

ESTUDIO Y DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE FUENTES SISMICAS EN VENEZUELA MEDIANTE EL ANALISIS ESPECTRAL DE ONDAS CORPOREAS

Gloria J Romero T

Fundacion Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS)
Apartado Postal 76880, Caracas 1070-A, Fax:58-2-257.99.99

RESUMEN

Un estudio de los sismos obtenidos por la red sismológica digital de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas FUNVISIS desde 1990 a 1992, permitió calcular los parámetros de fuentes sísmicas (caída de esfuerzo, radio de la falla, Momento sísmico escalar) por medio del análisis espectral de ondas corpóreas y utilizando el modelo de falla circular propuesto por Brune en 1970.

Dentro de los estudios se incluye la relación del momento sísmico escalar con el radio de la falla y la relación del momento sísmico escalar con la magnitud, de la cual se obtuvo una relación para el cálculo de magnitud en función de los parámetros de fuente. Los resultados obtenidos sugieren la existencia de dos frecuencias de esquina y una relación momento sísmico escalar magnitud en términos cuantitativos.

ABSTRACT

An evaluation of seismic data collected by the digital seismic networks of the Venezuelan Foundation for seismological Research FUNVISIS from 1990 to 1992, permitted to calculate source seismic parameters (stress drop, source radius and seismic moment) by means of spectral analysis of corporeal waves and taking into account the model of circular fault proposed by Brune (1970).

This study evaluated the relations of seismic moment vs source radius and seismic moment vs magnitude from which a relation was obtained that permits to calculate the magnitude as a function of source parameters. The results suggest that two corner frequencies and a relation of seismic moment vs magnitude in quantitative term exist

FRECUENCIA DE ESQUINA

El desplazamiento en campo lejano debido a un modelo cinemático razonable de un terremoto, posee un espectro con un valor constante a pequeñas frecuencias y proporcional a una potencia negativa para las altas frecuencias. Siguiendo el modelo de Brune (1970), se define la frecuencia de esquina f_c , como la frecuencia de intersección de las asíntotas de baja y alta frecuencia en un espectro. El espectro en campo lejano está ahora caracterizado por tres parámetros:

- (i) El nivel de baja frecuencia, el cual es proporcional al momento sísmico
- (ii) La frecuencia de esquina f_c .
- (iii) La potencia de la asíntota a alta frecuencia

INSTRUMENTACION

Para realizar el análisis espectral a eventos sísmicos, estos deben ser recolectados en forma digital. Actualmente FUNVISIS posee un sistema de detección y recolección de datos sismológicos telemétrico digitales, el cual presenta muchas ventajas frente a la adquisición analógica, debido a que con el sismograma digitalizado se pueden realizar gran variedad de funciones que facilitan el análisis y aumentan la precisión en las medidas.

LOCALIZACION DE TERREMOTOS

40 eventos fueron seleccionados para este estudio. Estos eventos presentan un error en latitud y longitud menor de 3 Km y el error en profundidad menor de 1.6 Km. Los epicentros muestran aparente alineación con las fallas mapeadas y fueron localizados usando el programa Basic-Hypo [Mendoza, J y Morgan, D. 1985], el cual utiliza un solo modelo de corteza.

DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO USADO EN LA INTERPRETACION

1) Se realizó una revisión detallada de los eventos digitalizados usando el programa XPLOT [Mendoza. 1992] y se escogieron los que reunían las siguientes características :

- a) registrados en cuatro ó mas estaciones
- b) presentaron con claridad las ondas S
- c) presentaron ondas S no saturadas
- d) con magnitud superior a 2.7.

2) Puesto que la señal recibida está codificada y comprimida, es necesario convertir los eventos de formato BINARIO a formato ASCII (todo esto se realiza mediante el programa XPLOT).

3) Debido a que el rango máximo de amplitud de señal es 10 volt dentro de un rango de amplitud entre -5 volt y 5 volt y la señal es digitalizada en nuestra estación central con una tarjeta analógico digital de 2048 cuentas para 5 volt, el evento se multiplica por un factor de escala que permita convertirlo de número de cuentas a cm, este factor es 0.00122 y se obtiene al hacer la conversión de voltaje a cm usando la relación 10 volt = 5 cm = 4096 número de cuentas.

CALCULO DEL ESPECTRO DE AMPLITUD A PARTIR DE UN REGISTRO SISMICO

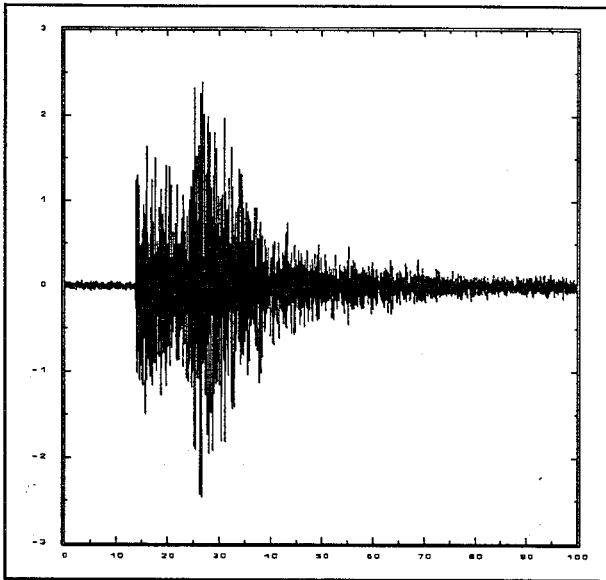


Fig 1: Representación de un evento sísmico, mostrando la ventana de tiempo seleccionada para el estudio

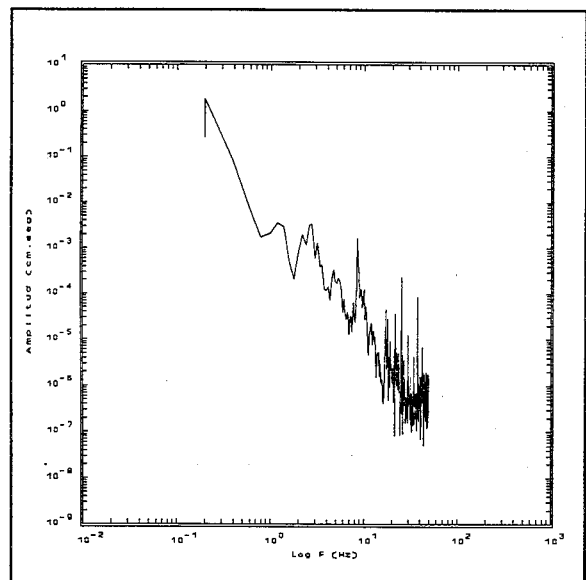


Fig 2: Espectro de amplitud en desplazamiento para el evento de la figura 1

1) Se escoge la longitud de ventana de tiempo que comienza ligeramente antes de comenzar el paquete de ondas S y finaliza varios segundos después dependiendo de la magnitud del terremoto y del comportamiento de la amplitud en la serie de tiempo. No obstante se encontró que variando la longitud de la ventana por 1/2 seg ó mas no afecta la escogencia del nivel de baja frecuencia. En los casos donde se pensó que podía haber ambigüedad acerca del nivel de baja frecuencia, se trató varias longitudes de ventanas (ver figuras 3 y 4).

2) Una vez escogida la ventana de tiempo se halla el espectro de amplitud mediante un algoritmo basado en la transformada rápida de Fourier (FFT).

3) Las amplitudes en el dominio de la frecuencia deben ser corregidas por la curva de calibración del instrumento, logrando así que se reproduzca con alta precisión el movimiento del suelo.

4) Debido a que los registros son de velocidad, se postmultiplica la transformada de Fourier por F^{-1} para producir el espectro en desplazamiento ya que se necesita pasar de velocidades medidas sobre el sismograma a valores de movimiento del suelo .

5) El nivel de baja frecuencia espectral Ω_0 se determina a ojo, trazando una línea recta del nivel espectral a bajas frecuencia.

6) La frecuencia de esquina F_c fue seleccionada como la intersección del nivel de baja frecuencia y la línea recta que se ajusta mas a la caída del espectro. Si dos caídas se presentan en el espectro, se usará el declive de la mas lenta de las bandas de frecuencia. La figura 2 muestra el espectro de amplitud obtenido para el evento de la figura 1.

DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE FUENTES

— Siguiendo lo descrito en el paper "Source Parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, Earthquake Sequence" [Archuleta-Cranswick-Mueller-Spudich, 1982] se procedió a la determinación de los parámetros de fuentes como sigue:

El momento sísmico M_0 se calculó mediante la expresión para modelo de falla circular dado por [Brune, 1970]:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3 R\Omega_0}{2R_{\theta\phi}} \quad (1)$$

donde ρ es la densidad, β es la velocidad de ondas de corte en la fuente, R es la distancia hipocentral entre la fuente y el receptor, y $R_{\theta\phi}$ es el coeficiente del patrón de radiación de onda S. Para este trabajo se usó el patrón de radiación constante de 0.6 y una velocidad de onda S promedio de 3.6 Km/s y una densidad de 2.9 gr/cm³.

El factor 2 en el denominador es la corrección por superficie libre [Archuleta-Cranswick-Mueller-Spudich, 1982]. Para cada registro se calculó un promedio de la asíntota en baja frecuencia Ω_0 que está normalizado a 10 Km, mediante la siguiente expresión:

$$\langle \Omega_0 \rangle = \text{antilog} \left\{ \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^{NS} \log(\Omega_{0i} R_i / 10) \right\} \quad (2)$$

donde NS es el número de estaciones para el cual el espectro de ondas S fuera calculado, R_i es la distancia hipocentral entre la fuente y la i ésima estación, y Ω_{0i} es la asíntota de baja frecuencia de la i ésima estación. El promedio del momento sísmico $\langle M_0 \rangle$ se calculó de manera similar mediante la expresión:

$$\langle M_0 \rangle = \text{antilog} \left\{ \frac{1}{NS} \sum_{i=1}^{NS} \log M_{0i} \right\} \quad (3)$$

donde M_{0i} es el momento sísmico determinado desde (1) a la i ésima estación. Adicionalmente al cálculo del momento sísmico se calculó un factor de error multiplicativo EM_0 :

$$EM_0 = \text{antilog} \{ d.e(\log \langle M_0 \rangle) \} \quad (4)$$

De manera análoga al cálculo del promedio del momento sísmico $\langle M_0 \rangle$ y el error EM_0 , se calculó el promedio de la frecuencia de esquina $\langle F_c \rangle$ y su factor de error EF_c .

También se calculó por medio de la frecuencia de esquina, el radio de la fuente para cada estación, usando la relación de Brune [1970] para una falla circular, y su respectivo promedio:

$$r = \frac{2.34\beta}{2\pi Fe} \quad (5)$$

La caída de esfuerzo fue calculada usando el momento sísmico y radio de Brune [1970]:

$$\langle \Delta \sigma \rangle = \frac{7 \langle M_0 \rangle}{16 \langle r \rangle^3} \quad (6)$$

Quando se calculan los valores promedios del momento sísmico, frecuencia de esquina y caída de esfuerzo de mas de una estación resulta imperativo el seguir un procedimiento como el mostrado anteriormente si uno desea dar igual peso a cada observación. Si se simplifica automáticamente los momentos sísmicos promedios, frecuencias de esquina y caídas de esfuerzos, los promedios estarán inclinados hacia valores mayores. La razón es que los errores asociados con Ω , y r están distribuidos normalmente a trozos. En la tabla (1) se listan todos los datos obtenidos mediante este procedimiento. Usando la información proporcionada por las ecuaciones anteriores, se pueden deducir dos relaciones importantes, como son las del logaritmo del momento sísmico con la magnitud y con el logaritmo del radio de la falla

TABLA 1

PARAMETROS DE FUENTE

FECHA	T ORIGEN	LAT	LONG	MAG	N	$\langle \Omega_0 \rangle$	$\langle fe \rangle$	EFe	$\langle Mo \rangle$	EM	$\langle r \rangle$	$\langle \Delta \sigma \rangle$
					Est	cm.s	Hz		Dn.cm		Km	Bars
90/09/15	07:03:01.6	10°10.6'	67°04.7'	2.2	6	1.34E-3	1.526	1.04	1.94E+21	1.27	0.87	01.23
90/10/29	00:13:51.2	10°13.7'	67°32.3'	3.0	6	6.65E-3	1.143	1.00	9.46E+21	1.11	1.17	02.56
90/12/23	16:22:39.9	10°45.1'	65°41.9'	2.9	8	1.16E-2	0.967	1.00	1.66E+22	1.09	1.38	02.73
90/01/16	02:17:16.6	10°38.3'	66°56.0'	3.2	4	3.33E-2	0.953	1.01	4.73E+22	1.03	1.40	07.43
91/02/03	13:51:08.9	10°44.3'	65°26.0'	3.0	6	1.08E-2	1.973	1.09	1.54E+22	1.06	0.67	21.42
91/02/16	07:24:12.6	10°20.3'	69°14.4'	3.2	5	7.01E-3	2.280	1.01	9.96E+21	1.08	0.58	21.42
91/02/27	07:36:39.3	10°46.8'	65°41.2'	2.8	5	6.51E-3	2.114	1.01	9.31E+21	1.17	0.63	15.95
91/02/27	07:41:08.0	10°49.3'	65°41.6'	3.3	6	5.29E-2	1.925	1.00	7.53E+22	1.12	0.69	97.46
91/03/03	06:44:16.9	12°00.4'	68°20.7'	3.8	8	1.59E-2	2.768	1.01	2.19E+22	1.11	0.48	84.34
91/04/09	01:43:39.1	09°51.9'	68°34.1'	3.3	3	7.35E-4	1.548	1.00	3.87E+22	1.19	0.86	26.07
91/04/28	09:18:01.2	10°18.3'	68°53.4'	2.6	4	8.31E-3	1.917	1.00	1.19E+22	1.18	0.69	15.23
91/06/26	11:48:55.8	09°17.4'	69°53.3'	3.3	3	7.93E-3	1.550	1.01	1.15E+22	1.31	0.86	07.75
91/07/14	22:05:09.6	11°23.1'	69°02.1'	3.0	5	9.48E-3	1.759	1.03	1.35E+22	1.15	0.76	13.29
91/07/29	14:35:49.7	11°05.0'	68°15.7'	3.0	3	9.64E-3	2.508	1.03	1.38E+22	1.15	0.53	39.16
91/08/11	08:56:01.0	10°11.4'	63°46.2'	2.9	3	5.41E-3	1.915	1.02	7.69E+21	1.02	0.70	09.78
91/08/12	13:13:45.9	08°46.1'	70°16.7'	3.7	2	2.40E-2	2.132	1.01	3.42E+22	1.15	0.62	60.40
91/08/17	19:58:09.5	10°04.0'	70°01.7'	3.6	4	2.79E-2	1.734	1.01	3.97E+22	1.05	0.77	37.56
91/08/18	02:11:06.5	10°01.5'	70°01.9'	3.7	4	1.86E-2	1.734	1.00	2.66E+22	1.16	0.77	25.17
91/08/18	04:05:09.0	09°58.0'	70°01.5'	3.6	4	2.83E-2	1.724	1.01	4.17E+22	1.40	0.77	38.57
91/08/18	06:19:43.2	10°03.0'	70°03.7'	3.4	4	6.20E-3	1.358	1.00	8.79E+21	1.03	0.98	03.99
91/08/20	17:32:06.0	09°59.3'	70°00.8'	4.2	5	4.27E-2	1.934	1.00	6.10E+22	1.14	0.69	80.01
91/08/21	17:37:09.5	10°02.3'	70°01.9'	4.5	3	7.07E-2	1.765	1.00	1.01E+23	1.12	0.75	100.00
91/08/24	12:57:21.7	10°05.0'	70°03.1'	3.7	4	6.45E-3	2.891	1.00	9.29E+21	1.24	0.46	40.64
91/08/24	23:32:44.3	07°40.4'	71°50.2'	4.2	3	1.05E-1	1.322	1.01	1.50E+23	1.10	1.01	63.07
91/08/25	10:17:14.7	10°02.0'	70°00.8'	3.6	3	2.35E-2	1.366	1.01	3.36E+22	1.11	0.98	15.48
91/09/04	01:22:14.7	10°15.2'	66°39.9'	2.4	4	2.11E-3	1.358	1.04	3.07E+21	1.29	0.98	01.36
91/09/14	00:57:04.0	10°01.2'	70°02.5'	4.1	4	8.05E-2	1.561	1.01	1.14E+23	1.04	0.85	78.91
91/09/24	08:52:59.7	10°01.4'	70°04.1'	3.7	5	3.97E-2	1.589	1.01	5.70E+22	1.21	0.84	41.27
91/10/26	21:40:43.7	10°00.3'	70°01.0'	3.1	3	4.05E-2	1.562	1.00	5.75E+22	1.04	0.85	39.81
91/11/09	03:42:28.8	09°45.9'	69°57.7'	3.3	5	5.19E-2	1.370	1.01	7.40E+22	1.12	0.97	34.44
91/11/09	04:14:44.9	09°48.3'	70°00.0'	3.2	5	3.44E-2	1.170	1.02	5.03E+22	1.33	1.14	14.64
91/11/12	08:31:14.7	09°38.9'	69°19.2'	3.3	5	2.91E-2	1.358	1.00	4.15E+22	1.11	0.98	18.87
91/11/12	09:45:40.8	09°36.7'	69°20.3'	3.3	4	2.48E-2	1.420	1.06	3.56E+22	1.20	0.94	18.28
91/11/16	04:59:55.0	09°59.8'	70°04.2'	3.6	4	5.55E-2	1.543	1.01	7.88E+22	1.05	0.86	52.53
91/11/17	23:39:29.4	09°59.3'	70°04.5'	3.7	4	9.66E-2	1.358	1.00	1.37E+23	1.04	0.98	62.28
91/11/27	04:43:42.5	10°19.2'	65°20.9'	2.9	4	7.66E-3	1.543	1.01	1.09E+22	1.06	0.86	07.24
91/12/02	07:23:38.6	09°55.3'	67°57.4'	2.7	6	5.00E-3	1.562	1.00	7.11E+21	1.08	0.85	04.92
92/01/17	22:08:16.5	09°22.6'	69°34.2'	0.0	4	1.78E-2	1.548	1.01	2.53E+22	1.10	0.86	17.03
92/01/21	21:36:01.2	10°06.3'	68°01.8'	2.8	3	9.69E-3	1.366	1.01	1.37E+22	1.02	0.98	06.35
92/01/25	21:38:01.8	10°12.0'	67°48.6'	2.9	4	7.07E-3	1.358	1.00	1.00E+22	1.02	0.98	04.56

MOMENTO SISMICO Vs MAGNITUD

Para los 40 terremotos procesados, el momento sísmico M_0 fue planteado en función de la magnitud M , donde la magnitud fue tomada de los Boletines sismológicos Nacionales [Funvisis, 1990], los cuales utilizan para el cálculo de magnitud la relación de Fielder ó la relación de Ramos .

En la figura 3 se observa la distribución del logaritmo del momento sísmico para cada uno de los eventos, en función de la magnitud m_b ó $m(d)$ calculada. Se observa que a medida que aumenta la magnitud hay un aumento aproximadamente lineal en el momento sísmico. El ajuste mas conveniente es una línea recta, que viene dada por la siguiente expresión:

$$\log M_0 = (0.87 \pm 0.09)M + (19.51 \pm 0.23)$$

con $2.2 \leq M \leq 4.7$ Haciendo un despeje sencillo, de la ecuación anterior se tiene:

$$M = \frac{\text{Log}M_0 - (19.51 \pm 0.23)}{(0.87 \pm 0.09)}$$

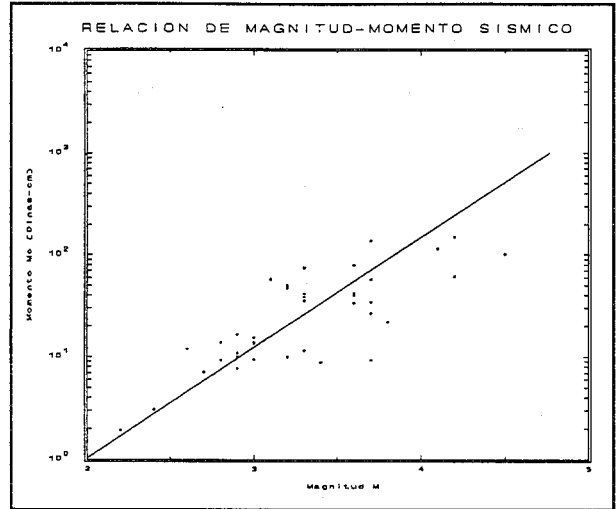


Fig 3: Momento sísmico Vs Magnitud para los 40 eventos estudiados. La línea sólida indica el mejor ajuste de los datos

MOMENTO SISMICO Vs RADIO DE LA FUENTE

De acuerdo con Hanks y Thatcher [1972], se representa en la fig 4, el momento sísmico vs el radio para esta serie de terremotos. En ellos se encuentran implícitamente ó explícitamente los siguientes parámetros: La asíntota de baja frecuencia normalizada a una distancia hipocentral de 10 Km, $\langle \Omega_0 \rangle$; frecuencia de esquina promedio $\langle F_0 \rangle$; Momento sísmico promedio $\langle M_0 \rangle$; y el promedio del radio de la fuente $\langle r \rangle$. Esto es debido a que la asíntota a baja frecuencia está relacionada directamente con el momento sísmico (ecuación 1), y la frecuencia de esquina está inversamente relacionada con el radio de la fuente (ecuación 5). En la figura 4 se observa $\langle M_0 \rangle$ Vs $\langle r \rangle$ y tres líneas que indican caída de esfuerzo constante $\langle \Delta \sigma \rangle$, las cuales fueron calculadas mediante las ecuaciones 1 y 5, las cuales asumen un plano de falla circular.

Una característica importante se aprecia claramente en esta figura, y es que los terremotos con momentos mayores de 8.0×10^{21} dn.cm, tienen caídas de esfuerzo que son generalmente constantes, mientras que para terremotos con momentos menores que 8.0×10^{21} dn.cm tienen una caída de esfuerzo que decrece con el momento. Prácticamente $\Delta \sigma$ oscila entre 1 y 10 MPa (1MPa= 10 Bares)

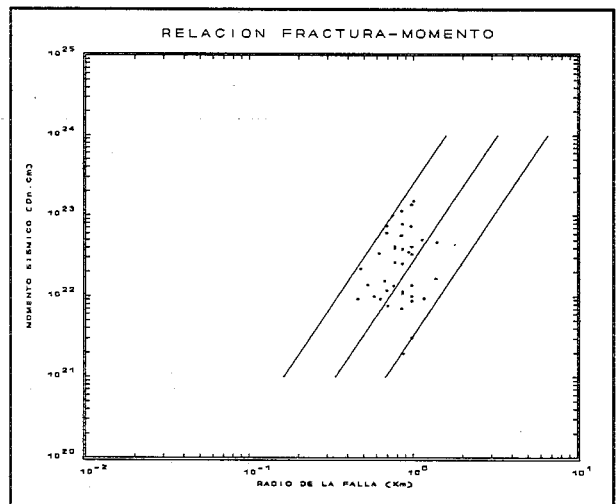


Fig 4: Momento sísmico Vs radio de la fuente, indicando las líneas de caída de esfuerzos constante

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La secuencia de terremotos estudiados provee de excelentes datos para estudiar los parámetros de fuentes sísmicas. Los terremotos analizados en este trabajo se expanden hasta tres ordenes de magnitud en momento sísmico. Del gráfico del momento sísmico contra el radio de la fuente (figura 4) se observa un aumento de sismos a partir de 7×10^{21} dinas-cm, mientras que hay una tendencia a disminuir los sismos para momentos sísmicos menores de 7×10^{21} dinas-cm. La causa directa para este resultado, es la caída de esfuerzos para terremotos con momentos sísmicos menores a 7×10^{21} dinas-cm. Se puede decir que para radios mayores, las caídas de esfuerzos son menores. También se observa que esta distribución de sismos se encuentran mayormente entre 10 y 100 bares para momentos sísmicos superiores a 10^{22} dinas-cm, lo cual coincide con los resultados de miles de terremotos procesados por otros autores

La posibilidad para calcular la magnitud de un sismo por medio del análisis espectral del registro de éste, es una de las razones por las que el método resulta importante. Utilizando la gráfica de momento sísmico Vs magnitud se pudo hacer el ajuste mas conveniente para obtener una expresión que permita el cálculo de la magnitud partiendo de el valor del momento sísmico (obtenido de la lectura de la parte plana del espectro de amplitud).

Se puede decir que el modelo simple de la falla circular utilizado en este estudio, no es sino una primera aproximación, un modelo medio de lo que ocurre realmente en el terremoto. Esto porque se sabe que, para frecuencias mayores que la frecuencia de corte del instrumento, todos los terremotos producen señales compuestas de varios impulsos que los hacen ser muy complejos, ya que las longitudes de ondas de estas frecuencias serían mas pequeñas que la dimensión física de la falla.

También hay que considerar que la ruptura no es suave y continua, sino que varía y es heterogénea en el espacio. Es decir que en la falla se producen grandes impulsos de radiación cuando es sometida a una fuerte tensión antes de ocurrir el sismo (llamadas asperezas), mientras que otros lugares de la falla ofrecen resistencia a la ruptura (llamadas barreras). Estos modelos de Barreras y Asperezas fueron propuestos por Das y Aki en 1977 y por Kanamori en 1978 sucesivamente. Por lo tanto los espectros de amplitudes en lugar de parecerse a la señal teórica simple, presentan una serie de impulsos como los mostrados en la figura 2. También se puede decir que la complejidad de estos registros es debido a que las señales de período corto muestran las variaciones rápidas del proceso de ruptura en la fuente.

BIBLIOGRAFIA

- ARCHULETA, R. CRANSWICK, E. MUELLER, C. SPUDICH, P., 1982. Source Parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, Earthquake Sequences, Journal of Geophysical Research, Vol 87, No. B6, pages 4595-4607, June 10.
- BRUNE JAMES., 1970. Tectonic Stress and the Spectra of Siesmic Shear Waves from Earthquake. Journal of Geophysical Researt, Vol 75, No. 26, pp 4997-5009 September 10.
- FUNVISIS., 1990. Boletín Sismológico de Venezuela. Vol 7 No. 3, 4 1991 Vol 8 No. 1, 2, 3, 4. 1992 Vol 9 No. 1
- MADARIAGA, RAUL., 1976. Dynamics of an Expanding Circular Fault. Bolletin of the Seismological Society of America, Vol 66, No. 3, pp. 639-638, June.
- MENAHAM, B. ROSENMAN, M AND HARKRIDER, D., 1970. Fast Evaluation of Source Parameters from Isolated Surface-Waves Signals. Part I. Universal Tables. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 60, No. 4, pp. 1337-1387, August.
- MENDOZA, J - MORGAN, D (1985). Basic Hypo A Basic Language Hypocenter Location Program User's Guide. Stanford University Publication, Geological Sciences, Volumen XIX. United State of America.
- MENDOZA, JORGE., 1992. XPLOT Manual del Usuario Versión 4.03-C 1986-1992. FUNVISIS.
- RAMOS, CESAR Y MENDOZA, JORGE., 1991. Relación Vp/Vs para Venezuela y Zonas adyacentes. Boletín Sismológico de Venezuela. Vol 8 No. 2 Abril - Junio.
- THATCHER, W AND HANKS, T., 1973. Source Parameters of Southern California Earthquake. Journal of Geophysical Research, Vol 78, No. 35, December 10.