

Comúnmente la caracterización de movimientos fuertes en un determinado sitio se logra utilizando parámetros simples como la magnitud del sismo y la distancia a la falla. Con estos parámetros se determina la amplitud y la duración del movimiento usando variedad de métodos estadísticos.

Dentro de las escalas de magnitud que conocemos actualmente, la magnitud local ML introducida por *Richter (1935)*, tiene una relación directa con la parte de la sismología dedicada a los movimientos fuertes del suelo. La magnitud ML se evalúa a distancias cortas desde la fuente sísmica. Al corresponder a movimientos medidos a distancias relativamente pequeñas a las trazas en superficie de las fallas, o a distancias hipocentrales o epicentrales cortas, esta magnitud está mas relacionada con la intensidad de la agitación del suelo, y por lo tanto del daño producido, que las otras magnitudes. Magnitudes determinadas a distancias telesísmicas, como son la mb y la MS, proporcionan una medida del tamaño de un terremoto en el campo lejano. MS se mide a partir de ondas superficiales de periodos de aproximadamente 20 segundos. En cambio ML, la magnitud local, es una medida del tamaño de un terremoto, determinada para periodos cortos y a distancias relativamente pequeñas, a partir de registros de un sismógrafo de torsión *Wood-Anderson*.

Otras escalas de magnitud como la magnitud de onda superficial MS, no están relacionado con el rango de frecuencias que interesa a la ingeniería, aunque representan otras características importantes del sismo como la dimensión de la falla y la duración del movimiento fuerte.

ANALISIS

El motivo que nos llevó a realizar esta investigación es la necesidad de determinar el tamaño de sismos fuertes a partir de datos a distancias cortas e intermedias de la fuente y el poder proporcionar un procedimiento simplificado que permita una determinación rápida de la magnitud local a partir de movimientos fuertes del suelo, aprovechando los registros de aceleración con que cuenta el Observatorio Sismológico del Quindío y la Red Nacional de Acelerógrafos (RNAC).

Kanamori³ y Jennings⁴ (1978) demostraron que la magnitud local ML se puede determinar muy fiablemente a partir de acelerogramas. Propusieron un procedimiento para determinar la magnitud local realizando una integración de las ecuaciones del movimiento de un sismógrafo *Wood-Anderson* sometidas a una aceleración dada. Con este fin, los registros de los acelerógrafos se introducen en las ecuaciones del movimiento de los sismógrafos de torsión *Wood-Anderson* para producir sismogramas sintéticos que pueden ser analizados de forma convencional. Kanamori y Jennings aplicaron este método a 14 registros del terremoto de San Fernando de 1971 y obtuvieron una magnitud local promedio de 6.3, que está de acuerdo con el valor

² Director de Tesis

³ Division of Geological and Planetary Sciences – California Institute of Technology

⁴ Earthquake Engineering Research Laboratory – California Institute of Technology

obtenido previamente usando los sismogramas de los instrumentos *Wood-Anderson*. De esta forma extendieron las medidas de ML para movimientos del suelo de altos niveles de deformaciones. Estos tipos de sismogramas de *Wood-Anderson* generados artificialmente resulta de mucha utilidad en la interpretación sismológica de los patrones de ondas.

Espinosa en 1989 realizó un estudio de la determinación de la magnitud local ML a partir de acelerogramas de movimiento fuerte del suelo similar al desarrollado por Richter (1935, 1958). El método adoptado en el estudio fue proponer una expresión empírica para la determinación de la magnitud local ML a partir de las aceleraciones horizontales del movimiento fuerte del suelo.

Ya sea que se usen directamente sismogramas de instrumentos *Wood-Anderson*, o se usen sismogramas sintéticos, la base del cálculo de la magnitud ML de la máxima respuesta del *Wood-Anderson* es la curva de atenuación de amplitud (en función de la distancia) hecha por Richter (1935) para un evento patrón. Sin embargo, la curva de Richter (1935) solo está hecha para distancias hipocentrales mayores a 25 kilómetros; para distancias menores los instrumentos *Wood-Anderson* se salen de escala en eventos de magnitud ML mayor a 4,5. Estas medidas de amplitud no son confiables para estos tipos de eventos que tienen gran importancia ingenieril. Esta es una de las razones de usar datos acelerográficos en los estudios anteriores.

METODOLOGIA

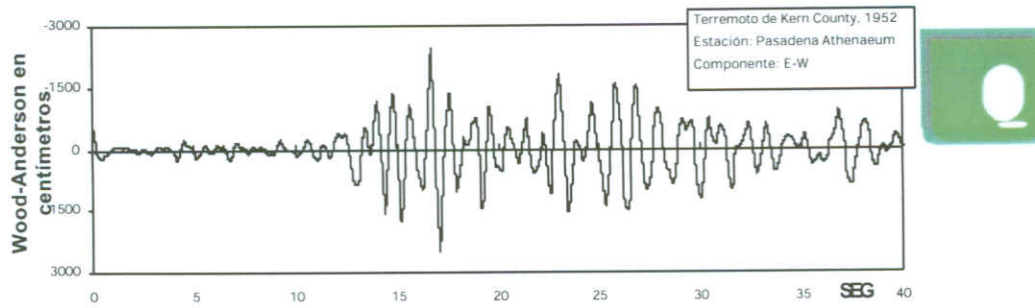
La primera etapa del proyecto fue el estudio del sismógrafo *Wood-Anderson* y los artículos publicados por Richter en 1935 y 1958 en donde explica la filosofía original de su escala instrumental de magnitudes, y la metodología original para lograrla. Además de artículos posteriores que confirman la validez del procedimiento usado en esta investigación.

Seguidamente se trabajó en la generación de los sismogramas sintéticos del tipo *Wood-Anderson* mediante la integración de la ecuación de movimiento del instrumento, la cual mostramos a continuación, suministrada por el Prof. Paul C. Jennings¹:

$$\ddot{x} + 2\omega\zeta\dot{x} + \omega^2 x = -a(t)$$

En la cual $a(t)$ es la aceleración, $\omega = 2\pi/T$ es la frecuencia natural en radianes por segundo, ζ es la fracción del amortiguamiento crítico y x es la respuesta del instrumento.

Si $a(t)$ se reemplaza por una aceleración constante de una unidad (1mm/seg) la respuesta estática es $1/\omega^2$, en milímetros. La amplificación estática de 2800 significa que la respuesta que se observa en el registro es 2800 veces mayor, debido a la amplificación mecánica y electrónica. Entonces para obtener la respuesta



Wood-Anderson, se calcula x de la ecuación anterior, se expresa x en milímetros y se multiplica por 2800. El registro que resulta se lee entonces como si fuera un sismograma regular.

Para integrar la anterior ecuación diferencial de equilibrio, se pueden utilizar algoritmos como las integrales de convolución o de *Duhamel*, o los de *Runge-Kutta*.

Para realizar esta integración, el *Prof. Hugo Monsalve Jaramillo* desarrollo dos programas de computador en lenguaje *FORTRAN*, para resolver la ecuación por *Duhamel* y por *Runge-Kutta*. Aunque ambos resultados fueron satisfactorios y muy similares, se escogió el segundo por ser un poco más exacto.

$$x(t) = \frac{1}{\omega \sqrt{1-\zeta^2}} \int_0^t a(\tau) e^{-\zeta(t-\tau)} \sin\{\sqrt{1-\zeta^2} \omega(t-\tau)\} d\tau$$

Integral de convolución o Duhamel para un sistema amortiguado con excitación arbitraria en la base.

Para confirmar si los resultados del programa son correctos, comparamos los nuestros con los publicados por *Kanamori* y *Jennings* en su artículo "*Determination of Local Magnitude, ML, from Strong-Motion Accelerograms*" (1978). La figura 1 muestra un ejemplo de un acelerograma de un sismo bien conocido, la respuesta sintetizada por *Kanamori* y *Jennings*, y la sintetizada con nuestro programa.

Figura 1a



Teniendo la certeza de poder transformar registros de aceleración en respuestas *Wood-Anderson*, contamos con la información suficiente en la Red Nacional de Acelerógrafos, para realizar un procedimiento similar al que hizo Richter en California en 1932, pero aplicado a nuestro ambiente geo-tectónico.

Richter formó su escala de magnitud basado en los registros de 21 sismos superficiales ocurridos en California. De igual manera se tuvo en cuenta solo los sismos superficiales para lograr una escala con las mismas características.

“Para derivar tal escala, un grupo representativo de eventos (de Enero, 1932) fueron cuidadosamente estudiados, y el logaritmo de la amplitud registrada en cada caso fue graficado contra la distancia epicentral. Y, para cada evento, se dibujaron curvas a través de dichos puntos, y se notó que las curvas eran aproximadamente paralelas como lo requiere la teoría de amplitudes proporcionales. Estas curvas fueron entonces combinadas en una sola paralela a las individuales y que pasa a través de un punto seleccionado arbitrariamente. De esta curva se leyeron los valores numéricos presentados en la Tabla 1.

La Tabla 1 corresponde al logaritmo (en base 10) de la amplitud en milímetros que registraría el sismómetro standard de torsión de periodo-corto en un sismo de magnitud standard a diferentes distancias: fue escogido que la amplitud registrada a una distancia epicentral de 100 kilómetros sea 0.001 milímetros (1 micrón).”
Richter 1935.

Este fragmento explica claramente el procedimiento sencillo que Richter siguió para crear la tabla de atenuación que es bien conocida y no vamos a transcribir en este resumen.

En general, la metodología utilizada en este proyecto fue la misma creada por Richter, adicionando una correlación que calcule la magnitud local mas directamente a partir de los valores de máxima aceleración.

DATOS

En los comienzos del proyecto se contó con un registrador *PS2 KINOMETRICS* configurado con las características de un sismómetro *Wood-Anderson* durante un periodo de seis meses, pero durante ese periodo no se presentaron eventos de magnitud apreciable que nos dieran registros adecuados que sirvieran para la construcción de la escala; además de incertidumbres generadas en la configuración del registrador.

Se requirieron entonces los registros de aceleración proporcionados por las estaciones acelerográficas de la Red Sísmica Nacional RSNC, desde sus inicios en 1993 hasta la fecha de inicio de este proyecto Noviembre del 2001. Hasta esa fecha la Red contaba con registros de aproximadamente 530 eventos entre superficiales y profundos, de los cuales se seleccionaron 40 sismos superficiales que contaran con al menos registros de tres estaciones sobre roca para poder elaborar las curvas de atenuación. De estos 40 con solo 17 se pudieron trazar curvas de la manera que Richter lo explicó. En la Tabla 1 se enumeran los eventos utilizados.

PRIMER SIMPOSIO COLOMBIANO DE SISMOLOGIA
“Avances de la Sismología en los últimos veinte años”
Bogotá, Octubre 9-10-11 de 2002



Posgrado de Geofísica
Departamento de Geociencias

FECHA	HORA	UBICACION	MAGN RSNC	PROF	LATITU D	LONGITU D	# ESTAC.
07-Feb-94	12:50	Bolivar (Antioquia)	4,7	0	5,96	-75,99	5
19-Ene-95	15:04	Tauramena (Casanare)	6,5	25	5,01	-72,95	11
04-Jun-95	17:41	Sn.Juan Rioseco (C/marca)	4,8	8	4,87	-74,61	6
16-Dic-95	14:02	Libano (Tolima)	4,2	2	5,13	-75,09	4
11-Jun-96	16:58	Zaragoza (Antioquia)	5,7	0	7,36	-74,52	3
11-Ago-96	12:26	Salazar (Norte S/der)	4	0	7,82	-72,83	4
02-Feb-98	14:22	Guaduas (C/marca)	5	0	4,46	-74,6	6
06-Mar-98	09:36	Landázuri (Santander)	5,4	0	6,3	-73,9	10
08-Mar-98	04:58	Cimitarra (Santander)	5,5	0	6,27	-73,89	12
25-Ene-99	18:19	Sismo del Quindío	6,2	0	4,41	-75,72	23
25-Ene-99	23:41	Córdoba (Quindío)	5,8	0	4,41	-75,74	12
25-Feb-99	15:39	Córdoba (Quindío)	4,35	16	4,38	-75,67	3
15-May-99	10:19	Pulí (C/marca)	4,82	19	4,67	-74,75	7
01-Jun-99	21:42	Guayabetal (C/marca)	5,21	0	4,29	-73,26	6
17-Jul-99	12:23	Sativasur (Boyacá)	5,59	0	6,1	-72,74	6
25-Ago-99	17:03	Chaguaní (C/marca)	4,14	9	4,97	-74,67	7
04-Feb-00	15:10	Córdoba (Quindío)	3,77	0	4,45	-75,71	3

Tabla 1. Listado de eventos utilizados en la elaboración de la curva de atenuación.

RESULTADOS

El primer resultado de este proyecto es el elaborar una tabla o curva de atenuación por el mismo procedimiento utilizado en la definición original de la escala y obtener los valores de magnitud local ML de los 17 eventos que fueron estudiados. La ecuación que representa este calculo es:

$$ML = \text{Log}_{10} A - \text{Log}_{10} A_0 (\Delta) \quad (1)$$

Donde A es la amplitud registrada en el sismograma sintético y $-\text{Log}_{10} A_0$ es un valor numérico que depende de la distancia y se encuentra en la Tabla 2.

En segundo lugar se propone una expresión empírica para la determinación de la magnitud local ML a partir de las aceleraciones horizontales del suelo de la forma:

$$ML = \text{Log}_{10} A_{ace} + 1,091 \text{Ln } \Delta - 0,1443 \quad (2)$$