

ESTIMACIÓN DE LAS INTENSIDADES SÍSMICAS  
MEDIAS MILENARIAS EN PRESAS DE EMBALSE  
AL SUR DE LOS 36° EN ARGENTINA

JUAN S. CARMONA\*  
RAQUEL P. DE CARMONA\*\*

RESUMEN

Se muestra la determinación del tiempo medio de ocurrencia milenaria de la intensidad sísmica en una ubicación en roca a partir de la evaluación de los efectos producidos por la distribución geográfica de la actividad sísmica media regional que es definida mediante apropiadas relaciones matemáticas. La relación adoptada para describir esta actividad sísmica media en cada volumen elemental de la corteza terrestre es:

$$\text{Log } N = A - B \cdot M_s - C(M_s/M_{ss})^{30}$$

Siendo

$N$  = frecuencia media anual de eventos sísmicos cuyas magnitudes son iguales o mayores que el valor  $M_s$ . Las constantes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $M_{ss}$  son valores que dependen de la latitud, longitud y profundidad, las que son obtenidas a partir del análisis estadístico de la información sismológica histórica e instrumental y su correlación con los resultados de los estudios geológicos y tectónicos de la Región.

\*Director del Instituto de Investigaciones Antisísmicas "Ing. Aldo Bruschi" —Universidad Nacional de San Juan— San Juan, Argentina.

\*\*Investigador, idem.

Se adopta a la aceleración espectral del sismoscopio Wilmot (0,7 seg. de período y 10% de amortiguación) como valor instrumental para medir la intensidad sísmica en la ubicación en roca en estudio.

## I. INTRODUCCIÓN

Para estimar la probable intensidad sísmica que puede ocurrir en una ubicación, es necesario reunir y analizar información obtenida por los instrumentos de las estaciones sismológicas y recopilar los antecedentes sísmicos históricos y los estudios geológicos y tectónicos de la región circundante a la ubicación. Para proyectos y verificación de construcciones importantes, tales como grandes presas de embalse o centrales nucleares, será necesario estimar los valores de intensidad que corresponden a muy bajo riesgo de ocurrencia.

Con tal objeto se requiere reunir información lo más antigua posible y preferiblemente que se extienda a varios milenios, circunstancia que no es aplicable a los datos instrumentales que sólo han sido obtenidos en este siglo y que tampoco es común en los relatos históricos de ocurrencia de terremotos.

Esta dificultad para la obtención de información antigua es más crítica cuando la región en estudio posee una baja actividad sísmica media anual y su actual población es escasa y reciente, tal como ocurre en el sector occidental de la región centro-sur de la República Argentina limítrofe con Chile, en donde a lo largo del río Limay han sido construidos o proyectadas varias grandes presas de embalse y centrales hidroeléctricas, como Alicura, Piedra del Águila, El Chocón (Fig. 1).

Para solucionar el problema de la carencia de adecuados antecedentes sismológicos acerca de la ubicación de estas instalaciones hidroeléctricas, se evalúa la actividad sísmica media en una región más extensa que denominaremos "región sísmicamente asociada a la ubicación" (Fig. 1), y luego se define su distribución de acuerdo a la latitud, longitud y profundidad para obtener la variación de la densidad de la actividad sísmica en la región. Esta densidad es la frecuencia media anual de los eventos sísmicos de distinta magnitud cuyos focos están localizados en cada elemento de la corteza terrestre de la región seleccionada.

La ocurrencia de cada uno de estos eventos sísmicos en la región producirá en la fundación rocosa de la ubicación en estudio, temblores y terremotos, cuyas intensidades pueden ser estimadas mediante adecuadas relaciones matemáticas que vinculan a la intensidad sísmica con la magnitud del evento según sea la distancia desde el foco del sismo a la

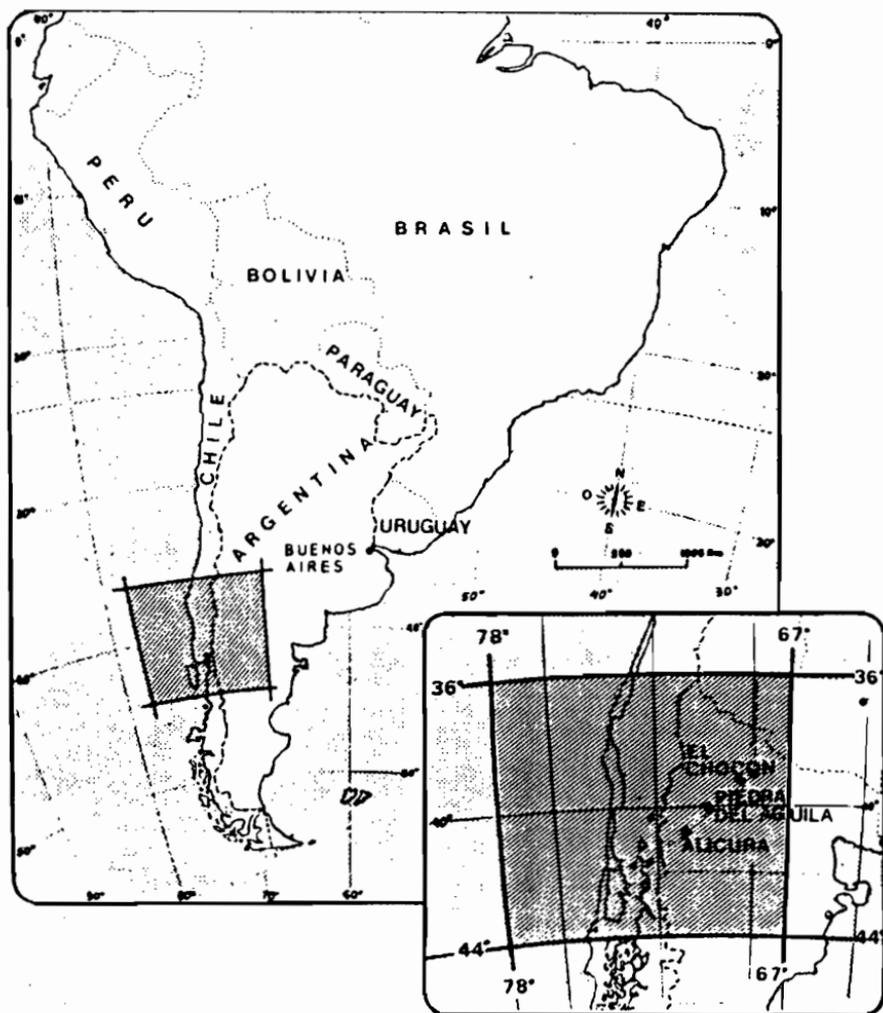


Figura 1. Ubicación presas de embalse sobre río Limay y región sísmicamente asociada.

ubicación. El total de los temblores y terremotos así obtenidos en la ubicación pueden ser clasificados y ordenados según su intensidad sísmica, resultando las distintas frecuencias medias anuales de terremotos que igualan o superan distintas intensidades y, en consecuencia, el tiempo medio de ocurrencia o tiempo medio de retorno de las intensidades sísmicas, valores por medio de los cuales se puede describir la sismicidad de la ubicación de la instalación hidroeléctrica en análisis.

## II. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA

Para estimar las probables intensidades sísmicas que pueden afectar a las ubicaciones de las presas de embalse del río Limay (Fig. 1), se ha seleccionado como región sísmicamente asociada a la ubicación a la comprendida entre los paralelos 36° y 44° de latitud sur y los meridianos 67° y 78° de longitud oeste. La Red Sismológica Internacional, (1, 2 y 3), ha suministrado información acerca de una importante cantidad de eventos sísmicos que han ocurrido en esta región desde principios de este siglo hasta nuestros días. De éstos, el más importante es el sismo de gran magnitud que afectó a la región el 22 de mayo de 1960 y que con su secuencia de réplicas delimitaron una extensa área localizada principalmente en el fondo oceánico cercano a la costa chilena a lo largo de varios cientos de kilómetros de la región centro-sur de Chile.

El área más violentamente sacudida fue aquella alrededor de la ciudad de Valdivia, distante aproximadamente 400 km desde la ubicación de las presas del río Limay. Esta secuencia y el resto de los eventos registrados en el área rápidamente decrecen en cantidad desde la costa hacia el este. Simultáneamente, su profundidad focal se incrementa rápidamente hasta alcanzar los 150 km bajo el río Limay, delineando la Línea de Benioff que según la moderna Teoría de la Tectónica Global sería el frente de colisión entre las Placas Sudamericanas y la de Nazca, (5). Además de esta actividad sísmica, otros eventos sísmicos relativamente superficiales, como el sismo de Chillán del 24-I-1939, se localizan en el valle central de Chile y en la cordillera de los Andes hasta las cercanías de algunas de las presas estudiadas, decreciendo en cantidad y magnitud desde este valle central hacia el este. Estos dos conjuntos de actividad sísmica, que denominaremos Benioff y valle central, respectivamente, constituyen las dos fuentes principales en donde se localizarían los focos de los sismos que podrían producir efectos sensibles en la ubicación de las presas del río Limay.

En las anteriores centurias, la escasa población del área estudiada (Fig. 1), estuvo localizada principalmente cerca de la costa y, en consecuencia, los relatos históricos que han llegado a nuestros días acerca de efectos de terremotos en siglos pasados son aquellos correspondientes a la ocurrencia en el área de los grandes sismos destructivos con magnitud superior a 7 ó 7.5. Por otra parte, los datos instrumentales citados precedentemente indican que el litoral chileno es el área sísmica más activa de la región, por lo que estas referencias sísmicas históricas son muy valiosas para estimar como están distribuidas en tiempo y espacio los grandes

eventos sísmicos. En los 400 años anteriores a la fecha ha existido una muy uniforme distribución de grandes sismos en la costa del área estudiada (4).

La restante fuente de información disponible empleada en el presente análisis son los resultados de los estudios geológicos y tectónicos de la región de Fig. 1, los que serán correlacionados con las particularidades sísmológicas ya mencionadas. De acuerdo a la Teoría de la Tectónica Global la interacción entre las placas de la corteza terrestre está evidenciada por la distribución de la actividad sísmica, la que es mayor en el frente de contacto. En tal caso, la Fosa Chilena es la traza superficial del frente de colisión entre las Placas Sudamericana y de Nazca y, en consecuencia, luego de transcurridos algunos miles de años, en el litoral chileno se debería localizar una actividad sísmica muy uniformemente distribuida y que será la más importante de la región, como lo muestran el gran sismo de mayo de 1960 y otros similares que han ocurrido en las últimas cuatro centurias. De acuerdo a esta Teoría, la actividad sísmica debe decrecer hacia el este de la Fosa, lo cual coincide con la distribución de la cantidad de eventos que los instrumentos han registrado en este siglo. Por otra parte, los estudios geológicos regionales (6), dan cuenta que en la región decrece la influencia de la orogenia andina del terciario en las áreas localizadas hacia el este de las cumbres de la cordillera de los Andes, lo cual coincide con la menor cantidad y magnitud de los sismos superficiales registrados en esa área, más aún, en los alrededores de las ubicaciones de las presas no se han encontrado evidencias de movimientos neotectónicos en el fallamiento superficial.

Estas principales particularidades enunciadas acerca de la distribución de la actividad sísmica en la región son los fundamentos para cuantificar su densidad en cada volumen elemental de corteza.

### III. DISTRIBUCIÓN DE LA MAGNITUD DE LOS SISMOS

En el total de la región seleccionada (Fig. 1), la distribución según magnitud de la frecuencia media anual de eventos sísmicos puede ser dada mediante la determinación de la bien conocida relación de Gutenberg-Richter con el agregado de un tercer término, resultando:

$$\text{Log } N = A - B \cdot M_s - C(M_s/M_{ss})^{30} \quad (1)$$

Siendo

$N$  = frecuencia media anual de eventos sísmicos cuyas magnitudes son mayor o igual que el valor  $M_s$ ;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $M_{ss}$  constantes. El tercer término

indica que los sismos de gran magnitud son mucho más escasos que los restantes, ya que el estado de acumulación en la corteza terrestre de cantidades de energía de deformación son muy inestables cuando superan un cierto valor y, en consecuencia, es muy difícil la ocurrencia de sismos que liberen cantidad de energía superior a tal valor.

Los valores de las constantes A, B, C y  $M_{ss}$  pueden ser calculados a partir de las cantidades medias anuales de eventos de cada magnitud informados por la Red Sismológica Internacional (1 y 2), con foco en el área en estudio de Fig. 1, y posteriormente corregidas por la influencia de la variación de la cantidad de estaciones sismológicas en operación y del tipo de instrumental instalados durante las sucesivas décadas del presente siglo. Sin embargo, como fue precisado precedentemente, la antigüedad de esta información sismológica es insuficiente para determinar la frecuencia media anual de los eventos de gran magnitud y, por lo tanto, deben ser tenidos en cuenta para estos grandes sismos las referencias históricas de su ocurrencia por ser más antigua (4). Con tal objeto, el conjunto de las mayores magnitudes que ocurrieron en los sucesivos intervalos de 50 años de las cuatro centurias pasadas, ha sido analizado mediante la estadística de los valores extremos, obteniéndose un tiempo medio de retorno de 250 años para los sismos cuya magnitud es igual o mayor de 8.5. Con este resultado, se completa el conocimiento de los coeficientes de la Ecuación (1), obteniéndose (Fig. 2):

$$\text{Log } N = 5,312 - 0,847 M_s - 0,06 (M_s/8)^{30} \quad (2)$$

Esta actividad debe ser distribuida en la región de acuerdo a latitud, longitud y profundidad para obtener la frecuencia media anual de los sismos en cada volumen elemental de corteza terrestre de la región, cantidad a la que se denominará "densidad de actividad sísmica"  $D_s$ , la cual debe cumplir con la condición

$$N (\text{Eq } 2) = \int_{\text{región}} D_s \cdot dV \quad (3)$$

Para evaluar  $D_s$  en la región, se adopta una ecuación del tipo de (1), en la que los nuevos coeficientes A, B, C y  $M_{ss}$  varían con la latitud, longitud y profundidad y son obtenidos a partir de la correlación con las particularidades de la distribución geográfica de la actividad sísmica detallados precedentemente, adoptando a este efecto la forma:

$$D_s = F_0 (\text{lat}) \cdot F_1 (\text{long}) \cdot F_2 (\text{prof}) \cdot N(\text{Eq}(2)) \quad (4)$$

siendo  $F_0$ ,  $F_1$  y  $F_2$  funciones dependientes sólo de la latitud, longitud y

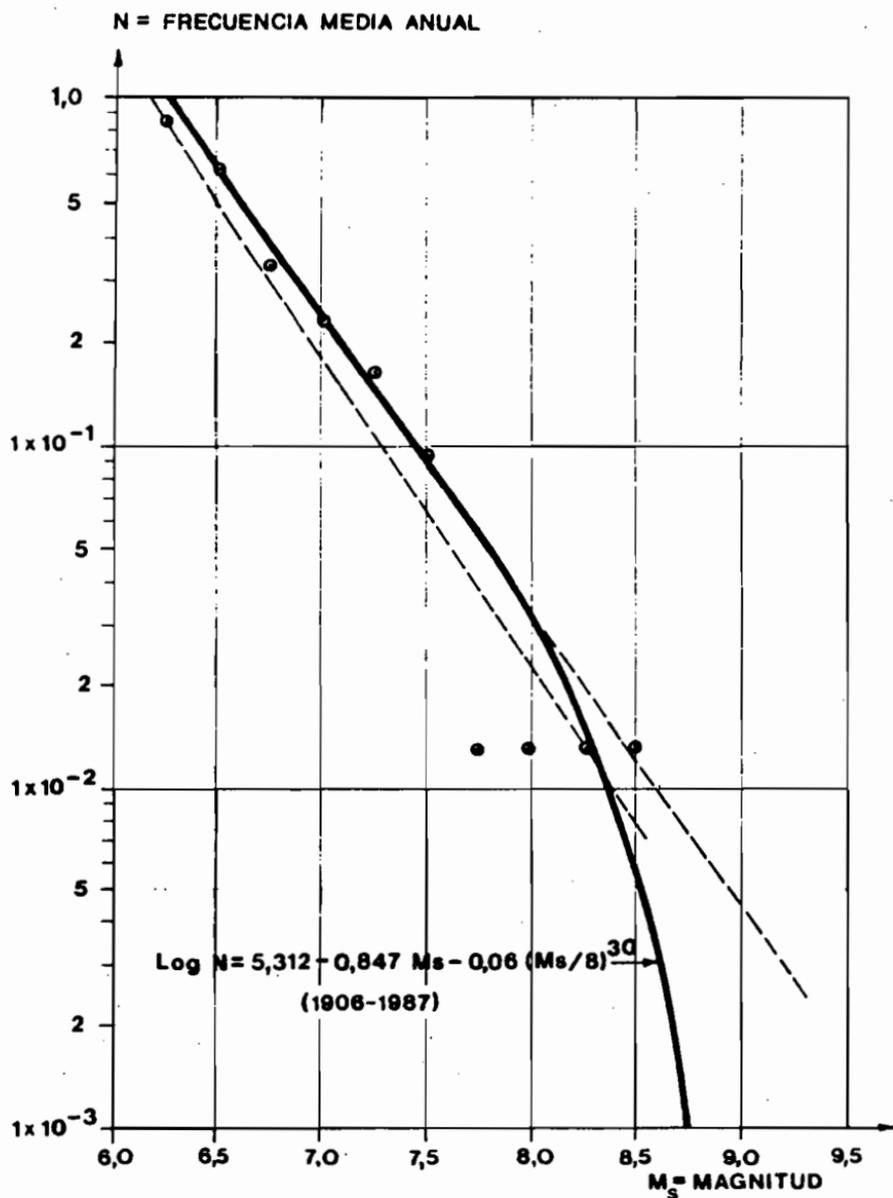


Figura 2. Distribución de sismos según magnitud región sísmicamente asociada.

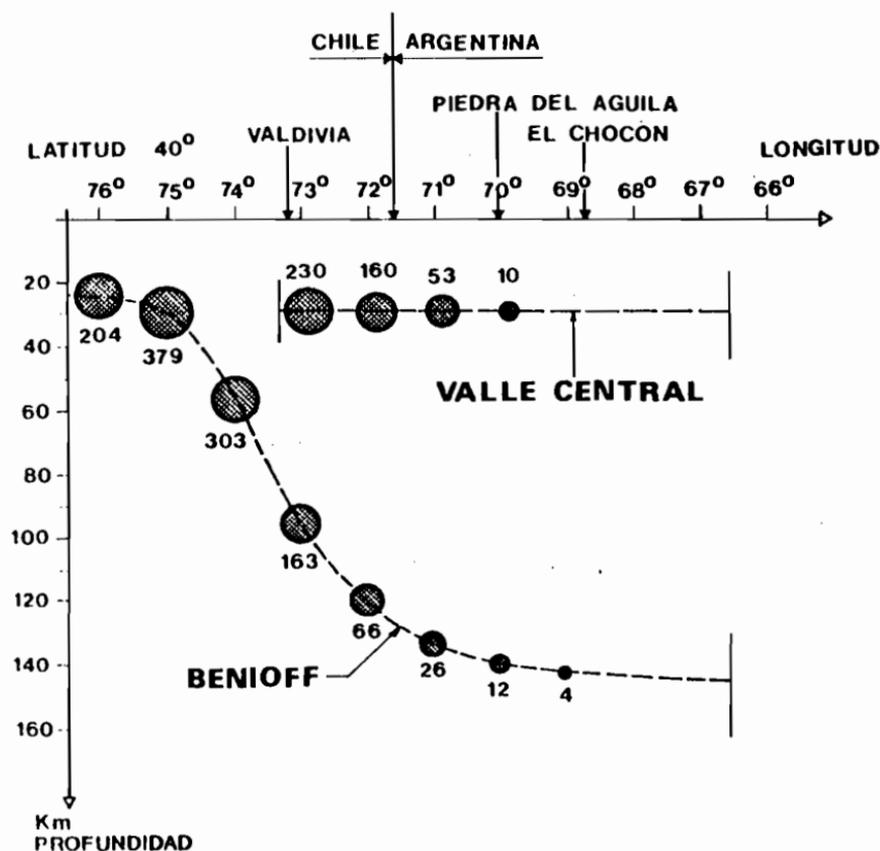


Figura 3a. Frecuencia media milenaria  $M=6$ .

profundidad, respectivamente. En las Figs. 3a y 3b están graficadas la frecuencia media de eventos sísmicos en 1.000 años con magnitudes mayores que 6 y en 10.000 años con magnitud mayor que 8.5, respectivamente, que corresponden a cada grado de longitud en los 40° de latitud sur, mientras que en la Fig. 4 se muestra el intervalo seleccionado de las profundidades que incluyen al 80% de los eventos.

#### IV. TIEMPO MEDIO DE OCURRENCIA DE INTENSIDADES SÍSMICAS

El objetivo fundamental de este estudio es la estimación de las intensidades sísmicas que corresponden a muy bajo riesgo de ocurrencia en las ubicaciones de las presas de embalse del río Limay.

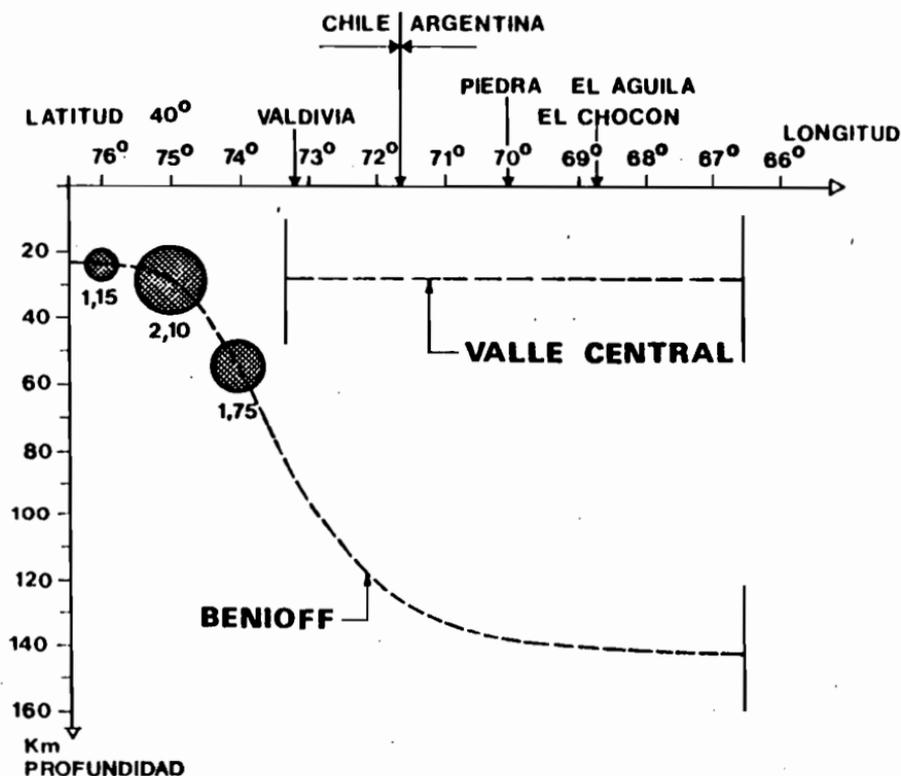


Figura 3b. Frecuencia media diezmillenaria  $M=8.5$ .

El Sismoscopio Wilmot es un instrumento simple, de bajo costo, confiable y fácil de mantener, destinado a registrar el efecto de los terremotos destructivos. Con estos instrumentos, cuyo parámetros dinámicos son 0,7 sec. de período y 10% de amortiguación y de los cuales han sido instalados más de 200 en el oeste argentino, se han obtenido registros cuyas amplitudes muestran estar mejor correlacionadas con los valores asignados de la intensidad sísmica en la Escala de Mercalli que éstos con la aceleración máxima del terreno durante el terremoto, mostrando así que la amplitud de los registros en el Sismoscopio es un buen valor para ser empleado como medida instrumental de la intensidad sísmica. Por otra parte, para obtener la correspondiente relación entre el registro en el Sismoscopio Wilmot con la magnitud del evento sísmico y la distancia del Sismoscopio al foco se puede emplear la información disponible para la estimación de la magnitud Richter mediante el sismógrafo de Torsión

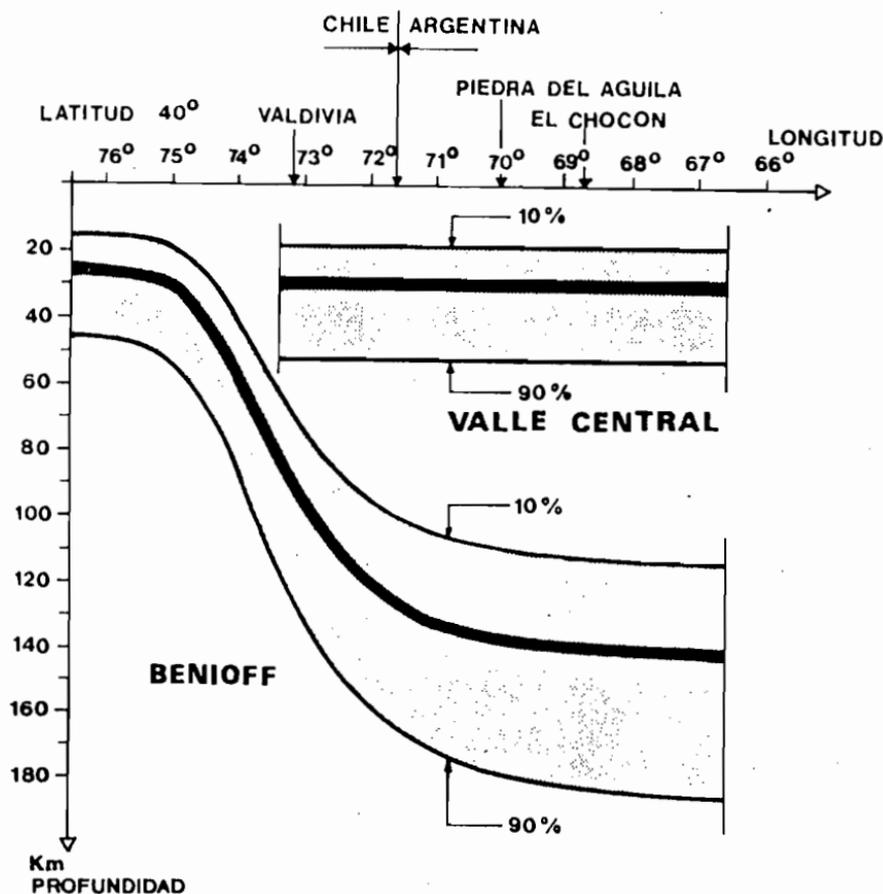


Figura 4. Curvas límites porcentuales 10 y 90% profundidad focos.

Wood-Anderson, ya que su período de 0,8 seg. es cercano al del Sismoscopio en (7). A partir de esta información y con los resultados del análisis de los registros de Sismoscopios obtenidos en áreas epicentrales de fuertes terremotos (8 y 9), se derivan las curvas medias de atenuación para la aceleración espectral del Sismoscopio Wilmot ubicado en roca, reemplazando la distancia al foco por aquella al baricentro de liberación de energía del sismo (Fig. 5).

Finalmente, es posible estimar el tiempo medio de ocurrencia de las intensidades sísmicas en una ubicación a partir de la cantidad de terremotos que ocurran en la ubicación como consecuencia de la ocurrencia de los sismos de distinta magnitud que estén localizados en la región en estudio y



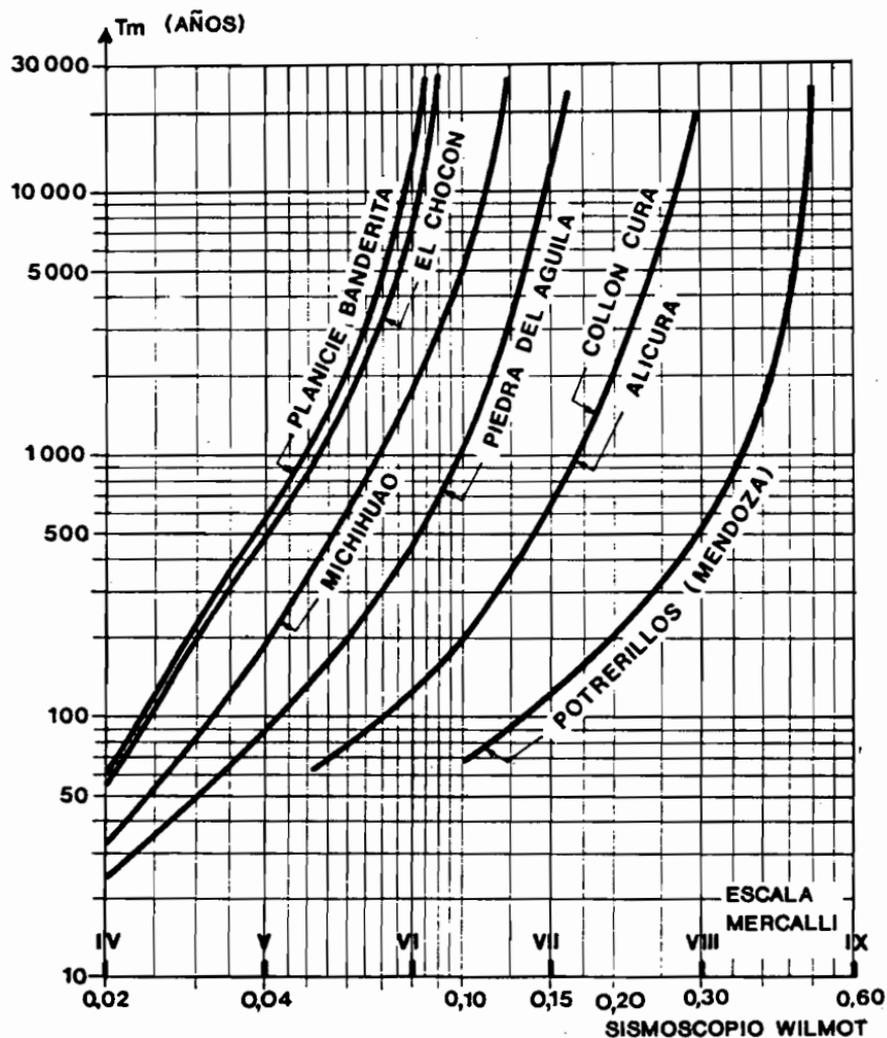


Figura 6. Tiempo medio ocurrencia intensidades sísmicas.

- $D$  = Densidad de actividad sísmica dada por la Ecuación 4.  
 $V$  = Volumen de corteza terrestre de la región de Fig. 1.  
 $dV$  = Volumen elemental de corteza terrestre.  
 $e(M,D)$  = 1, si la intensidad del terremoto en ubicación  $U$  es mayor o igual que  $I$ .  
 = 0, si la intensidad del terremoto en la ubicación  $U$  es menor que  $I$ .

A partir del conocimiento de NE (I,U) se obtienen los tiempos medios de ocurrencia de la intensidad sísmica I en la ubicación en estudio U mediante:

$$TIm = 1/NE(I,U) \quad (6)$$

## V. CONCLUSIONES

Los valores de TIm, que se obtienen para algunas ubicaciones de presas en el río Limay están dadas en la Fig. 6. Estas curvas muestran diferencias entre los tiempos medios de ocurrencia de igual intensidad según sea la ubicación. Estas diferencias entre los tiempos medios son admisibles y adecuadas cuando se las correlaciona con las variaciones que corresponde a las ubicaciones en relación con su localización geográfica, sus condiciones geológicas y las evidencias sísmicas, dando así suficiente confiabilidad al empleo de esta metodología para la estimación de las intensidades sísmicas milenarias en la ubicación de presas de embalse para definir los requerimientos de proyectos y verificación que se correspondan con riesgos compatibles con la importancia y trascendencia de las obras en estudio.

## REFERENCIAS

1. National Earthquake Information Service-Monthly Usting. U.S. Geological.
2. GUTENBERG, B. RICHTER, C. *Seismicity of the Earth*. Princeton University, 1954.
3. VOLPONI, F. *Aspectos Sismológicos del Territorio Argentino*. Primeras Jornadas Argentinas de Ingeniería Antisísmica, 1962.
4. LOMNITZ, C. *An Earthquake Risk Map of Chile*. Fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago de Chile, 1969.
5. PLAFKER, G. *Alaskan Earthquake of 1964 and Chilean Earthquake of 1960: Implications for Arc Tectonics*. Journal of Geophysical Research febrero 1972.
6. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba. *II Simposio de Geología Regional Argentina*, 1979.
7. TRIFUNAC, M.D., BRADY, A.G. *Correlation of Seismoscope Response with Earthquake Magnitude and Modified Mercalli Intensity*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, N° 2, 1975.
8. Instituto de Investigaciones Antisísmicas. *El sismo de Cauce, San Juan, Argentina del 23-XI-77 y la seguridad que proveen las normas sismorresistentes*, SIPAC 78 Viña del Mar, Chile, 1978.
9. SARAGONI, R., GONZÁLEZ, P., FRESARD, M. *Análisis de los acelerogramas del terremoto del 3 de marzo de 1985. I Parte*. Universidad de Chile, 1985.