

DETERMINACION DE LA MAGNITUD LOCAL A PARTIR DE ACELEROGRAMAS: TERREMOTO DE LIMON

Roberto Ramirez & Robert Laurent

Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica

ABSTRACT: This study shows the rapid calculation of the Local Magnitude of the Earthquake of Limón, based on accelerograms from the Strong Ground Motion Measurement Program of the Seismic Engineering, Laboratory of the University of Costa Rica.

The Local Magnitud is a measure of the size of an earthquake, determined for short periods and at rather close distances. This parameter is one of interest for the seismic-resistand engineering, and it is also used in seismic zoning studies.

The Local Magnitude of the seism of Limón, measured from the acclerographics records, is 7.24 ± 0.20 standar deviation units.

The attenuation ratio of this earthquake shows peak horizontal acceleration values out of the acceptable range, as is the case of the stations of Cartago, Carlos Monge Library (University of Costa Rica), Alajuela and San Ramón. This behaviour is possibly due to the stations being located on soft soils, which causes an amplification effect on seismic waves.

RESUMEN: Este trabajo presenta el cálculo rápido de la Magnitud Local del Sismo de Limón, a partir de acelerogramas del Programa de Medición de Sismos Fuertes del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica.

La Magnitud Local es una medida del tamaño de un terremoto, determinada para períodos cortos y a distancias relativamente pequeñas. Este parámetro es de interés para la ingeniería sísmo-resistente y además se emplea en estudios de zonificación sísmica.

La Magnitud Local del Sismo del Limón, medida a partir de los registros acelerográficos es $7,24 \pm 0,20$ unidades de desviación estandar.

La relación de atenuación de este sismo muestra valores de aceleraciones horizontales pico fuera del rango aceptable, como en los casos de las estaciones de Cartago, Biblioteca Carlos Monge Alfaro (Universidad de Costa Rica), Alajuela y San Ramón. Este comportamiento posiblemente se debe a la ubicación de las estaciones sobre suelos blandos, lo que provoca un efecto amplificador de la señal sísmica.

INTRODUCCION

El evento sísmico ocurrió a las 15:56 hora local (21:56 GMT) (Tabla 1), se ubicó aproximadamente a 40 km al suroeste de Puerto Limón y su profundidad fue de 23,5 km según la Red Sismológica Nacional (1991). El sismo se originó

en una falla inversa la cual forma parte de la extensión hacia Costa Rica del Cinturón Deformado de Panamá (Rojas, 1991).

Astorga et al. (1990) sugieren la existencia de un estilo estructural denominado Sistema de Falla Transcurrente de Costa Rica, que constituye una zona límite que divide a Costa Rica en dos bloques,

uno norte y otro sur. El Terremoto de Limón y la sismicidad asociada ocurrieron al extremo este de esa zona límite.

Tabla 1
Parametros de la fuente sismica

Fecha:	25 de abril de 1991
Hora:	21:56:00 (15:56 tiempo local)
Latitud:	09°36,60 N
Longitud:	83°10,20 W
Profundidad:	23,5 km
Magnitud M_L :	6,6
Fuente de información:	Red Sismológica Nacional, 1991

Daños importantes, incluido el colapso de muchas viviendas y otras edificaciones ocurrieron en las poblaciones como La Suiza y Moravia de Chirripó, Turrialba en la Provincia de Cartago, así como en Batán, Matina, Puerto Limón, Valle la Estrella, Penhurst, Cahuita, Puerto Viejo, Uatsi, Daytonia y Sixaola en la Provincia de Limón. En las zonas de topografía bajas y arenosas se encontraron fenómenos de licuefacción. Otras estructuras afectadas son las instalaciones de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), Fertilizantes de Centroamérica (FERTICA) y en los Muelles del Puerto de Limón. En esta ciudad colapsó totalmente la única estructura de concreto reforzado de varios niveles (Santana et al., 1991).

DAÑOS EN LA INFRAESTRUCTURA

El sísmo provocó graves daños en las provincias de Limón y Cartago, Costa Rica, y en las provincias de Bocas del Toro, Panamá.

En Costa Rica las zonas más afectadas están ubicadas sobre formaciones superficiales de origen aluvial a lo largo de la Costa Atlántica.

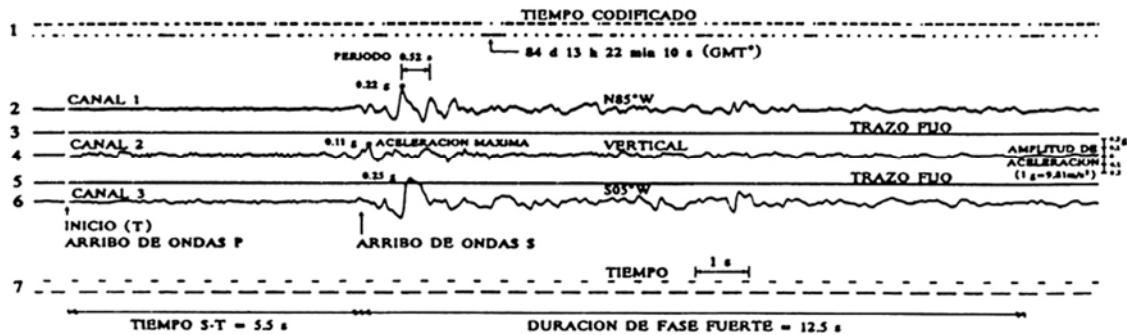
METODOLOGIA PARA EL CALCULO DE LA MAGNITUD LOCAL

La determinación de la escala de magnitud local a partir de los registros de amplitudes es muy importante para definir diseños sísmicos, períodos naturales de vibración de estructuras, así como para realizar estudios de riesgo, zonificación sísmica y riesgos geológicos (Espinosa, 1993).

GUIA PARA LA LECTURA E INTERPRETACION DE ACELEROGRAMAS

SISMO DE COBANO
25 de marzo, 1990
13:22:55 GMT
 $M_s = 7.0$

Estación: PTS
Hospital Monseñor Sanabria
Puntarenas
Distancia epicentral 49 km



ACELEROGRAMA TIPICO

Fig. 1: Gráfico para la interpretación de acelerogramas (LIS, 1990)

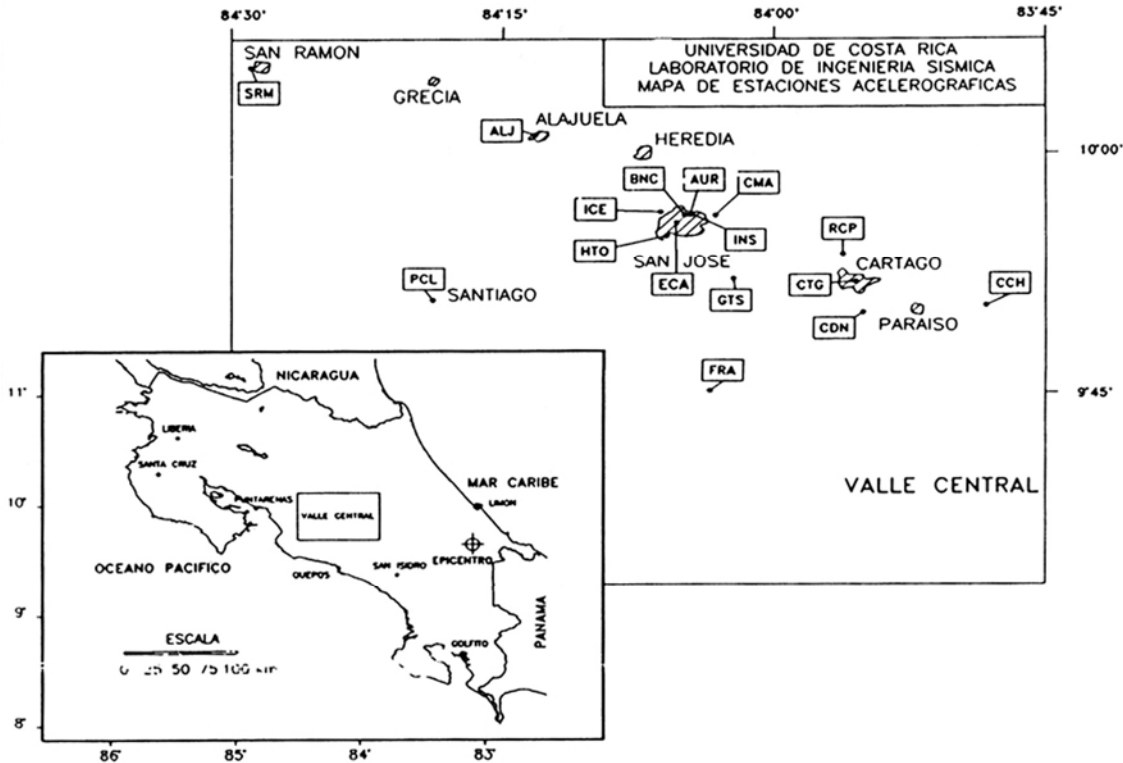


Fig. 2: Ubicación de estaciones acelerográficas del Laboratorio de Ingeniería Sísmica - UCR y localización del sismo del 22 de abril de 1991.

La M_L es una medida del tamaño de un terremoto, determinada para períodos cortos y a distancias pequeñas, obtenidas en los registros de sismógrafos de torsión Wood-Anderson (Richter, 1958).

Richter propone la ecuación:

$$M_L = \log A_{cc} - \log A_0(\Delta) \quad (1)$$

donde A_{cc} es la amplitud registrada en un sismógrafo estándar de torsión Wood-Anderson y A_0 es el factor de amplitud (dependiente de la distancia).

Espinosa (1993) propone la expresión empírica para la determinación de la magnitud local a partir de las aceleraciones horizontales del movimiento fuerte del suelo de la forma:

$$M_L = \log(A_{cc}) - \log A_1(\Delta) \quad (2)$$

donde A_{cc} es la amplitud registrada de (cero al máximo valor) por un acelerógrafo en cm/s^2 para

un terremoto a una distancia dada, A_1 es el factor de amplitud deducido empíricamente y que depende de la distancia. Esta ecuación solo es aplicable a registros de acelerógrafos de componente horizontal.

La diferencia entre estas ecuaciones es que la magnitud propuesta por Richter está dada para movimientos del suelo correspondientes a bajos niveles de deformación, la segunda es una medida en cm/s^2 de fuertes agitaciones del suelo correspondiente a niveles altos de deformaciones.

Según Espinosa (1993) el método aplicado permite evaluar la magnitud local de terremotos grandes y destructivos a partir de datos del área de máxima intensidad, sin que se presente saturación en los instrumentos de medición.

La distancia más recomendable para el cálculo de la magnitud local (M_L) es la menor a la traza de falla, sin embargo ese dato en ocasiones es desconocido, por lo que se emplea la distancia epicentral, hipocentral y áreas de replicas.

Tabla 2

Estaciones del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (modificado de Santana et al., 1990)

Nombre, código y descripción de estación acelerográfica	Tipo de Suelo y Geología	Coordenadas geográficas
Santa Cruz, STC	Blando	10,2878
Sede Regional UCR	Sedimentos	
Concreto reforzado	aluviales recientes	85,6422
Liberia, LIB	Rocoso	10,6167
Sede Regional UCR	Sedimentos	
Concreto reforzado, 2 pisos	aluviales recientes	85,4603
Alajuela, ALJ	Blando	10,0186
CIPET (Antiguo Cuartel)	Depósitos volcánicos	
Concreto reforzado	cuaternarios	84,2200
San Ramón, SRM	Blando	10,0877
Sede Regional UCR	Sedimentos	
Concreto reforzado	cuaternarios	84,4824
Puriscal, PCL	Blando	09,8481
Estación de Bomberos, Santiago	Materiales volcánicos	
Concreto reforzado, 2 pisos	terciarios	84,3144
San José, Edificio ICE, ICE	Firme	09,9403
Edificio Central del ICE	Depósitos volcánicos	
Concreto reforzado, 15 pisos	cuaternarios	84,1046
San José - Hatillo, HTO	Blando	09,9160
Clínica Solón Núñez, CCSS	Sedimentos	
Concreto reforzado	aluviales recientes	84,0987
San José - Banco Nacional, BNC	Firme	09,9370
Edificio del Banco Nacional	Depósitos volcánicos	
Concreto reforzado, 20 piso	cuaternarios	84,0823
San José - Hotel Aurola, AUR	Firme	09,9376
Edificio Hotel Aurola	Depósitos volcánicos	
Acero y concreto reforzado, 17 pisos	cuaternarios	84,0775
San José - INS, INS	Firme	09,9383
Edificio INS	Depósitos volcánicos	
Concreto reforzado, 14 pisos	cuaternarios	84,0753
Golfito, GLF	Rocoso	08,6447
Hospital CCSS	Depósitos volcánicos	
Estructura metálica, 2 pisos	cretácicos	83,1719
San José - Biblioteca UCR, CMA	Blando	09,9370
Edificio Biblioteca Carlos Monge	Depósitos volcánicos	
Concreto reforzado, 4 pisos	cuaternarios	84,0540
San José - Guatuso, GTS	Rocoso	09,8703
Escuela primaria de Guatuso, Patarrá	Sedimentos	
Acero y elementos prefabricados	terciario	84,0375
Frailles, FRA	Rocoso	09,8957
Escuela primaria de Frailles de Desamparados, Madera	Rocas meteorizados del Terciario	84,0584
Puntarenas, PTS	Blando	09,9767
Hospital Monseñor Sanabria	Sedimentos costeros	
Concreto reforzado, 10 pisos	cuaternarios	84,7506

Tabla 2 (continuación)

RECOPE, RCP	Firme	09,9403
Plantel de RECOPE en Ochomongo	Depósitos volcánicos	
Cartago, Campo libre	cuaternarios	84,1046
Cartago, CTG	Blando	09,8672
Parque Central	Sedimentos aluviales	
Campo libre	recientes	83,9253
Ciudad de los Niños, CDN	Rocoso	09,8350
Aguacaliente de Cartago	Sedimentos	
Instalación en campo libre	terciarios	83,9183
Cachi, CCH	Rocoso	09,8422
Túnel de exploración en flanco sur de represa, Proyecto Cachí	Materiales volcánicas	
Instalación en roca	terciarios	83,8053
San Isidro, ISD	Firme	09,3736
Edificio INS	Sedimentos	
Concreto reforzado, 2 pisos	terciarios	83,7075
Limón, LIM	Rocoso	09,9856
Sede Regional UCR	Sedimentos	
Estructura de Acero y elementos prefabricados, 1 piso	cuaternarios	83,0631
Quepos, QPS	Rocoso	09,4311
Centro de Salud	Sedimentos	
Mamposría reforzada	terciarios	84,1663
Escuela Católica Activa, ECA	Firme	09,9333
Escuela Católica Activa	Sedimentos	
Campo libre	terciarios	84,0947
Tecnológico, TEC*	Blando	09,8589
Instituto Tecnológico de Costa Rica	Sedimentos aluviales	
Campo libre	recientes	83,9128

Abreviaturas:

CCSS:	Caja Costarricense de Seguro Social
CIPET:	Centro de Investigaciones y Perfeccionamiento para la Enseñanza Técnica
ICE:	Instituto Costarricense de Electricidad
INS:	Instituto Nacional de Seguros
RECOPE:	Refinadora Costarricense de Petróleo
UCR:	Universidad de Costa Rica

* La estación TEC no se encuentra activa desde enero de 1990

Metodología

1. Conocer la distancia: a) a la falla, b) al epicentro, c) al hipocentro, d) al centro de la fractura y e) al centro de las replicas.
2. Medir la amplitud máxima en milímetros o centímetros para cada movimiento fuerte del suelo en los acelerogramas y dividir estas

amplitudes por el correspondiente factor de amplificación del instrumento (en mm/g o cm/g). Para convertir estas magnitudes en cm/s², estas se multiplican por 980 cm/s² (Fig.1).

3. De La ecuación 1 se toma el logaritmo en base 10 y se añade el valor correspondiente de $-\log_{10} A_1 (\Delta)$ de acuerdo con la corrección por distancia.

Con este estudio se pretende presentar un procedimiento simplificado que permita una rápida y exacta determinación de M_L para terremotos grandes y moderados a distancias cortas del epicentro.

Las fuentes de datos son: los datos de movimientos fuertes del suelo, Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (ver mapas de ubicación de las estaciones), los informes mensuales de la Red Sismológica Nacional y el Observatorio Volcanológico y Sismológico de la Universidad Nacional en el período 1990-1992.

REGISTROS DE ACELERACIONES

El programa de Medición de Sismos Fuertes del Laboratorio de Ingeniería Sísmica mantiene una Red de Acelerógrafos en todo el país, con énfasis en el Valle Central (Fig.2). Esta distribución ha sido modificada después de la actividad sísmica 90-93, con la incorporación de estaciones como: Limón, Ciudad de los Niños (Cartago) y Escuela Católica Activa (San José), estas dos últimas digitales.

En la Tabla 2 se presenta una descripción detallada de las estaciones del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, el cual incluye las

Tabla 3
Magnitud local determinada a partir de aceleraciones horizontales máximas, medidas en instrumentos de movimientos fuertes para el Terremoto de Limón.

ESTACION	Δ (km) Dist. epicentral	ORIENT	A_{cc} cm/s ²	M_L (A_{cc})	PROM.
ISD	73,10	0	179,0	7,15	7,09
		270	149,0	7,03	
CCH	80,45	0	149,0	7,16	7,05
		270	89,0	6,94	
CTG	93,85	0	265,0	7,54	7,50
		270	219,0	7,46	
GTS	105,84	0	107,0	7,26	7,13
		270	58,0	7,00	
CMA	109,56	92,5	160,0	7,47	7,51
		2,5	192,0	7,55	
GLF	11,17	0	55,7	7,03	7,0
		270	40,0	6,88	
AUR-G	112,02	0	74,0	7,16	7,15
		270	58,0	7,05	
BNC-G	112,52	262	80,0	7,19	7,17
		172	70,0	7,14	
HTO	113,60	0	122,0	7,39	7,33
		270	93,0	7,27	
ICE	114,97	285	78,0	7,02	7,16
		195	97,0	7,30	
QPS	119,27	0	38,0	6,92	6,89
		270	33,0	6,86	
ALJ	129,65	0	114,0	7,49	7,43
		270	88,0	7,37	
PCL	135,04	0	88,0	7,40	7,35
		270	67,0	7,29	
SRM	159,33	0	96,0	7,61	7,6
		270	83,0	7,55	

características de la estructura, suelo y la ubicación geográfica.

En la Tabla 3 muestra el resumen de aceleraciones máximas (valores pico) en las dos componentes horizontales del movimiento para los registros obtenidos a nivel del terreno. Estos valores deben ser considerados como preliminares, sujetos a variaciones una vez que los acelerogramas han sido digitalizados, corregidos y filtrados. En esta tabla las estaciones están ordenadas por distancia epicentral creciente.

Debido a que el sismo ocurrió a poca profundidad no existe una diferencia considerable entre la distancia hipocentral y epicentral para el cálculo de la magnitud local.

En todos los registros se observa una duración del sismo cercana a un minuto y una fase fuerte alrededor de 25 segundos (Santana et al., 1991).

El valor máximo de aceleración pico horizontal es 0,27% g, fue registrado en el Parque Central de la Ciudad de Cartago (Estación CTG), a pesar de que no es la más cercana al epicentro. Este sector de la ciudad se encuentra en suelo blando y corresponde a depósitos cuaternarios provenientes de ríos, volcanes y deslizamientos, generalmente con espesores de hasta 30 m.

CURVAS DE ATENUACION DE LA ESCALA DE MAGNITUD LOCAL

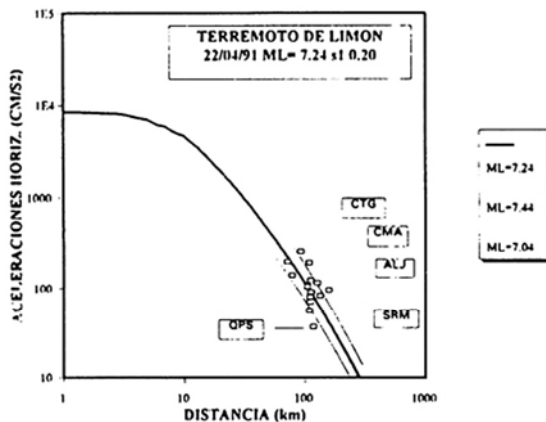


Fig. 3: Comparación de la atenuación media de las aceleraciones horizontales en cm/s^2 en función de la distancia epicentral en kilómetros. La línea continua del centro representa la curva para un terremoto de $M_L = 7.2$. Las curvas paralelas representan una desviación estándar de la media 0,20 unidades de M_L (Ramírez, 1993)

Tabla 4
Comparación de la magnitud M_L y M_s con Observatorios Sismológicos Mundiales

Estación Día	RSN M_L	USGS BRK M_s	NORSAR M_s	M_L en este estudio	
22/04/91	6,6	7,6	7,4	6,7	7,24 ± 0,20

RSN: Red Sismológica Nacional

USGS: Servicio Geológico de los Estados

Unidos

BRK: Berkeley, California

NORSAR: Royal Norwegian Council

CALCULO DE LA MAGNITUD LOCAL DEL TERREMOTO DE LIMON

La magnitud local para este terremoto es de $7,24 \pm 0,20$ determinadas a partir de 13 estaciones acelerográficas (Tabla 3). En este caso, para calcular la magnitud local se utilizó la distancia epicentral, ya que no existieron rupturas en superficie o fallas bien identificadas en las proximidades del epicentro.

Los datos de aceleraciones horizontales máximas están representados en la curva de atenuación teórica con una desviación estándar de 0.20 unidades de M_L (Fig.3).

La relación de atenuación propuesta en este trabajo subestima los datos de aceleraciones pico del Terremoto de Limón del 22 de abril de 1991. Esta característica se observa en las estaciones acelerográficas: Cartago (CTG), Biblioteca Carlos Monge Alfaro, San José (CMA), Alajuela (ALJ) y San Ramón (SRM), donde los movimientos del terreno fueron amplificados por la vibración de los estratos blandos, que componen dichas ciudades, los que son sensibles a períodos de (0.7-1.5 s) (Figs. 4 y 5).

Estos períodos se basan en el cálculo del espectro de respuesta, definido como la respuesta máxima de un sistema amortiguado de un grado de libertad con diferentes períodos ante determinada sollicitación dinámica.

Las figuras 4 y 5 sirven para caracterizar el movimiento del suelo en función del período o la frecuencia (para valor de amortiguamiento cero) y la respuesta máxima de cualquier sistema de un grado de libertad.

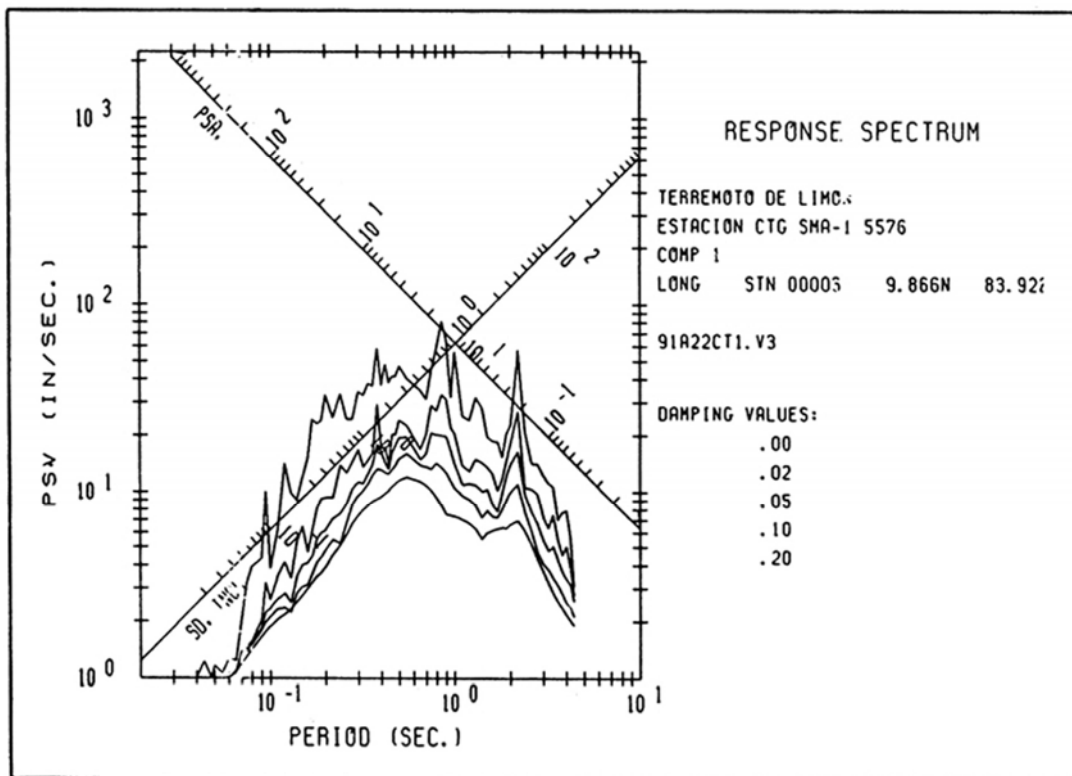
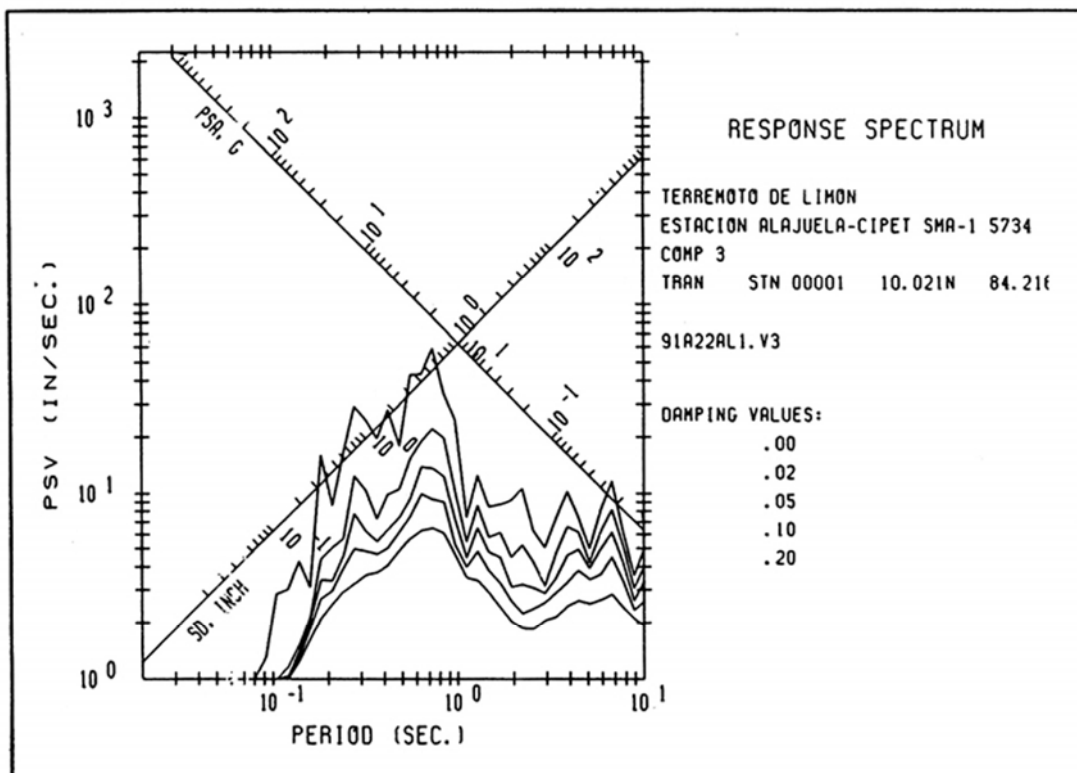


Fig. 4: Espectro de respuesta de las estaciones Alajuela (ALJ) y Cartago (CGT).

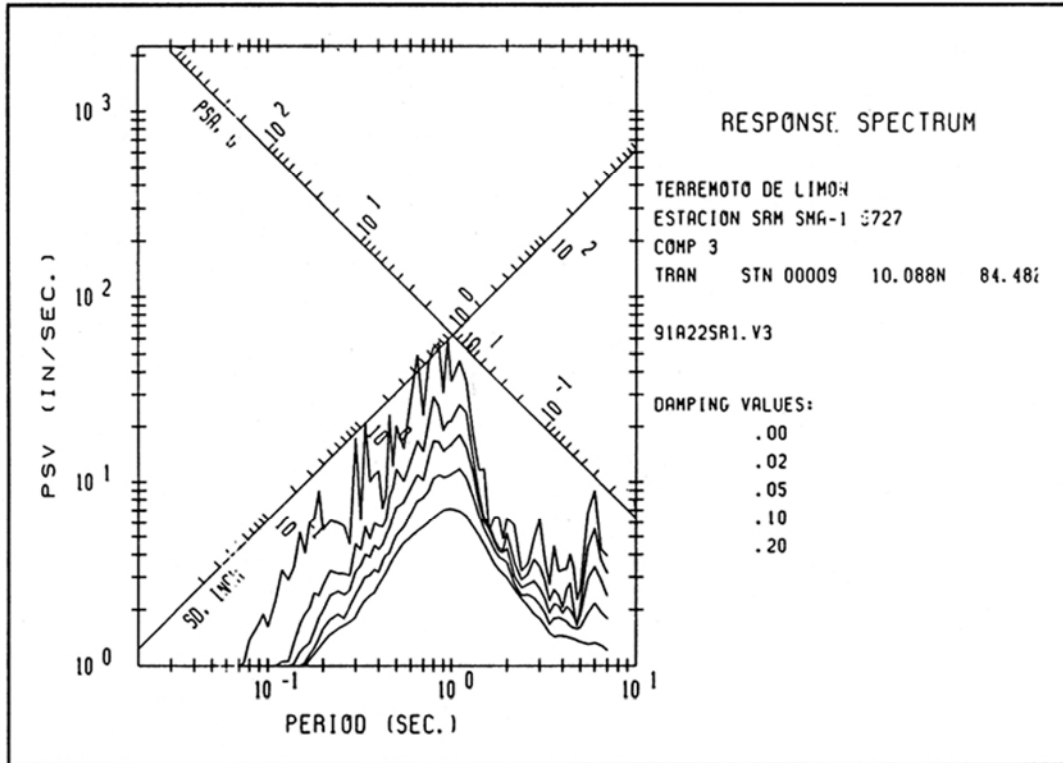
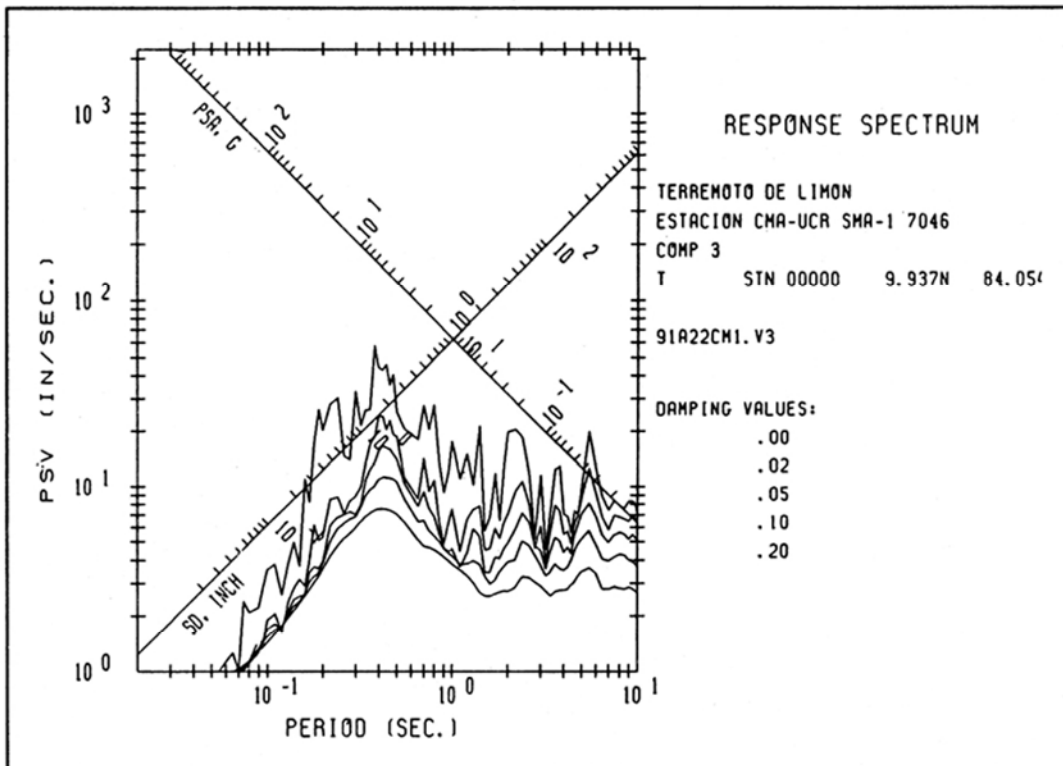


Fig. 5: Espectro de respuesta de las estaciones Biblioteca - UCR (CMA) y San Ramón (SRM).

Un ejemplo de la comparación entre las magnitudes M_L y M_s puede verse en los datos obtenidos del Terremoto de Limón (Tabla 4). En el caso de Costa Rica la magnitud calculada por la Red Sismológica Nacional se encuentra muy por debajo en comparación con la obtenida en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica, debido a la saturación de los instrumentos de medición de la red. Por otro lado las redes mundiales basan su dato en señales sísmica para el campo lejano, por lo que no reflejan una medida fiel del tamaño del sismo, como lo puede ser la Magnitud local registrada por sismógrafos sin saturación instrumental.

CONCLUSIONES

- Para evitar el problema de la saturación de la magnitud local debida a las limitaciones del rango dinámico de los sismógrafos de Torsión Wood Anderson se usan los datos de los acelerogramas conjuntamente con la ecuación (1).
- Las magnitudes determinadas a distancias telesísmicas con la M_b y M_s proporcionan una media del tamaño del terremoto en el campo lejano, en cambio la magnitud local es una medida para períodos cortos y distancias relativamente pequeñas, tomando en cuenta el rango de frecuencias que son de interés para el ingeniero, arquitecto, consultor, planificador urbano, además de estudios de riesgo sísmico e investigación.
- Al aplicar el procedimiento descrito en este trabajo para el Sismo del 22 de abril de 1991, se obtiene una magnitud local de $7,24 \pm 0,20$, la cual se considera la medida más real del tamaño de este terremoto.
- La curva teórica de atenuación del Terremoto de Limón subestima las aceleraciones pico debido posiblemente al efecto amplificador de la señal sísmica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Ingrid Vargas Azofeifa, Johnny Alvarado, Adalberto Ramírez, William Brenes,

Carlos Segura y Alfredo González por su colaboración en la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- Astorga, A.; Fernández, J. A.; Barboza, G.; Campos, L.; Obando, J.; Aguilar, A. & Obando, L. G., 1991: Cuencas Sedimentarias de Costa Rica. Evolución geodinámica y potencial de hidrocarburos. - *Rev. Geol. América Central*, **13**: 25-59.
- Espinosa, A. F.; 1993: Determinación de la Magnitud local M_L a partir de Acelerogramas de Movimientos Fuertes del Suelo. - *Memorias Taller de Predicción Sísmica*. Escuela Centroamericana de Geología, San José, Costa Rica.
- _____; 1980: Attenuation of strong horizontal ground accelerations in the Western United States. - *Bull. Seism. Soc. Am.* **70**: 583-616.
- Gutiérrez, J. et al.; 1982: Código Sísmico de Costa Rica. - Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago.
- Hudson, D. E.; 1979: Reading and Interpreting Strong Motion Acelerograms. - *Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California*. 111 págs.
- Montero, W., Boschini, I. & Rojas, W.; 1991: El Terremoto de Cóbano, Costa Rica, 25 de marzo de 1990. - En Barquero, R. & Boschini, I. (eds.): La crisis sísmica del Golfo de Nicoya y eventos sísmicos relacionados, Costa Rica, 1990. Red Sismológica Nacional (ICE-UCR). 162 págs.
- OVSICORI, 1990-1993: Informes Preliminares de la Actividad Sísmica. Observatorio Volcanológico y Sismológico de Costa Rica. Universidad Nacional. OVSICORI-UNA.
- RSN, 1990-1993: Informes Preliminares de la Actividad Sísmica. Red Sismológica Nacional. RSN-ICE.
- Richter, C. F.; 1958: Elementary Seismology. San Francisco 483 págs.
- Rojas, W.; 1991: El Terremoto del 22 de abril de 1991, en la región Caribe y la sismicidad asociada en el mes de abril, 1991. - Red Sismológica Nacional (ICE-UCR). 56 págs.
- Santana, G., Vargas, W., Matamoros, A., Segura, C. & Ramírez, A.; 1990: Sismo de Cóbano -25 de marzo de 1990- Efectos sobre suelos y edificaciones. - Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 193 págs.
- Santana, G., Vargas, W., Sancho, V., Segura, C., Ramírez, A. & Sibaja, J.; 1991: Registros de Aceleraciones del Terremoto de Limón, 22 de Abril de 1991. - Reporte INII 58-91. Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 48 págs.