico tiene necesariamente que ser tratado en forma probabilística.

De una manera general, la evaluación del riesgo sísmico sig-

nifica determinar la frecuencia y la potencia de los sismos que probablemente afectarán en el futuro un determinado lugar. Para eso se debe establecer tres aspectos, que están relacionados entre sí: un nivel de probabilidad, un período de tiempo y la fuerza del sismo.

Esta última se puede expresar por medio de varios parámetros: Velocidad, Aceleración en el sitio, etc.

Dado un sitio de estudio, la sismicidad de la región donde se encuentra determinará los niveles esperados de aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo en este sitio.

Esta región puede tener subregiones con distintos niveles de sismicidad; a estas subregiones las llamamos áreas fuentes.

Las áreas fuentes las consideramos como áreas isosísmicas, es decir que la generación de sismos en cualquier punto dentro de ellos siguen un mismo patrón. Este patrón define la sismicidad del área fuente (Referencias 1,2,3).

2.1. SISMICIDAD DE LAS AREAS FUENTES.

La sismicidad de una área fuente se determina estableciendo los parámetros a y b de la ecuación de recurrencia de Richter

$$\log N (M) - a - bM \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde N (M) - número de sismos anuales de magnitud mayor o igual a M.

De la ecuación (1) es fácil inferir

$$N (0) - N (M = 0) - 10^a - \text{número total de eventos en el año}$$

$$N (M) - N (0) 10^{-bM} \quad \text{Ec. (2)}$$

Esta última expresión puede ser reescrita:

$$N (M) - a \text{ EXP } (- BM) \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde $a - N(0) - 10^a$; $B - b/\log e$

Por lo tanto la sismicidad de cada área fuente puede ser caracterizada también por los parámetros alfa y beta en vez de a y b.

Los parámetros alfa y beta determinan la distribución de los valores extremos de las magnitudes, llamada distribución de Gumbel y que es otra manera de estimar la sismicidad de las áreas fuentes (Referencias 11, 14). Este enfoque tiene la ventaja de que utiliza los valores máximos de cada período de tiempo generalmente un año, siendo estos valores más confiables, pues no adolecen de las deficiencias de cobertura de los valores pequeños. Se ha encontrado que la "primera distribución de Gumbel", $G(Y) - \text{Exp}(-a \text{Exp}(-BY))$, es apropiada para expresar la sismicidad, siendo $G(Y)$ la probabilidad de que la magnitud "Y" no sea excedida en un año.

2.2. PARAMETROS DE DISEÑO EN EL SITIO.

La técnica general usada en el presente trabajo es esencialmente la misma que las presentadas por Cornell (1968), pero reemplazando las integraciones por sumatorias discretas para dar flexibilidad en la representación de las funciones de atenuación y área fuentes. (Ref. 1,2,3).

La concurrencia futura espacial en cada área fuente se asumirá uniforme a través de cada área fuente. Entonces si cada área fuente es dividida en n subáreas, el número de sismos esperados de ocurrir anualmente en esa subárea de magnitud M o mayor será: $n(M) - N(M)/n$.

Al producirse sismos con diferentes magnitudes en cada subárea de cada área fuente generarán aceleraciones (velocidad y desplazamientos) en el sitio de estudio con niveles que dependerán de la magnitud y de la distancia hipocentral. La mayoría de especialistas (Ref. 5,6,7,13,18) aceptan que la expresión que da el nivel de aceleraciones tiene la forma:

$$A = C_1 e^{C_2 M} (R - R_0)^{C_3} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde R — distancia hipocentral

C_1, C_2, C_3, R_0 — parámetros regionales para la aceleración velocidad o desplazamiento.

Una vez obtenido el número de sismos anuales para cada magnitud o mayor para cada subárea de cada área fuente y conociendo las distancias de esta subárea (aceptando que los sismos se generan en su baricentro) al sitio de estudio, se puede obtener el número de aceleraciones anuales para distintos niveles o mayores. Siguiendo este proceso para cada subárea de todas las áreas fuentes se puede obtener el número total de aceleraciones de determinado nivel o mayor $N(A > a)$ que se sucederán en el sitio de estudio en un año y por lo tanto la tasa media anual de aceleraciones y .

Por lo tanto se puede obtener también la probabilidad de que una aceleración dada A sea mayor o igual que un valor a , tal que:

$$F(A > a) = N(A > a)/y \quad \text{Ec. (5)}$$

Se puede probar que esta función de probabilidad de A , tiene la forma exponencial:

$$F(A > a) = S A^{-K} \quad \text{Ec (6)}$$

Donde S y K son parámetros que reflejan la sismicidad de las distintas áreas fuentes.

Si consideramos cada una de las aceleraciones máximas anuales en el sitio de interés debido a cada uno de los eventos y si designáramos como "evento especial" aquel en que un máximo anual excede un valor dado de la aceleración a , existirá una probabilidad constante de excedencia anual de aceleración — a — en cada evento.

Esto significará que la ocurrencia de un "evento especial" en el sitio constituye también un proceso de Poisson con razón media anual $N(A, a)$.

$$p(N - j) = N(A, a)^j e^{-N(A, a)} / j! \quad \text{Ec. (7)}$$

$$\text{Si } j = 0$$

$p(N = 0)$ — probabilidad de que la aceleración máxima anual no exceda un valor a en un año.

Hacemos:

$$G(A) = \text{Prob}(A, a) = p(N = 0)$$

Por tanto:

$$\begin{aligned} G(A) &= \text{Exp}(-N(A, a)) \\ G(A) &= \text{Exp}(-y F(A, a)) \end{aligned} \quad \text{Ec. (8)}$$

Esta distribución tiene la forma de la segunda de Gumbel, con cota inferior.

En D años la razón media será $D N(A, a)$.

La probabilidad de que la aceleración máxima en D años no exceda un valor a , será:

$$G_D(A) = \text{Exp}(-D N(A, a))$$

$$G_D(A) = \text{Exp}(-y D F(A, a))$$

Reemplazando al valor de $F(A, a)$.

$$G(A) = \text{Exp}(-y D S A^{-k}) \quad \text{Ec. (10)}$$

$$\text{Haciendo: } P = 1 - G(A) \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde P — Probabilidad de que la aceleración máxima exceda un valor dado en D. años.

Luego:

$$1 - P = \text{Exp}(-D S A^{-k})$$

$$A = (y D S / -\ln(1 - P)) / k \quad \text{Ec (12)}$$

Donde A — aceleración esperada sea excedida en D años con un nivel de probabilidades igual a P.

EL período medio de retorno de determinado nivel de aceleración será:

$$T_y = 1/N(A - a).$$

Luego: $G_D(A) = \text{Exp}(-D/TY)$

$$T_y = D / \ln G_D(A) \quad \text{Ec. (13)}$$

3.- AREAS FUENTES Y SISMICIDAD DE LAS AREAS FUENTES.

3.1. DETERMINACION DE LAS AREAS FUENTES.

Para determinar el riesgo sísmico en un punto determinado se requiere conocer las características sísmicas, geológicas y tectónicas de la región, en base a las cuales se establecen las llamadas *AREAS FUENTES*, áreas sismogénicas o unidades sísmicas, y son aquellas que se estiman generarán sismos según un mismo patrón y de acuerdo a su historia sísmica. De una manera general, estas áreas fuentes engloban grupos de fallas activas o lugares en los cuales han ocurrido sismos que se pueden atribuir a fallas cuya existencia y actividad se sospecha basándose en una razonable información geológica y/o tectónica.

Tomando en cuenta las evidencias tectónicas de la región

así como su historia sísmica, podemos diferenciar diferentes áreas que pueden ser fuentes posibles de sismos: la fosa y sus inmediaciones, la Cordillera Occidental de los Andes y el frente Oriental de los Andes.

En cuanto a la fosa y sus inmediaciones se deben diferenciar dos áreas distintas, una al norte de los 2° S y otra al sur, ya que la subducción en esas dos regiones tienen diferente buzamiento.

La figura 1 tomada de la Referencia 20, describe la distribución del flujo tectónico para el período 1900 – 1973.

El flujo tectónico es definido como la cantidad de energía disipada por unidad de área y por unidad de tiempo, tal que:

$$F = 1/AT \int J^{1/2} dA \quad dT \text{ (Referencia 22)}$$

Donde:

F – flujo tectónico, J – energía liberada – A – área, T – tiempo.

Esta distribución (figura 1) confirma la presencia de las cuatro áreas fuentes. Sus límites fueron casualmente establecidos basándose en los contornos de la figura 1.

La Figura 2 muestra las cuatro áreas fuentes definidas. En el presente trabajo las áreas fuentes son identificadas como AREA 51,52,53 y 54.

En el presente trabajo se estudia el riesgo sísmico para Atahualpa, localidad de la provincia del Guayas, ubicada a los 83° 44' W de longitud y 2°. 17' S de latitud. El AREA 54 está a más de 300 km del punto de estudio por lo que se lo descartó del análisis.

3.2. SISMICIDAD DE LAS AREAS FUENTES.

Se estableció en la Sección 1, que la sismicidad de una área fuente podía ser determinada por los parámetros alfa y beta (o a y b). Estos parámetros pueden ser evaluados ya sea directamente por las tasas medias anuales de ocurrencias de sismos o por medio de la distribución de los valores extremos. Un buen ejemplo de aplicación de estos dos métodos puede verse en la Referencia 11.

Para el presente estudio se ha trabajado con el Catálogo de Sismos Instrumentales para el período 1900 – 1983, elaborado por la Escuela Politécnica Nacional – Observatorio Astronómico – Instituto de Geofísica, actividad que forma parte del Proyecto SISRA. El Catálogo en mención ha sido establecido a partir de 24 fuentes diferentes de información descritas en la bibliografía. (Ref. 29).

Para determinar los parámetros de la sismicidad de cada área fuente se desarrolló un sistema de programa de procesamiento electrónico en una computadora Radio Shack Modelo II

Se formó primero un Archivo Maestro con el Catálogo general mencionado de todos los sismos ocurridos en el territorio ecuatoriano. Por medio de una subrutina se determina el período y la ubicación de cada área fuente que da una salida en papel que ayuda a chequear si la información ha sido bien ingresada. A partir del Archivo Maestro un programa del sistema establece el archivo de sismos que caen dentro de una específica área fuente. Otra subrutina establece las tasas medias anuales de ocurrencia de sismos para cada área fuente y para cualquier período de observación. A su vez otra subrutina hace el análisis para los valores extremos según la metodología establecida en las Referencias 11 y 14.

En estas subrutinas se utilizan los valores de la magnitud m_b – magnitud – de ondas corpóreas.–

Las Figuras 3 – 4 – 5 presentan las tasas de medias anuales

para distintos períodos de observación. Este estudio es necesario por la diferente calidad de la cobertura instrumental. El período que se escoja debe ser lo más representativo posible. Además se propuso como meta buscar un período que también haga compatible los resultados dados por las tasas medias y aquellos dados por los valores extremos. Se escogieron los siguientes períodos:

AREA 51	40 años	(1942 - 1981)
AREA 52	41 años	(1942 - 1982)
AREA 53	50 años	(1933 - 1982)

Por medio de los valores extremos se obtuvieron los parámetros de la sismicidad para cada área fuente en los mismos períodos de observación.

Las Figuras 6 - 7 - 8 presentan los resultados tanto para las tasas medias como de los valores extremos.

Para las tres áreas fuentes ambos resultados tienen suficiente concordancia. Por lo tanto aceptamos como válidos los resultados de los valores extremos.

Una última subrutina del sistema hace un análisis de las profundidades de los eventos en las distintas áreas fuentes.

En resumen los valores aceptados para caracterizar la sismicidad de las áreas fuentes son las siguientes:

<i>A/ FUENTE</i>	<i>ALFA</i>	<i>BETA</i>	<i>PROFUN. PROMEDIO</i>
AREA 51	1623	1.48	40 km.
AREA 52	20056	1.95	40 km.
AREA 53	7249	1.80	80 km.

4.- ACELERACIONES ESPERADAS.

Se ha desarrollado un programa de proceso automatizado para un computador Radio Shack modelo II, para obtener nive-

les de aceleraciones esperadas de ser excedidas en D años con diferentes niveles de probabilidades.

Los datos de entrada de este programa son:

- La ubicación y geometría de cada una de las áreas fuentes y la división de las subáreas.
- Los parámetros ALFA y BETA de cada área fuente y su profundidad promedio de los eventos.
- La ubicación del punto de estudio.
- El nivel de probabilidades deseado — P — y el número de años — D — en que se espera que un determinado nivel de aceleraciones sea excedida.
- La cota mínima del proceso. Aceptado que $G(A)$ sigue la 2da. distribución de Gumbel. Se ha comprobado que la cota mínima no influye determinantemente en los resultados. (Ref. 13).

Para este proyecto cada subárea fuente se lo tomó como cuadrículas de un cuarto de grado por lado.

El programa calcula las distancias hipocentrales de cada cuadrícula al punto de estudio y determina la función $F(A)$ según la ecuación (5), aceptando que la aceleración se atenúa según la ecuación (4). Los parámetros que definen esta ecuación han sido hallados para diferentes sitios del planeta por varios autores (Referencias 5,6,7,8,9,10,16).

Las curvas de atenuación son características propias de la región pero su obtención confiable implica tener una gran colección de registros instrumentales (acelelogramas) en roca de eventos que hayan sucedido a diferentes distancias del sitio.

En el país no disponemos al momento de esta información. Otra manera propuesta de obtener las curvas de atenuación es a partir de los datos de intensidades obtenidas para diferentes eventos históricos. Estas intensidades pueden transformarse a

aceleraciones y así obtener los parámetros que definen la ecuación 4 para la región. Este método tiene el inconveniente que se deriva del carácter subjetivo del parámetro intensidad. Además las transformaciones de intensidades a niveles de aceleración son discutibles, así como también la presencia del suelo local distorsiona los resultados.

Un camino a seguir sería el usar los parámetros que definen la atenuación para determinadas regiones que podrían asimilarse a nuestra zona de estudio. La gran mayoría de estudios se refieren al oeste de Estados Unidos (California) que creemos no se pueden aplicar al país. En la siguiente tabla presentamos los parámetros propuestos para otras regiones, inclusive resultados que engloban a varias regiones dando un promedio ponderado.

AUTOR	FUENTE/DATOS	C1	C2	C3	RD	REF.
Esteva (1970)	Noreste de América Central	1230	.8	-2.0	25	23
Donovan (1974)	N.O. USA, Japón Papua, N Guinea	1080	.50	-1.32	25	22
Donovan (1873)	Todas las regiones	1370	.68	-1.52	25	21

El programa realiza automáticamente el ajuste de la curva dado por la ecuación 6 y por lo tanto a partir de la ecuación 12, se puede obtener como salida del programa el nivel de aceleraciones que se espera pueda ser excedida en D años y con el nivel de probabilidades dado.

Es decir que el nivel de riesgo se expresa directamente por medio de las probabilidades de excedencia del movimiento del suelo en el sitio de emplazamiento de la obra, teniendo en cuenta la vida útil de la misma.

En general se aceptan dos movimientos de suelo de diseño. Uno que sería el máximo movimiento de suelo concebible de acuerdo a la potencialidad sísmica de las fuerzas sismogénicas. Para este movimiento se puede aceptar que la estructura puede sufrir daños, aún colapso parcial pero que no existen pérdidas esenciales, por ejemplo en una central nuclear no deben producirse pérdidas en el contenedor.

El otro movimiento de suelo de diseño es aquel que de ocurrir la estructura deberá soportarlo sin sufrir daño. En otras palabras la estructura deberá permanecer elástica a diferencia que para el máximo concebible se pueda aceptar disipación de energía al permitir entrar en cedencia a determinadas secciones de la estructura.

Los valores comunes aceptados son los siguientes:

Tipo de Estruct.	Movimiento (comport.)	Probab. de excedencia en 50 años	Per. Med. Retorno
Central Nuclear	A (Inelástico)	0.005	2500
	B (Elástico)	0.10	475
Grandes Presas	A (Inelástico)	0.05	1060
	B (Elástico)	0.10	475
Edificios	A (Inelástico)	0.20	200

En el presente artículo se ha obtenido resultados para diferentes niveles de probabilidades de excedencia en 50 años, usando las curvas de atenuación tanto de Esteva (1970) como de Donovan y se los presentan en la siguiente tabla.

Sitio: ATAHUALPA (2,28 S - 80,73 W)			
Prob. Exced. 50 años	Aceleración esperada en roca (%g)		Periodo de Retorno (años)
	Esteva (1970)	Donovan (1974)	
.25	.086	.150	174
.2	.098	.165	224
.1	.147	.219	475
.05	.208	.290	975
.01	.492	.535	175

Si las instalaciones a construir son vitales para el país se podría escoger una probabilidad en 50 años de .05. Aceptando la atenuación sugerida por Donovan (1974) se obtendría una cota superior para Atahualpa de .29g.

5.- ESPECTROS DE DISEÑO ELASTICO.

En términos generales para la construcción de los espectros elásticos para diferentes niveles de probabilidades se siguió el procedimiento presentado por el A.T.C. — Applied Technology Council — (Ref. 28). Este procedimiento se basa fundamentalmente en los trabajos de Seed (1975) y Hayashi (1971). La media de las formas espectrales para un amortiguamiento del 5 o/o de 104 registros fue establecida por Seed (Ref. 23) para 4 distintas condiciones de suelo y mostradas en la Figura 9.

Los cuatro tipos de suelo van desde roca hasta arcilla blanda y su descripción puede ser hallada en la Referencia 28, pág. 18 y 19 de los comentarios en la edición en lengua española.

Estas formas espectrales fueron comparadas con los estudios de Newmark (1973), Blume (1973) y Mohraz (1976).

Fue considerado apropiado simplificar la forma de estas curvas a una familia de tres, al combinar roca a suelos rígidos, llegando a curvas normalizadas mostradas en la figura 10.

Las tres curvas en esta figura se aplican a las tres condiciones de suelo descritas en la referencia 28, pág. 19 del comentario en su edición española.

De estas figuras se observa que para suelos suaves (tipo 53), se tiene una aceleración espectral menor que para los otros dos tipos de suelos. Esto coincide con la observación que para niveles intensos de sacudimientos del terreno, se estima que las aceleraciones máximas en la superficie de depósitos profundos son menores que en la roca.

Para obtener las formas espectrales se acepta que:

$$SA/g - 1.2 Vg S - 2.5 Ag.$$

Donde: SA — aceleración espectral; Vg — velocidad en la superficie de suelo; Ag — aceleración en la superficie de suelo; S — parámetro que caracteriza el tipo de suelo.

Aquí aceptamos que Ag es directamente la aceleración esperada cuya evaluación fue descrita en el título anterior si el sitio es roca o suelo firme; si el sitio tiene condiciones de suelo tipo S3, entonces Ag tendrá un valor igual al 80 o/o de la aceleración esperada en roca.

Según la referencia 28 los valores de — S — son: 1, para suelos tipo S1; 1.2, para suelo tipo S2; 1.5 para suelo tipo S3.

En el sitio estudiado de Atahualpa, el suelo local está constituido por un estrato de arena de consistencia compacta a muy compacta, con un espesor variable entre 3 y 15 metros, suprayaciendo a rocas de la Formación Tablazao. Este perfil de suelo puede asimilarse al tipo 51 definido por el ATC, para el cual el valor del coeficiente — S — es 1.

Es reconocido que las frecuencias altas se atenúan más rápidamente con las distancias que las bajas. Por lo tanto a distancias mayores que 100 km. para movimientos fuertes, las estructuras flexibles son más afectadas que las rígidas (Referencia 28). Esta observación se refleja en la relación V_g/A_g . Newmark establece que para aluvión esta relación varía entre 35.7 y 242.4 (cm/seg/g). Y recomienda se adopte un valor 122 (cm/seg/g) para condiciones normales.

Recogiendo estas recomendaciones se construyeron los espectros elásticos para Atahualpa a partir de dos valores de aceleraciones esperadas que corresponden a niveles de probabilidad de excedencia de 1.0 o/o y 5 o/o, se utilizó las curvas de atenuación dada por Esteva (1970). Las curvas del espectro son presentadas en la figura 11.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

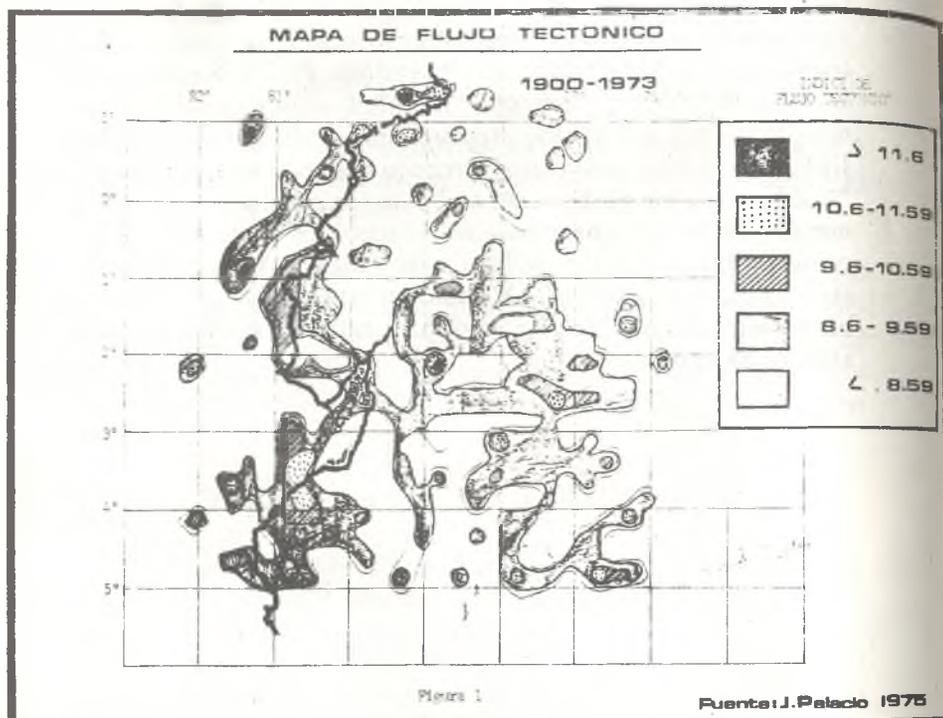
1.- La Definición de las áreas fuentes podrían ser mejoradas con una discusión amplia con la participación de un gran número de especialistas. Si se lograra algún consenso en un número limitado de hipótesis se debería analizar la sensibilidad de los resultados frente a las distintas hipótesis de la definición de las áreas fuentes. Lo ideal sería conocer el sistema de fallas activas de la región.

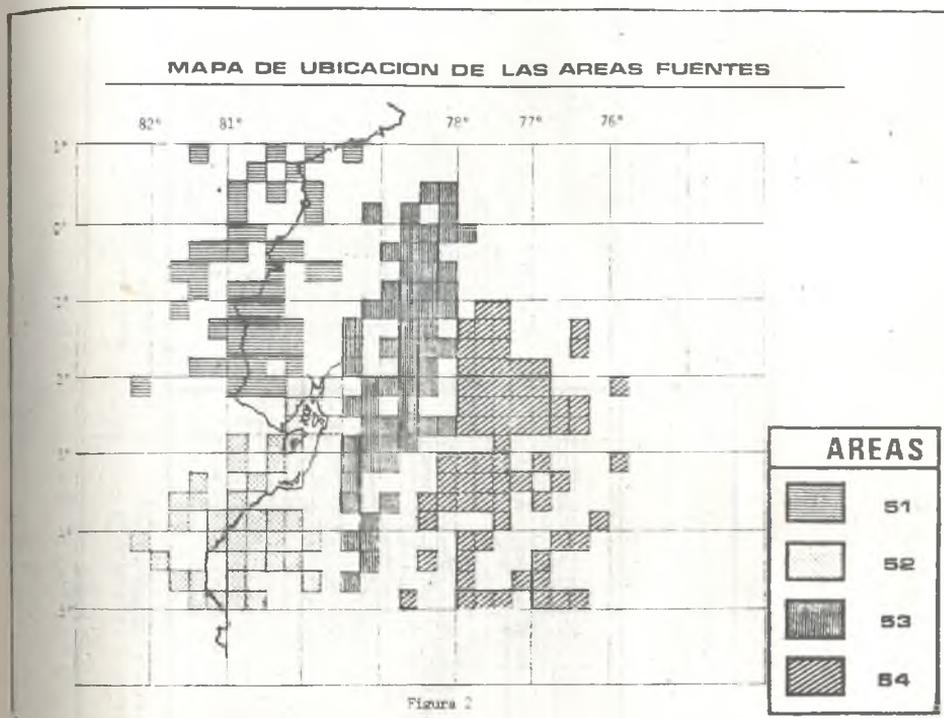
2.- Los resultados son sensibles al uso de las curvas de atenuación. Se debería investigar la posibilidad de la construcción de una o unas curvas de atenuación para la región.

3.- Una definición lo más cercana a la realidad de las áreas fuentes y de las curvas de atenuación darían resultados confiables. Este proceso de análisis se podría hacer para cada punto de una malla que cubra toda la región del país. Se podría unir los puntos con igual nivel de aceleración esperada de ser excedida con un mismo nivel de probabilidad y obtener un mapa de isoaceleraciones. Una regionalización a partir de este esquema sería ideal en una codificación sismo - resistente.

4.- Un problema adicional se presenta en cuanto a la con-

fiabilidad de los datos instrumentales de los sismos. Un aporte significativo es el esfuerzo del Observatorio Astronómico del Ecuador con la elaboración del "Catálogo de Hipocentros" del Ecuador dentro del Proyecto "SISRA", cuyos primeros informes de trabajo nos ha sido proporcionado gentilmente por el Sr. José Egred. Este proyecto ya recoge las recomendaciones de la "Conferencia intergubernamental sobre la evaluación y la disminución de los riesgos sísmicos", París, 1975, en especial en cuanto a la calificación de los datos, rangos probables de error, etc. Conocemos que la OAE, también está trabajando en sismos históricos que serán de gran valor para futuros estudios de riesgo sísmico en el país.





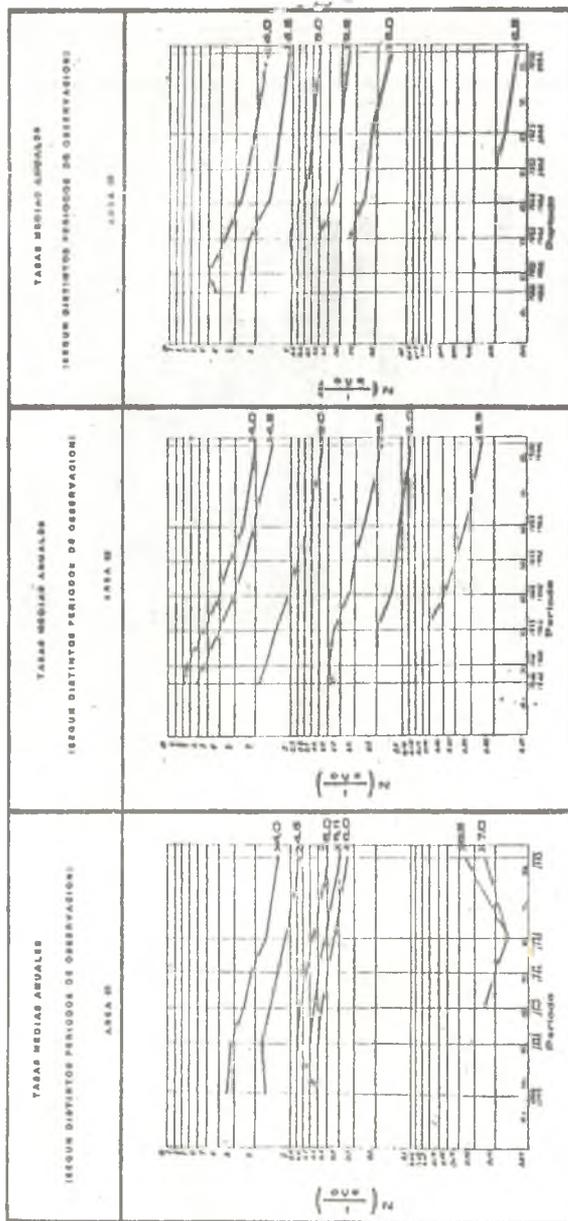


Figura 3

Figura 4

Figura 5

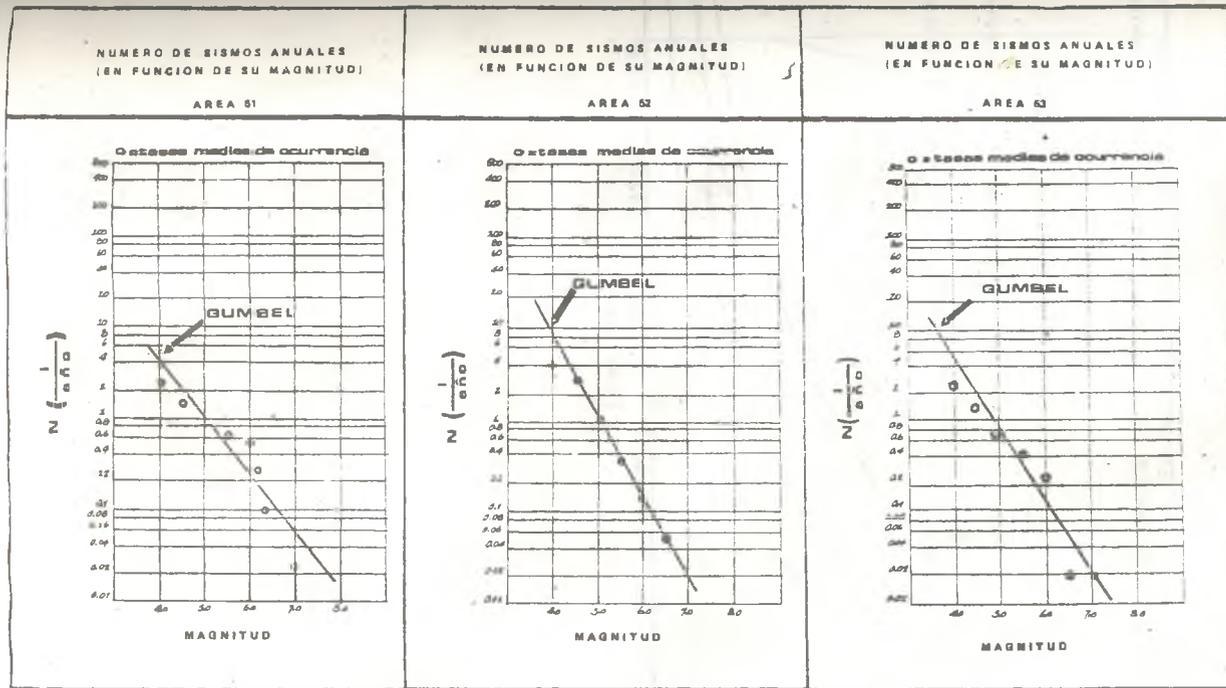


Figura 6

Figura 7

Figura 8

Figura 9

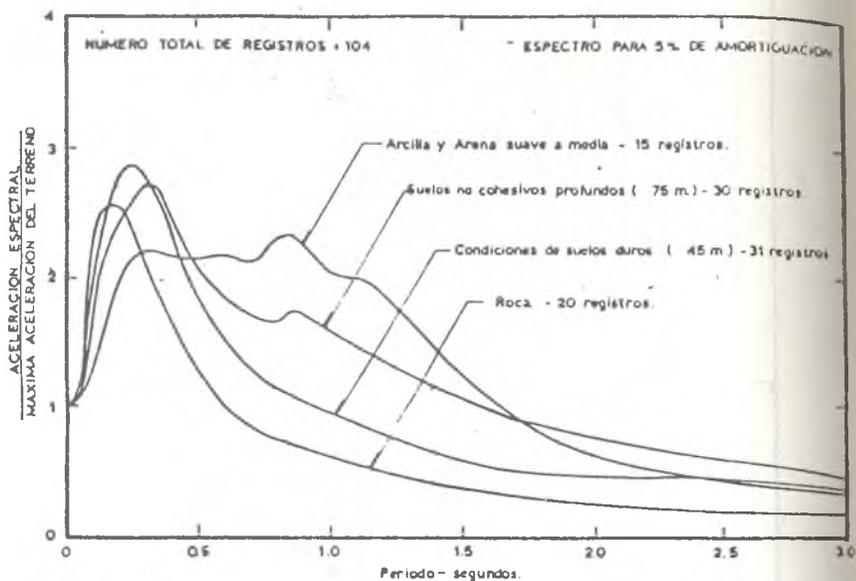


Figura 10

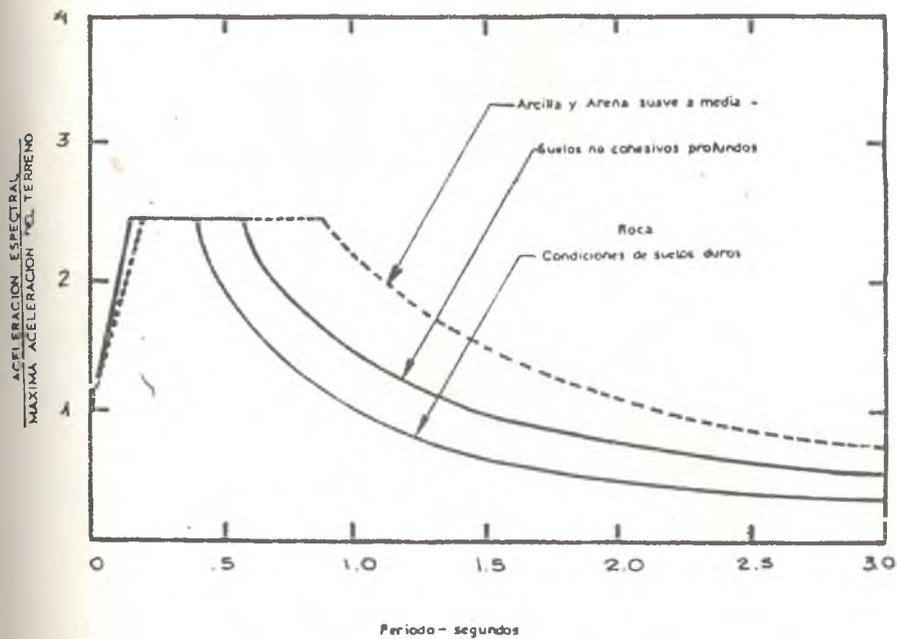
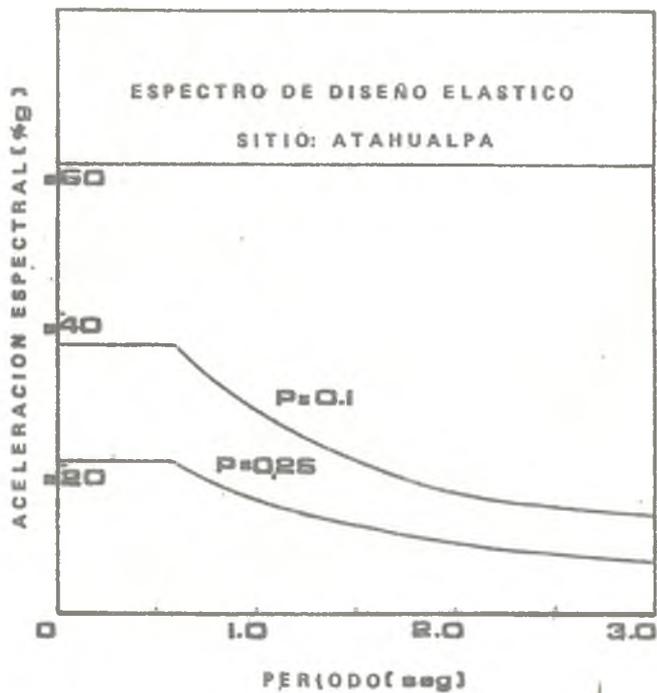


Figura 11



REFERENCIAS

- 1.- Algermissen S.T., Perkins D. — A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the Contiguous United States U.S. Geological Survey, 1976.
- 2.- Algermissen S.T., Perkins D.— A technique for seismic zoning: General considerations and parameters Microzonation Conference Seattle, 1972.
- 3.- Algermissen S.T., Perkins D.— Contributions to Seismic Zoning NOAA, 1973.
- 4.- Blum G. Efrén, Lara M. Ottón, Palacio G. José.— Justificación y Metodología de un Estudio de Riesgo Sísmico para el Ecuador — Instituto de Investigaciones y Estudios Avanzados, Reporte 79 — 01 — Guayaquil, 1979.
- 5.- Donovan, N.C. — Earthquake hazards for buildings. — Bul-

- ding practices for disaster mitigation: Nalt. Bur. Standards Building Sci. Series 46, p. 82—111., 1973.
- 6.- Donovan, N.C. — A statistical evaluation of strong motion data including the February 9, 1971. San Fernando earthquake — World Conf. Earthquake Eng., 5th, Rome 1973, Proc., v.l.n. 1256 — 1261., 1974.
 - 7.- Esteva, L. — “Regionalización Sísmica de México para fines de Ingeniería” Instituto de Ingeniería, UNAM, monografía No. 246, 18 p., abril 1970.
 - 8.- Esteva L. — Seismic risk and seismic design decisions. — Hansen, R.J., ed., Seismic design for nuclear power plants: Cambridge, Massachusetts Inst. Technology Press, p. 142 — 182, 1970.
 - 9.- Esteva L., and Rosenblueth, E. — Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes: Soc. Mexicana de Ingeniería Sísmica Bol., v. N^o. 1, p. 1— 18, 1970.
 - 10.- Esteva L., and Villaverde R.— Seismic risk, design spectra, and structural reliability: Worl Conf. Earthquake Eng., 5th Rome 1973, Proc. v. 2, p. 2586 — 2596, 1974.
 - 11.- Grases, José — Sismicidad de la región asociada a la cadena volcánica centroamericana del cuaternario — Caracas, 1975
 - 12.- Kelleher, J. Sykes, L., Oliver J. — Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Placific and the Caribbean — Journal of Geophysical Research — Vol. 78, Mayo de 1973.
 - 13.- Kiureghian, A.D., A.H.S. Ang— A fault rupture model for seismic risk analysis — Bulletin of Seismological Society of América — Vol. 67, 1977.
 - 14.- Cinna Lomnitz — Global tectonics and earthquake risk Elsevier Scientific Publishing Company, 1974.

- 15.- Lonsdale, P. — Ecuadorian subduccion system — The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, Vol. 62 N^o. 12, 1978.
- 16.- McGuire, P.K., — Seismic structural response risk analysis, incorporating peak response regressions on earthquake magnitude and distance: Massachusetts Inst. Technology, Dept. Civil Eng., Research Rept: R74 — 51, 371 p., 1974.
- 17.- Minster, J. B., Jordan, T.H., and Molnar, P.— Numerical modeling of instantaneous plate tectonics: Geophysics Journal of the Royal Astronomical Society, v. 36, p. 541 — 546, 1974.
- 18.- Newmark N.M. Rosenblueth E. — Fundamentos de Ingeniería Sísmica — Editorial Diana, México.
- 19.- Newmark N.M., Hall W. J. — Seismic design criteria for nuclear reactor facilities.
- 20.- Palacio G., José, Caicedo C. Nelson. — Riesgo Sísmico Zona Ecuador. Reunión Andina de Seguridad Sísmica — Lima 1975.
- 21.- Pennington, W.D. — Subduction of the Eastern Panama Basin and the seismotectonics of Northwestern South America University of Wisconsin, 1979.
- 22.- Ryall, A., Slemmons, D., Gedney, L.D. - Seismicity, Tectonism and surface faulting in the Western United States during historic time Bulletin of the Seismological Society of América, Vol. 56, N^o. 5, Octubre de 1966.
- 23.- Seed, H.B., Ugas, C., Lysmer, J. — Site — dependent spectra for earthquake design — Bulletin of the Seismological Society of América, Vol. 66, N^o. 1, February 1976.
- 24.- Santo T. — Characteristics of seismicity in South América — Earthquake Research Institute Bulletin. Vol. 47.

- 24.- Santo, T. — Characteristics of seismicity in South America — Earthquake Research Institute Bulletin. Vol. 47.
- 25.- Sevilla, J. — Esquema de la sismicidad en el Ecuador. Incel, Plan Maestro de Electrificación, 1981.
- 26.- UNESCO.— Terremotos. Evaluación y mitigación de su peligrosidad. Editorial Blume, 1980.
- 27.- Catálogo de Hipocentros.- Escuela Politécnica Nacional. Observatorio Astronómico. Instituto de Geofísica (Inédito, cortesía del Sr. José Egred), 1984.
- 28.- Final Review Draft of Recommended Comprehensive Seismic Design Provisions for Buildings (Part III), prepared by Applied Technology Council — California, 1977.

Versión español: Disposiciones tectónicas para desarrollar códigos sísmicos. Traducción realizada por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1979.

- 29.- Fuentes de información del Catálogo de sismos instrumentales:

CFR Charles F. Richter
G — R Gutenberg — Richter
ISS International Seismological Summary
GUT Gutenberg
JMA Japan Meteorological Agency
CGS Coast and Geodetic Survey U.S.A.
ISC International Seismological Center
SIS Proyecto SISAN
BCI Bureau Central International of Seismologic
PAS Pasadena, CA., U.S.A.
TAC Tacubaya, Mexic.
MAT Matsushiro, Hunshu, Japan
PAL Palisades, NY, U.S.A.
WIC Wichita, U.S.A.
EUR Eureka, U.S.A.