

# Caracterización del Movimiento Fuerte del Suelo Generado por Los Sismos de 2001.

Las redes acelerométricas instaladas en El Salvador al momento de los terremotos de 2001 eran tres: la de LAGEO S.A. de C.V. (LAGEO), la de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”(UCA), la del Centro de Investigaciones Geotécnicas (CIG), y la de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL).

Antes del 13 de enero de 2001 la base de datos acelerográficos de El Salvador contaba con apenas 200 registros. Sólo la actividad de 2001 generó más de 450 registros. Este incremento relativo es considerable, lo que sugiere la tarea de reexaminar las características del movimiento fuerte producido por los sismos de subducción y de cadena volcánica.

Este capítulo presenta los resultados de una evaluación de movimientos fuertes basada en los datos acelerométricos registrados en 2001.

## ANTECEDENTES DE REGISTRO ACCELEROMÉTRICO EN EL SALVADOR

En El Salvador, el primer registro acelerométrico data de 1965. En los 15 años siguientes, el banco de datos sólo aumentó en unos 25 registros. Para entonces, los instrumentos instalados eran del tipo AR-240 y Montana. En la década de los ochenta, el monitoreo sísmico con acelerómetros fue renovado con la instalación de nuevos instrumentos analógicos del tipo SMA-1; al final de la década de 1980 se había logrado tener menos de 100 registros.

En ese tiempo, la única red disponible en el país era operada por el CIG.

Para la siguiente década de 1990, el registro de movimientos fuertes contó con la incorporación de dos nuevas redes.

En 1996, LAGEO y la Universidad Centroamérica “José Simeón Cañas” UCA, ya contaban con redes operadas por sistemas e instrumentos digitales del tipo SSA-2. Al final de la década de los noventa, el banco de datos acelerográficos para El Salvador contaba ya con alrededor de 200 registros, casi la mitad de ellos provenientes de instrumentos digitales.

A razón de los terremotos de 2001 y de sus series de réplicas, operaron en total 31 estaciones acelerométricas: 19 del CIG, 10 de la UCA y 2 de LAGEO. Estas produjeron en su conjunto 479 registros de 188 sismos. La sección siguiente describe las características generales de estos registros.

## DESCRIPCIÓN DE REGISTROS DE 2001

La caracterización de los registros de los terremotos de enero y febrero de 2001 inicia con la presentación y una descripción de las estaciones de registro, en lo referente a su distribución espacial como a las condiciones particulares de sitio relativas a la geología y el relieve del terreno. Luego se describen de manera general los datos registrados en cuanto a su origen y rangos de magnitudes y de distancias a la fuente sísmica.

## RED DE ESTACIONES ACCELEROMÉTRICAS

La figura 3.1 muestra la red de 31 estaciones acelerométricas que registraron sismos durante 2001.

Al momento de la eventualidad sísmica se constaba con 12 instrumentos digitales tipo SSA-2 (39% del total) y 19 equipos analógicos del tipo SMA-1 (61%).

La mayoría de estaciones (87%) estaba concentrada a lo largo de la cadena volcánica central; la costa y la parte norte del país estaban cubiertos únicamente con cuatro instrumentos, dejando sin cobertura suficiente el registro a distancias cortas de sismos provenientes de las fuentes de subducción superficial e intermedia (al sur), y de la depresión de Honduras (al norte del país).

A lo largo del territorio nacional, (de Este a Oeste), la zona central del país agrupaba el 55% de instrumentos, mientras que en las zonas occidental, para-central y oriental se repartían el resto a partes aproximadamente iguales (16%, 13%, y 16%, respectivamente). Esta concentración de aparatos en la cadena central del país, se explica por la coincidencia geográfica de los principales centros urbanos en las ciudades de San Salvador, Soyapango, Santa Ana, y San Miguel.

La localización del Área Metropolitana de San Salvador, que incluye a los dos municipios más poblados del país (San Salvador y Soyapango), proporciona una explicación del por qué el alto porcentaje de instrumentos en los departamentos de la zona central.

La tabla 3.1 contiene el listado de estaciones con su correspondiente código, institución propietaria, coordenadas geográficas y tipo de instrumento. La tabla 3.2 presenta la geología de cada estación con base al mapa geológico 1:15,000 de San Salvador, y al 1:500,000 de la República de El Salvador.

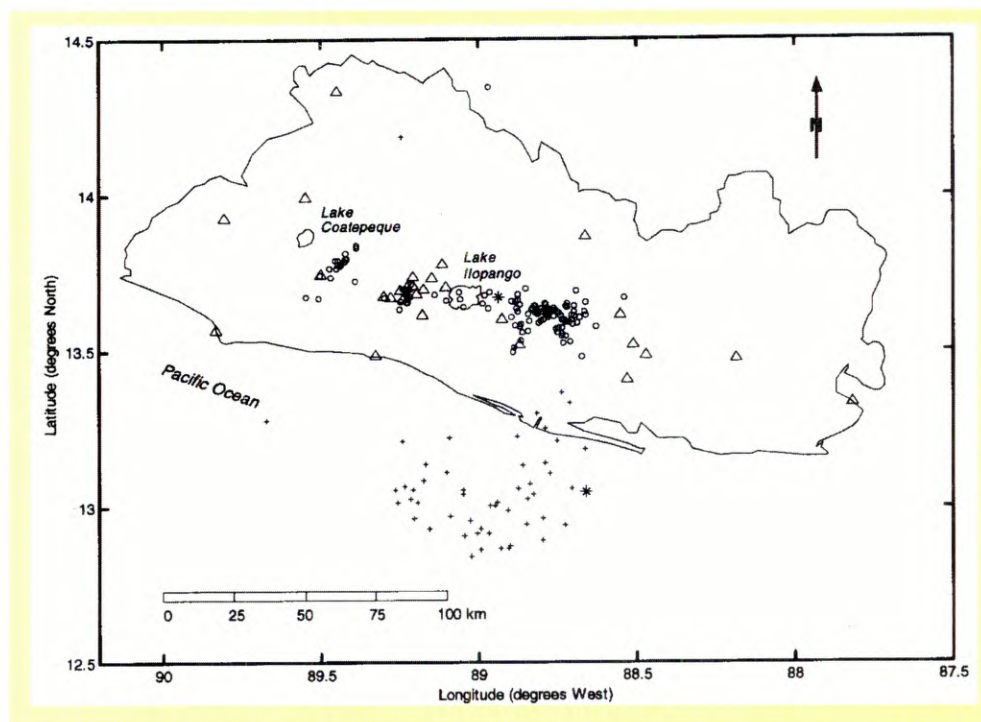


Figura 3.1. Mapa de El Salvador con epicentros de eventos que produjeron registros de movimientos fuertes durante 2001 y las correspondientes estaciones de registro. Cruces: sismos de subducción. Circulos: sismos de corteza superficial. Asteriscos: sismo del 13 de enero (al sur) y del 13 de febrero (al norte). Triángulos: estaciones que registraron al menos un evento durante 2001. (Cepeda et al., 2004)

**Tabla 3.1**

### Características de las estaciones acelerométricas

Código	Descripción	Propietario	Latitud (grados norte)	Longitud (grados oeste)	Instrumento
AH	Ahuachapán	CIG	13.925	89.805	SMA-1
AR	Armenia	UCA	13.744	89.501	SSA-2
BA	San Bartolo	UCA	13.704	89.106	SSA-2
BE	Berlín	LAGEO	13.497	88.529	SSA-2
CA	CEPA, Acajutla	CIG	13.567	89.833	SMA-1
CI	Centro de Investigaciones Geotécnicas, San Salvador	CIG	13.698	89.173	SMA-1
CM	CESSA, Metapán	CIG	14.333	89.450	SMA-1
CU	Cutuco	CIG	13.333	87.817	SMA-1
DB	Ciudadela Don Bosco, Soyapango	CIG	13.733	89.150	SMA-1
EX	Externado, San Salvador	UCA	13.707	89.207	SSA-2
LI	La Libertad	UCA	13.486	89.327	SSA-2
MG	San Miguel	CIG	13.475	88.183	SMA-1
NO	San Pedro Nonualco	UCA	13.602	88.927	SSA-2
OB	Observatorio, San Salvador	CIG	13.681	89.198	SMA-1
PA	Panchimalco	UCA	13.614	89.179	SSA-2
QC	Presa "15 de septiembre" (nivel cero)	CIG	13.616	88.550	SMA-1
RF	Relaciones Exteriores (fondo de pozo)	CIG	13.692	89.250	SMA-1
RS	Relaciones Exteriores (superficie)	CIG	13.692	89.250	SMA-1
SA	Santa Ana	CIG	13.992	89.550	SMA-1
SE	Sensuntepeque	CIG	13.867	88.663	SMA-1
SM	Santiago de María	CIG	13.486	88.471	SMA-1
SS	Seminario "San José de La Montaña" (superficie), San Salvador	CIG	13.705	89.225	SMA-1
ST	Santa Tecla	CIG	13.675	89.300	SMA-1
TE	Hospital San Rafael, Santa Tecla	UCA	13.671	89.279	SSA-2
TO	Tonacatepeque	UCA	13.778	89.114	SSA-2
TR	Planta Boca Pozo (TR-9), Berlín	LAGEO	13.520	88.512	SSA-2
UC	Universidad Centroamericana, Antiguo Cuscatlán	CIG	13.677	89.236	SMA-1
VF	Viveros de DUA (fondo de pozo), San Salvador	CIG	13.737	89.209	SMA-1
VI	San Vicente	UCA	13.642	88.784	SSA-2
VS	Viveros de DUA (superficie), San Salvador	CIG	13.737	89.209	SMA-1
ZA	Zacatecoluca	UCA	13.517	88.869	SSA-2

Tabla 3.2

**Geología de estaciones y número de registros por estación**

Código	Geología§	Descripción	Registros de subducción	Registros de corteza superficial	Sitio NEHRP
AH	s3	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café") *	1	N.D.	D
AR	s3	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café") *	28	23	D
BA	s4	Piroclastitas ácidas ("tierra blanca") *	20	17	D
BE	s2	Efusivas andesíticas y basálticas: piroclastitas *	N.D.	1	D
CA	b1	Epiclastitas volcánicas, piroclastitas, flujos de lava *	1	N.D.	Roca
CI	s5a	Lavas basálticas y andesíticas, predominantemente del volcán de San Salvador #	N.D.	2	Roca
CM	Qf	Aluvión, localmente con piroclastitas l	1	N.D.	Roca
CU	c3	Efusivas andesíticas - basálticas *	1	N.D.	Roca
DB	s4	Piroclastitas ácidas ("tierra blanca"), pobremente consolidadas #	1	2	D
EX	s4	Piroclastitas ácidas ("tierra blanca"), pobremente consolidadas #	17	16	D
LI	Qf	Aluvión, localmente con piroclastitas l	29	5	C
MG	s3	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café") *	1	N.D.	C
NO	c1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, tobas soldadas *	33	4	D
OB	s4	Piroclastitas ácidas ("tierra blanca"), pobremente consolidadas #	1	2	D
PA	c1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, tobas soldadas *	8	10	Roca
QC	b3	Efusivas andesíticas - basálticas *	1	1	Roca
RF	s3a	"Tobas color café", localmente con cenizas y escoria #	1	1	C
RS	s3a	"Tobas color café", localmente con cenizas y escoria #	1	1	D
SA	s3	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café") *	1	N.D.	D
SE	b1	Epiclastitas volcánicas, piroclastitas, flujos de lava *	1	N.D.	Roca
SM	s3	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café") *	1	N.D.	D
SS	s4	Piroclastitas ácidas ("tierra blanca"), pobremente consolidadas #	1	1	D
ST	s3	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café") *	1	1	D
TE	s2	Efusivas andesíticas y basálticas: piroclastitas *	29	13	C
TO	c1	Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas, tobas soldadas *	24	23	D
TR	s2	Efusivas andesíticas y basálticas: piroclastitas *	1	N.D.	D
UC	s3a	"Tobas color café", localmente con cenizas y escoria #	N.D.	2	D
VF	s4	Piroclastitas ácidas ("tierra blanca"), pobremente consolidadas #	N.D.	2	C
VI	s4	Piroclastitas ácidas ("tierra blanca") *	21	65	D
VS	s4	Piroclastitas ácidas ("tierra blanca"), pobremente consolidadas #	1	2	D
ZA	b1	Epiclastitas volcánicas, piroclastitas, flujos de lava *	28	31	Roca
Total	N.A.	N.A.	254	225	N.A.

**Notas:**

N.D. = no hay datos.

N.A. = no aplicable.

§ = símbolos usados en el mapa geológico de El Salvador.

\* = Obtenido del mapa geológico de El Salvador 1:500,000.

# = Obtenido del mapa geológico de San Salvador 1:15,000.

C = Tipo de suelo C de acuerdo al NEHRP.

D = Tipo de suelo D de acuerdo al NEHRP.

Tabla 3.3

**Resumen de las características de la base de datos de 2001**

Tipo de evento	Número de sismos	Registros en sitio D	Registros en sitio C	Registros en roca	Total	M <sub>min</sub>	M <sub>max</sub>	h <sub>min</sub> (Km)	h <sub>max</sub> (Km)	r <sub>min</sub> (Km)	r <sub>max</sub> (Km)
Subducción	61	153	60	41	254	2.8	7.7	26.1	111.8	57.5 *	190.2 *
Corteza superficial	127	160	21	44	225	2.4	6.6	1.9	26.4	0.4 #	102.8 #
Total	188	313	81	85	479	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

**Notas:**

Minh = magnitud de momento mínima.

Mmax = magnitud de momento máxima.

hmin = profundidad focal mínima.

hmax = profundidad focal máxima.

rmin = mínima distancia a la ruptura.

rmax = máxima distancia a la ruptura.

\* = distancia al plano de ruptura para eventos de magnitudes grandes o distancia hipocentral para eventos pequeños y moderados.

# = distancia horizontal a la proyección de la ruptura en la superficie para eventos de magnitudes grandes o distancia epicentral para eventos pequeños y moderados.

N.A. = no aplica.

## DATOS REGISTRADOS

Los datos acelerográficos obtenidos durante 2001 suman un total de 479 registros de 188 sismos. Los sismos originados en la subducción (61 eventos) dieron origen a 254 registros, mientras que los de corteza superficial (127) generaron 225 acelerogramas. Del total de registros, 32 (7%) fueron obtenidos en aparatos analógicos, y 447 (93%) en instrumentos digitales. La distribución de registros por estaciones se presenta en la tabla 3.2.

Las características de la base de datos conformada por todos los registros están resumidas en la tabla 3.3 de acuerdo a la fuente sísmica que produjo el evento asociado, a la clase simplificada de geología y a los rangos de magnitudes y distancias atendiendo a los parámetros focales de los sismos.

Con vistas a clasificar los sitios de acuerdo a su geología y en una forma que permita la manipulación directa para un posterior análisis de atenuación (que se presenta en la siguiente sección), aquí se tipificaron las estaciones, atendiendo a lo establecido por el Programa Nacional de Reducción de Amenaza Sísmica de los Estados Unidos, NEHRP, (Dobry et al., 2000).

La clasificación, conforme a este esquema, se presenta en la última columna de la tabla 3.2, y el resumen de la distribución de datos según la clase de suelo se presenta en las columnas 3, 4 y 5 de la tabla 3.3. Estas clases de sitio se deberían calcular tomando el promedio de la velocidad de ondas de corte en los primeros 30 metros desde la superficie (FEMA, 1997). Los sitios de roca son los que tienen velocidades promedio en el rango de 760 a un mil 500 m/s, mientras que los sitios C y D se identifican con suelos muy densos, y suelos duros, con intervalos de velocidades de 360 a 760 m/s, y de 180 a 360 m/s, respectivamente.

Como la información geotécnica disponible para las estaciones es muy limitada para poder realizar las asignaciones de clases de sitio, se utilizaron procedimientos indirectos en algunos de los casos. En las estaciones RS, SS y VS se contaba con perfiles de número de golpes de SPT (Standard Penetration Test), el cual se empleó para correlacionar empíricamente con la velocidad de ondas de corte.

En las estaciones CI y UC (tabla 3.1) los perfiles de velocidades se obtuvieron de los estudios realizados y presentados por Italtেকna-Italconsult (1987). Sólo en las cinco estaciones anteriores fue posible clasificar directamente conforme al NEHRP.

En las 26 estaciones restantes (98% de registros), se asignó la clase de sitio en forma indirecta combinando los siguientes indicadores: la geología superficial indicada por los mapas geológicos, las velocidades de ondas de corte reportadas para diferentes materiales volcánicos en El Salvador según Italtেকna-Italconsult (1987) y, la distribución de residuos en cada estación observada en un análisis de atenuación preliminar que suponen condiciones uniformes de sitio en todas las estaciones.

Este último indicador sólo fue posible aplicarlo en las estaciones de la UCA porque el número de registros era suficientemente significativo en términos estadísticos. De acuerdo al resumen de base presentado en la tabla 3.3, todo indica que las características de la información acelerográfica disponible permiten abarcar un amplio rango de magnitudes y distancias para las que se pueden generar estimaciones de parámetros de movimiento del terreno.

Sin embargo, la figura 3.2, que muestra la distribución magnitud-distancia de los datos, indica claramente que existen vacíos de información en los rangos de magnitudes de 5.9 a 7.6, para registros de subducción, y de 5.4 a 6.5 para acelerogramas obtenidos de eventos de corteza superficial.

Estas brechas en los rangos de magnitud indicados se deben atribuir, en parte, a la corta ventana temporal de la base; pues el periodo de recurrencia de los valores de magnitud ausentes resulta ser mayor al periodo comprendido por los datos.

No contar con la información completa tiene consecuencias directas en la metodología de trabajo usada para obtener ecuaciones de atenuación para la predicción del movimiento fuerte, tal y como se explica en la sección siguiente.

En las tablas 3.4 y 3.5 se anotan los valores de aceleraciones y velocidades pico para los registros correspondientes a los terremotos del 13 de enero y del 13 de febrero de 2001, respectivamente. Además se presentan los valores de ordenadas espectrales para periodos de 0.3 s y 1 s. Estos últimos valores son útiles para la obtención de espectros de diseño conforme a algunas de las más recientes normativas de evaluación de cargas sísmicas (FEMA, 1997).

Las figuras 3.3 y 3.4 muestran las historias temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento en la dirección Norte-Sur para algunas de las estaciones de registro de los terremotos de enero y febrero de 2001.

Finalmente, la figura 3.5 muestra los espectros de respuesta correspondientes a las estaciones y componentes presentados en las figuras 3.3 y 3.4. En particular, las formas espectrales de las estaciones LI, BA, y TO (tabla 3.1) presentan semejanzas en ambos terremotos, lo que indica que los periodos predominantes en los espectros se identifican con las frecuencias predominantes del terreno. En el caso de LI, la máxima respuesta a un periodo de 0.2 segundos se ha logrado ver desde los primeros registros de la estación en su primer año de funcionamiento (Bommer et al., 1997).

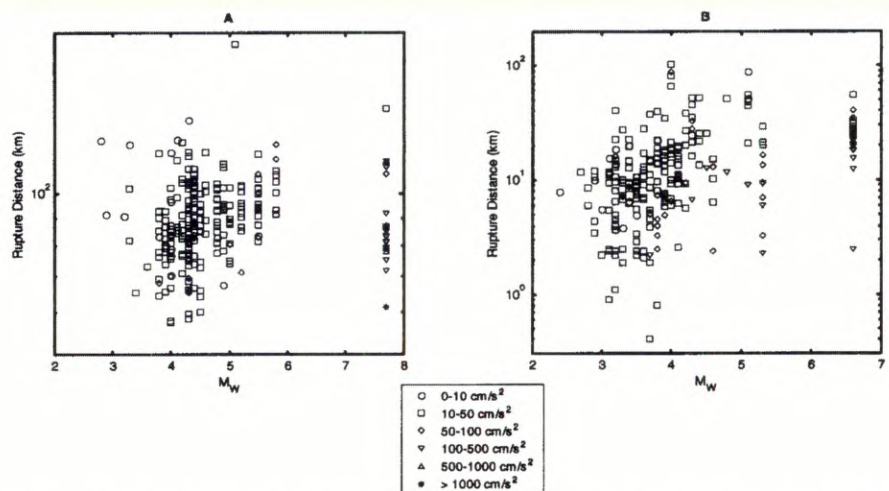


Figura 3.2. Distribución magnitud-distancia para (A) registros de sismos de subducción y (B) registros de sismos de corteza superficial. Cada tipo de marcador (ver recuadro al centro) representa un rango de aceleración máxima horizontal. El eje vertical es distancia hipocentral en (A), y distancia epicentral en (B), excepto para los sismos del 13 de enero, y del 13 de febrero, donde se define como distancia a la ruptura.

**Tabla 3.4**

**Registros del sismo del 13 de enero de 2001. Valores pico**

Código	Distancia a la ruptura (Km)	Norte		Sur		Vertical		Este		Oeste	
		PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	PSA T=0.3 s (cm/s <sup>2</sup> )	PSA T=1 s (cm/s <sup>2</sup> )	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	PSA T=0.3 s (cm/s <sup>2</sup> )	PSAT=1 s (cm/s <sup>2</sup> )
LI	61.3	1092	53.2	1290	285	604	15.9	564	35.5	958	237
ZA	72.0	255	12.3	362	140	247	8.6	305	19.1	410	229
PA	75.4	173	9.2	223	174	87	7.3	151	9.4	182	111
SM	77.7	864	27.8	1607	350	432	16.1	702	40.4	2011	415
NO	78.9	569	37.5	1063	402	430	18.2	479	26.4	1789	319
TE	79.2	486	57.0	1103	385	239	18.5	477	34.2	1112	389
TR	79.4	453	18.6	1017	163	235	18.0	364	24.2	1279	220
ST	79.4	588	60.5	1119	514	464	21.6	761	43.3	2570	343
RF	81.0	204	19.5	476	233	184	13.9	205	16.6	470	251
RS	81.0	317	27.6	1207	280	323	15.3	298	22.9	1026	268
OB	81.4	420	38.4	1096	555	301	13.0	372	26.2	1052	507
SS	83.2	267	15.0	544	211	157	11.3	247	20.3	656	330
EX	83.7	295	25.4	962	441	151	11.9	273	17.4	584	394
BA	85.2	154	25.2	615	491	163	15.2	195	31.2	485	454
CA	86.5	106	18.6	209	282	49	4.2	96	14.6	226	183
VS	86.5	301	21.9	N.D.	N.D.	207	12.5	306	37.3	N.D.	N.D.
DB	87.1	221	23.2	473	523	157	11.3	245	19.2	502	183
QC	87.2	149	23.5	365	209	120	10.2	183	16.0	574	163
AR	87.3	589	49.6	751	1050	219	19.6	445	53.3	1183	657
MG	91.9	118	12.1	215	252	88	6.0	133	12.8	204	225
TO	92.0	258	23.1	594	424	201	9.8	230	23.2	611	208
SE	108.7	81	8.5	213	115	57	6.2	60	9.1	190	71
SA	112.1	133	19.5	373	407	50	6.2	84	13.6	169	175
CU	113.6	76	13.8	205	100	62	4.0	78	8.6	179	149
AH	114.8	210	16.6	335	335	121	10.8	143	14.9	318	324
CM	144.1	14	1.7	23	18	N.D.	N.D.	12	2.2	21	25

Notas:  
 Distancia a la ruptura = distancia al plano de ruptura.  
 PGA = aceleración máxima horizontal.  
 PGV = velocidad máxima horizontal.

PSA = seudo aceleración espectral.  
 T = período.  
 N.D. = no hay datos.

**Tabla 3.5**

**Registros del sismo del 13 de febrero de 2001. Valores pico**

Código	Distancia a la ruptura (Km)	Norte		Sur		Vertical		Este		Oeste	
		PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	PSVT=0.3 s (cm/s)	PSVT=1 s (cm/s)	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGV (cm/s)	PSVT=0.3 s (cm/s)	PSVT=1 s (cm/s)
VI	2.5	425	14.6	25.7	8.2	229	4.0	232	6.2	17.7	4.9
BA	12.5	104	25.6	16.2	41.1	121	6.9	139	22.3	18.7	45.6
ZA	15.5	400	20.0	33.9	44.4	257	9.8	296	20.5	35.9	24.7
TO	18.0	238	30	29.9	77.6	235	10.6	246	24.6	33.2	28.5
DB	18.2	98	14.8	13.0	17.3	54	4.6	92	12.2	14.1	21.4
CI	19.3	135	19.9	8.6	10.1	58	3.8	69	8.4	10.4	25.8
PA	20.2	182	7.5	11.3	7.4	44	2.2	105	4.6	6.1	5.0
OB	21.7	105	6.7	12.5	22.6	67	3.3	102	13.9	13.7	10.1
EX	23.1	121	15.2	9.0	19.1	51	2.7	97	6.1	9.9	8.3
VF	24.3	40	3.1	3.3	11.4	31	2.9	39	7.2	2.4	7.9
VS	24.3	76	8.2	5.8	9.0	45	3.5	58	8.7	7.5	14.5
SS	24.9	64	5.7	5.6	11.5	43	2.6	70	10.8	6.0	4.9
UC	25.7	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	39	2.1	57	8.5	8.4	14.5
RF	26.2	42	3.7	4.2	6.9	26	1.8	42	7.4	4.2	7.3
RS	26.2	57	3.9	6.8	8.3	34	2.2	62	8.1	7.5	6.5
QC	27.4	19	6.4	3.9	4.6	17	2.4	26	5.0	2.9	3.9
TE	30.3	46	6.4	2.8	8.7	22	2.0	40	4.8	3.4	6.1
ST	32.6	38	6.4	2.8	7.0	19	2.2	41	7.4	3.2	11.2
BE	34.3	32	4.4	5.3	5.8	30	2.3	70	6.8	6.4	10.9
LI	40.5	90	4.5	12.5	3.7	35	2.4	92	5.0	5.8	3.4
AR	55.1	28	3.2	3.5	4.4	26	1.3	36	1.9	2.7	4.2

Notas:  
 Distancia a la ruptura = distancia al plano de ruptura.  
 PGA = aceleración máxima horizontal.  
 PGV = velocidad máxima horizontal.

PSA = seudo aceleración espectral.  
 T = período.  
 N.D. = no hay datos.

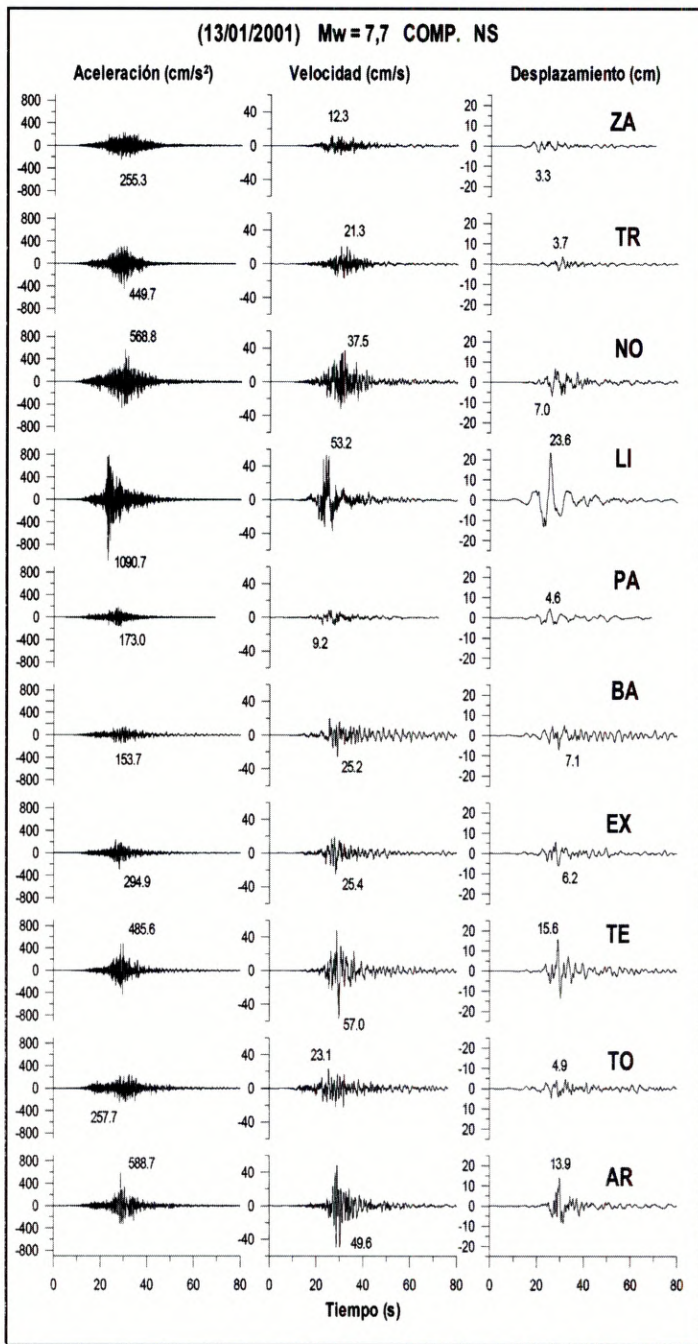


Figura 3.3. Historias temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento en la dirección Norte-Sur obtenidas del procesamiento de una selección de registros para el sismo del 13 de enero de 2001. Adaptado de López Casado et al. (2001).

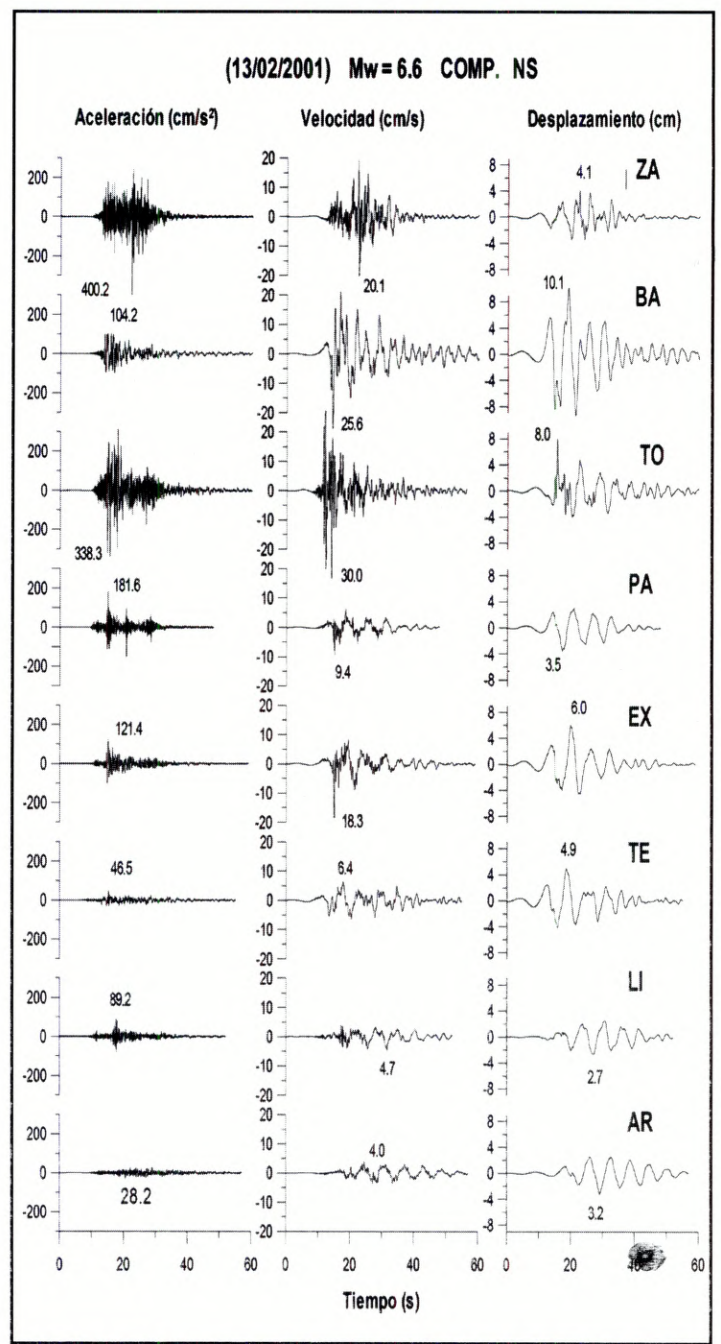


Figura 3.4. Historias temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento en la dirección Norte-Sur obtenidas del procesamiento de una selección de registros para el sismo del 13 de febrero de 2001. Adaptado de López Casado et al. (2001).

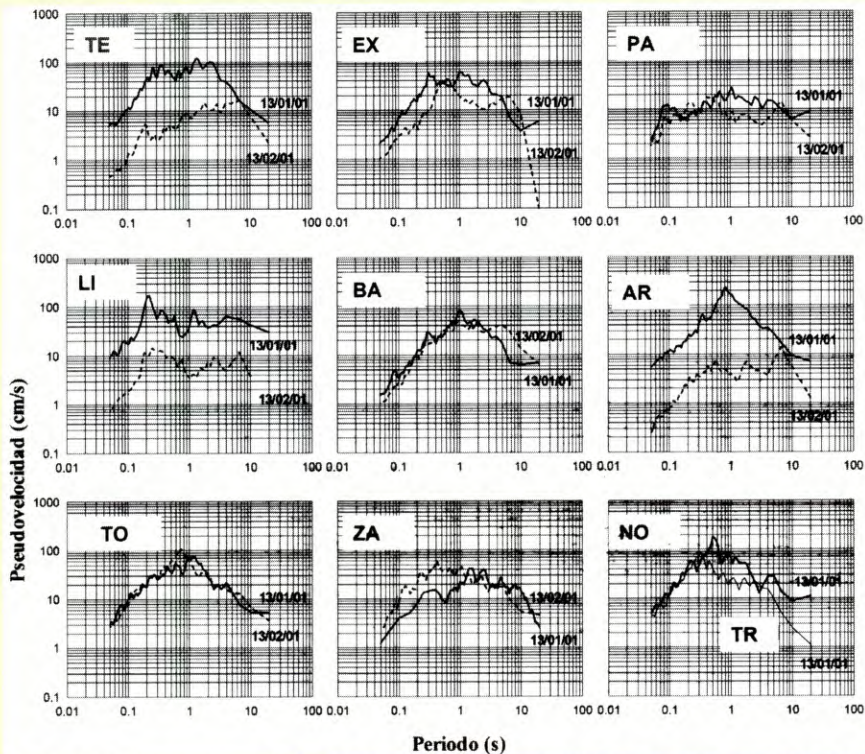


Figura 3.5. Espectros de respuesta de pseudo-velocidad para registros de los sismos del 13 de enero (línea continua) y del 13 de febrero (línea discontinua) correspondientes a la componente Norte-Sur del movimiento, con amortiguamiento crítico del 5%. Cada cuadro contiene los espectros de los registros de ambos sismos en cada una de las estaciones, a excepción del último que presenta los espectros del 13 de enero en las estaciones NO y TR. Adaptado de López Casado et al. (2001).

## ESTUDIO DEL MOVIMIENTO FUERTE

### METODOLOGÍA

A partir de la base de datos acelerográfica que se ha recopilado, se intentó realizar una aplicación para obtener ecuaciones para la estimación de la aceleración máxima horizontal en el terreno y de ordenadas espectrales para periodos de 0.3 s y 1.0 s.

La primera dificultad identificada en la base fue la existencia de brechas o ausencia de datos en rangos de magnitudes altas, tal y como se discutió en la sección anterior con referencia a la figura 3.2. La solución que se propuso ante este problema fue seleccionar ecuaciones recientes con base a datos mundiales y adecuadas al tipo de fuente sismogeneradora. Obviamente, se buscó que estas ecuaciones mundiales no presentaran el mismo problema de brechas que la base de 2001 aquí recopilada.

El segundo problema de la base consistía en una deficiente o inexistente información detallada sobre las condiciones geológicas de las estaciones, lo cual se resolvió realizando una serie de simplificaciones y

suposiciones, las cuales han sido ya descritas en la sección anterior.

Una vez seleccionadas las formas funcionales que se adoptarían para la derivación de nuevas ecuaciones de atenuación, se realizó un análisis de regresión para ajustar los coeficientes del modelo a partir de los datos disponibles.

Para la regresión de datos de subducción se usó como base la ecuación de Atkinson y Boore (2003). Esta se derivó utilizando un mil 200 registros de Japón, el Pacífico Norte de los Estados Unidos, México y Centroamérica. El número de sismos en este estudio fue de 500, con magnitudes que iban desde 5 hasta 8.3 registrados a menos de 300 Km. de distancia.

Con esta ecuación se marca una diferencia entre la atenuación de sismos de interfase (generalmente de mecanismo inverso) y de sismos intraplaca en la placa subducta (generalmente de mecanismo normal). Dado que los mecanismos focales para los principales sismos de subducción de 2001 indicaban fracturas normales; pero se tomó la decisión de aplicar la regresión asumiendo este tipo de mecanismo en todos los sismos de la base.

Lamentablemente la distribución acimutal de estaciones sismográficas en Centro América no permite realizar estimaciones de mecanismos para sismos de subducción en el rango de magnitudes bajas que son las predominantes en la base.

Los datos de corteza superior se ajustaron a una ecuación base obtenida del estudio de Spudich et al. (1999). Esta relación fue desarrollada tomando 142 registros de movimientos fuertes de 39 sismos en las zonas de régimen extensional en los Estados Unidos, Centroamérica, Italia, México, Grecia, Nueva Zelanda, Turquía, y Holanda. El catálogo usado tenía magnitudes en el rango de 5.0 a 7.7 y con distancias a la fuente menores a 70 Km.

Mayores detalles sobre el procedimiento usado en la regresión pueden encontrarse desarrollados en Cepeda et al. (2004).

## ECUACIONES DE MOVIMIENTO FUERTE RESULTANTES

Ecuaciones de atenuación derivadas en este estudio.

$$\log Y = C_1 + C_2 M + C_3 h + C_4 R - \log R + C_5 sl + C_6 sl SD + C_7 sl SE$$

donde:

$Y$  = la aceleración máxima horizontal (PGA) o la pseudo aceleración espectral (PSA) en  $\text{cm/s}^2$  con un 5% de amortiguamiento, utilizando la componente horizontal aleatoria; para este estudio se usó la mayor de las componentes;

$M$  = es la magnitud de momento;

$h$  = es la profundidad focal en Km.;

$$R = \sqrt{D_{\text{fault}}^2 + 2}$$

en donde  $D_{\text{fault}}$  es la distancia más cercana a la superficie de la ruptura, en Km.; en este estudio,  $D_{\text{fault}}$  es la distancia hipocentral para todos los eventos, excepto para el del 13 de enero de 2001;

$$= 0.00724 (10^{0.507 M});$$

$SC = 1$  para suelos C, o 0 en caso contrario;  
 $SD = 1$  para suelos D, o 0 en caso contrario;  
 $SE = 1$  para suelos E, o 0 en caso contrario;  
 para eventos intra-placa;

$sl = 1$  para  $PGA_{rx} < 100 \text{ cm/s}^2$  o frecuencia,  $f < 1 \text{ Hz}$ ;

para  $100 < PGA_{rx} < 500 \text{ cm/s}^2$  ( $1 \text{ Hz} < f < 2 \text{ Hz}$ );

$sl = 1 - (f-1)$  para  $PGA_{rx} 500 \text{ cm/s}^2$  (1 Hz)  
 $< f < 2$  Hz);

$sl = 1 - (PGA_{rx} - 100) / 400$  para  
 $100 < PGA_{rx} < 500 \text{ cm/s}^2$  (f2 Hz);

$sl = 0$  para  $PGA_{rx} 500 \text{ cm/s}^2$  (f2 Hz);

$PGA_{rx}$  es el valor de PGA predicho en roca (sitio B) en  $\text{cm/s}^2$ .

En el caso de sismos de corteza superficial, el modelo empleado es el siguiente:

En el caso de sismos de corteza superficial, el modelo empleado es el siguiente:

$$\log Y = B1 + B2(M-6) + B3(M-6)^2 + B5 \log r + B6 \quad (3.2)$$

donde:

Y = es PGA (en g) o respuesta de seudo-velocidad ( $\text{cm/s}$ ) correspondiente al 5% de amortiguamiento para la media geométrica de las componentes horizontales;

B1 a B6 son coeficientes de la regresión; M = es magnitud de momento;

$r = \sqrt{r_{jb}^2 + H^2}$ , en donde  $r_{jb}$  es la distancia horizontal más cercana (km) a la proyección vertical de la ruptura; en este estudio,  $r_{jb}$  es igual a la distancia epicentral para todos los eventos, excepto para el del 13 de febrero de 2001;

Tabla 3.6

**Coefficientes de regresión y desviaciones estándar en ecuaciones de atenuación para eventos de subducción intra-placa**

Parámetro del movimiento fuerte	Ecuación de atenuación	C1	C2	C3	C4	C5	C6	$\sigma$
PGA	AB03	-	0.6909	0.01130	-	0.19	0.24	0.27
		0.04713				0.00202		
PGA	AB03	2.93078	0.2877	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.26
	ajustada							
PSA	AB03 *	0.2173		0.00339	-	0.14	0.33	0.28
(T = 0.3 s)			0.73915		0.00184			#
PSA	AB03	3.31445		N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.32
	ajustada		0.34496					
(T = 0.3 s)	AB03	-	0.8789	0.00130	-	0.10	0.30	0.29
(T = 1 s)		1.02133			0.00173			
PSA	AB03		0.51846	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.33
(T = 1 s)	ajustada	1.85185						

Notas:

C1, C2, C3, C4, C5 y C6 = coeficientes de regresión.

s = desviación estándar de residuos.

PGA = aceleración máxima horizontal ( $\text{cm/s}^2$ ).

PSA = seudo aceleración espectral ( $\text{cm/s}^2$ ).

T = período.

AB03 = Atkinson y Boore (2003).

N.A. = no aplicable, el coeficiente no se ajustó.

\* = interpolado linealmente de Atkinson y Boore (2003) usando coeficientes de regresión para T = 0.2 s y T = 0.4 s.

# = desviación estándar en Atkinson y Boore (2003) para T = 0.2 s y T = 0.4 s.

"H" es un valor de la regresión;  $\Gamma = 0$  para roca y  $\Gamma = 1$  para suelo.

Las tablas 3.6 y 3.7 presentan los coeficientes de regresión ajustados para las ecuaciones de atenuación derivadas en este estudio.

Las figuras 3.6 y 3.7 ilustran las tendencias de atenuación para las ecuaciones ajustadas.

Para efectos de comparación se ha tomado, en ambos casos, valores de magnitudes que se encuentran dentro del rango de la base de datos y que además pueden ser significativos en términos de las solicitaciones impuestas a edificaciones.

Las figuras 3.6 y 3.7 ilustran las tendencias de atenuación para las ecuaciones ajustadas. Para efectos de comparación se ha tomado, en ambos casos, valores de magnitudes que se encuentran dentro del rango de la base de datos y que además pueden ser significativos en términos de las solicitaciones impuestas a edificaciones.

Tabla 3.7

**Coefficientes de regresión y desviaciones estándar en ecuaciones de atenuación para eventos de corteza superficial**

Parámetro del movimiento fuerte	Ecuación de atenuación	B1	B2	B3	B4	B5	B6	$\sigma$
PGA	SEA99	0.299	0.229	0	-1.052	0.112	7.27	0.203
PGA	SEA99	-0.0423	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.288
	ajustada							
PSA	SEA99	2.263	0.334	-0.070	-1.020	0.121	7.72	0.232
(T = 0.3 s)								
PSA	SEA99	2.270	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0.347
(T = 0.3 s)	ajustada							
PSA	SEA99	2.276	0.450	-0.014	-1.083	0.210	6.01	0.269
(T = 1 s)								
PSA	SEA99		N.A.	N.A.	-	N.A.	N.A.	0.370
(T = 1 s)	ajustada	0.6949			0.0585			

Notas:

B1, B2, B3, B5 y B6 = coeficientes de regresión.

H = valor de regresión usado en el cálculo del término de distancia en la ecuación de atenuación.

s = desviación estándar de los residuos.

PGA = aceleración máxima ( $\text{cm/s}^2$ ) para la media geométrica de las componentes horizontales.

PSV = seudo-velocidad espectral ( $\text{cm/s}$ ) para la media geométrica de las componentes horizontales.

T = período.

SEA99 = Spudich et al. (1999).

N.A. = no aplicable, el coeficiente no se ajustó.

## COMPARACIÓN CON OTRAS ECUACIONES AFINES

Además de los estudios de atenuación tomados como base en el inciso anterior, se puede disponer, con propósitos de comparación, de otras ecuaciones afines en cuanto al tipo de regímenes tectónicos asociados. Las figuras 3.8 y 3.9 presentan las comparaciones de las ecuaciones 3.1 y 3.2 ajustadas, con sus respectivas ecuaciones base. Además se han incluido las ecuaciones de Youngs et al. (1997) y de Ambraseys et al. (1996). La base de Youngs et al. (1997) toma como insumo registros de las mismas regiones que Atkinson y Boore (2003), y además incluye datos de Alaska, Chile, Perú e Islas Salomón. Se basa en la regresión de 480 registros producidos por 164 sismos de subducción. También diferencia los eventos intra-placa de los de interfase.



**Figura 3.6**

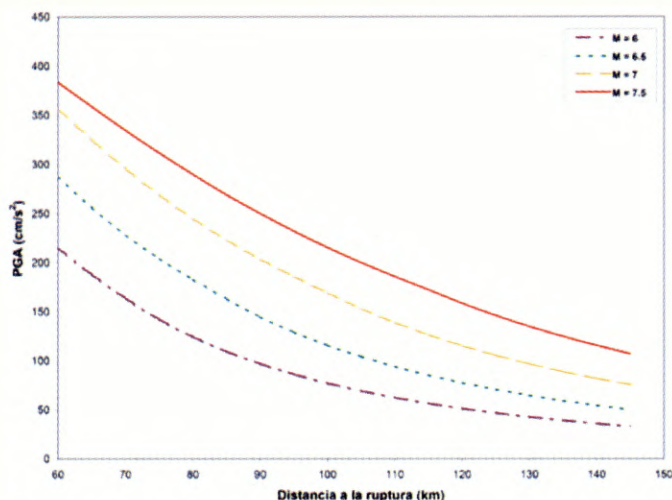


Figura 3.6. Atenuación de sismos de subducción utilizando la ecuación 3.1 ajustada. Curvas comparativas de PGA vs. distancia a la ruptura para diferentes magnitudes y sitio clase D.

El estudio de Ambraseys et al. (1996) predice la atenuación de sismos superficiales. La mayoría de sus registros son de Europa y su base comprende registros de Argelia, Bulgaria, Italia, Grecia, Portugal, Irán, Turquía, la antigua Unión Soviética, la antigua Yugoslavia y las Islas Azores en Portugal.

Puede verse en la figura 3.8 que la ecuación 3.1 ajustada con los datos de 2001 es sólo ligeramente sobreestimada por el estudio de Atkinson y Boore (2003). Se ve también que Youngs et al. (1997) produce subestimaciones respecto a los otros dos estudios en los primeros 100 Km. de distancia.

Para el caso de los sismos de corteza superior, la comparación de la figura 3.9 indica claramente que tanto las estimaciones de Spudich et al. (1999) como la de Ambraseys et al. (1996) producen siempre predicciones por encima de la mediana correspondiente a la ecuación 3.2.

### **DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MOVIMIENTO FUERTE PARA LOS SISMOS DEL 13 DE ENERO Y 13 DE FEBRERO**

Para finalizar el presente capítulo, se propone a continuación una aplicación práctica de las ecuaciones de atenuación ajustadas en la sección anterior, que pueden ser consideradas también modelos de predicción. Esta aplicación consiste en simular la distribución de movimientos

fuertes del terreno producidos por los terremotos del 13 de enero y del 13 de febrero de 2001.

Para ello se toma como parámetro del movimiento la aceleración máxima horizontal; la estimación de aceleraciones se realizará con la utilización de las ecuaciones 3.1 y 3.2.

Como simplificación en la simulación, se supone que la fuente sismogeneradora es de tipo puntual. La aplicación tendría resultados distintos al considerar otros tipos de fuentes, ya que la forma del frente de propagación de ondas, y por tanto la de la distribución

espacial del movimiento del terreno, depende fuertemente de la ubicación, geometría y extensión de la fuente sísmica.

La distribución se calculará para condiciones de un sitio de referencia, es decir, que se asumen las características geológicas correspondientes a un emplazamiento en roca; además, que se ha ubicado en terreno plano, por lo que además de desacoplar la amplificación por capas de suelo, no se incorpora tampoco la amplificación (o deamplificación) topográfica.

Los resultados de la simulación se presentan en las figuras 3.10 y 3.11. Una conclusión importante que surge de la observación de ambas distribuciones es la diferencia de la rapidez de atenuación del movimiento del terreno con la distancia. En el caso del terremoto de subducción (figura 3.10), la máxima aceleración se reduce a un 50% en una distancia de aproximadamente 60 Km.; a diferencia del terremoto de corteza superficial (figura 3.11), que con el mismo porcentaje de reducción se da en una distancia menor a los 30 kms. Obviamente, estas diferencias de rapidez de atenuación están directamente relacionadas con las diferencias en las profundidades de las fuentes sísmicas.

Este ejercicio realizado para condiciones uniformes de sitio podría repetirse superponiendo luego efectos de amplificación por geología y topografía. La simulación ampliada en esta forma puede permitir la elaboración de un retroanálisis de casos de deslizamientos o de correlaciones de movimiento fuerte versus daño.

**Figura 3.7**

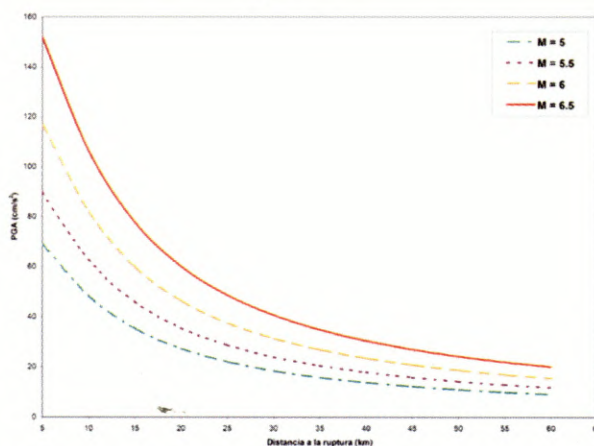


Figura 3.7. Atenuación de sismos de corteza superficial utilizando la ecuación 3.2 ajustada. Curvas comparativas de PGA vs. Distancia a la ruptura para diferentes magnitudes y sitio tipo suelo.

También es posible repetir la simulación para otras geometrías, ubicaciones y tamaños (magnitudes) de fuentes sísmicas con el objeto de estimar patrones posibles de daños como resultado de eventos sísmicos futuros. Este último comentario tiene un fundamento validado históricamente en el caso de El Salvador, pues la ocurrencia de terremotos de gran magnitud cuyo origen es de subducción se ha ido dando en forma alternada en el occidente (1915), oriente (1932), centro-occidente (1982), y zona paracentral-oriental (2001).

Un patrón similar de relativa alternancia se ha verificado también históricamente para los terremotos de corteza superficial, que en el último siglo han ocurrido en el centro (1917), zona paracentral (1936), zona oriental (1951), zona central (1965 y 1986), y nuevamente zona paracentral (1999 y 2001).

## DISCUSIÓN

En lo referente al movimiento fuerte registrado durante los sismos de 2001, se obtuvieron un total de 479 registros, procedentes de 188 sismos (entre eventos principales y réplicas), que han supuesto un notable incremento en la base de datos acelerométrica de El Salvador, compuesta hasta ese año por alrededor de 200 registros.

Para la presentación de estos datos no se dispone, como limitante, de información precisa sobre el tipo de suelo en las estaciones; pero el estudio de los mismos, separando los que corresponden a sismos de subducción y a sismos de cadena volcánica, permite identificar características particulares de atenuación para ambas series y establecer diferencias entre ellas.

**Figura 3.8**

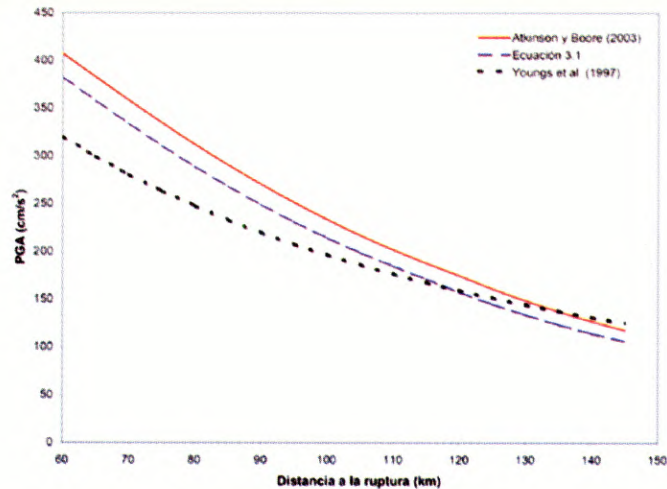


Figura 3.8. Comparación de ecuaciones de atenuación para sismos de subducción considerando un evento de magnitud 7.5.

Si bien los terremotos de 2001 han permitido incrementar considerablemente los bancos de datos acelerográficos existentes para El Salvador, y la región centroamericana, se debe tener en cuenta de que los registros de ese periodo son insuficientes para permitir generar estimaciones de movimientos fuertes. Las razones principales se verifican en la existencia de brechas en amplios rangos de magnitudes moderadas y altas.

El uso de modelos de atenuación que hace una clasificación rigurosa del sitio, requieren realizar demasiadas suposiciones en el banco de datos aquí recopilado. Estas suposiciones son un elemento de error no controlado,

que no puede ser conocido mientras no se cuente con suficiente información de condiciones de sitio de forma más extensa y detallada para cada una de las estaciones de registro.

La atenuación asociada a los eventos de subducción de 2001 se ajusta bien, en términos generales, a ecuaciones existentes basadas en datos mundiales. Existe, sin embargo, un desconocimiento sobre los tipos de mecanismos en sismos de subducción pequeños y moderados, lo que hace necesario asumir tipos de mecanismos idénticos a los de sismos de mayor magnitud que sí tienen mecanismos focales calculados.

**Figura 3.9**

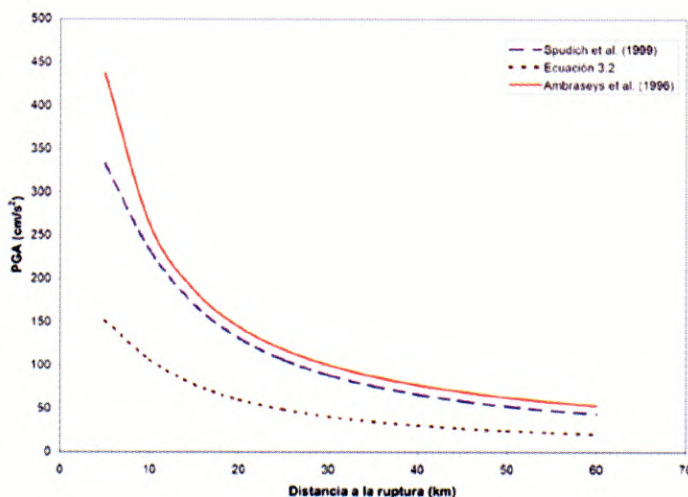


Figura 3.9. Comparación de ecuaciones de atenuación para sismos de corteza superior considerando un evento de magnitud 6.5.

En la atenuación de sismos de corteza superior ha podido observarse que las ecuaciones derivadas con los datos de 2001 realizan estimaciones muy por debajo de las predicciones de los estudios con los que aquí se comparan.

Las distribuciones espaciales de movimiento fuerte para los terremotos del 13 de enero y del 13 de febrero de 2001 tienen una buena concordancia con las diferencias de atenuación esperadas en sismos de foco superficial y de foco profundo.

La realización de simulaciones de distribuciones espaciales de parámetros de movimiento fuerte se propone como una herramienta en la realización de retro-análisis de casos de daños en infraestructura o de fallas en el terreno; además que puede permitir la generación de escenarios de amenaza en forma determinística para estimar posibles distribuciones de daños.

# Distribución Espacial de la Aceleración Máxima Horizontal Para el Sismo del 13 de Enero del 2001

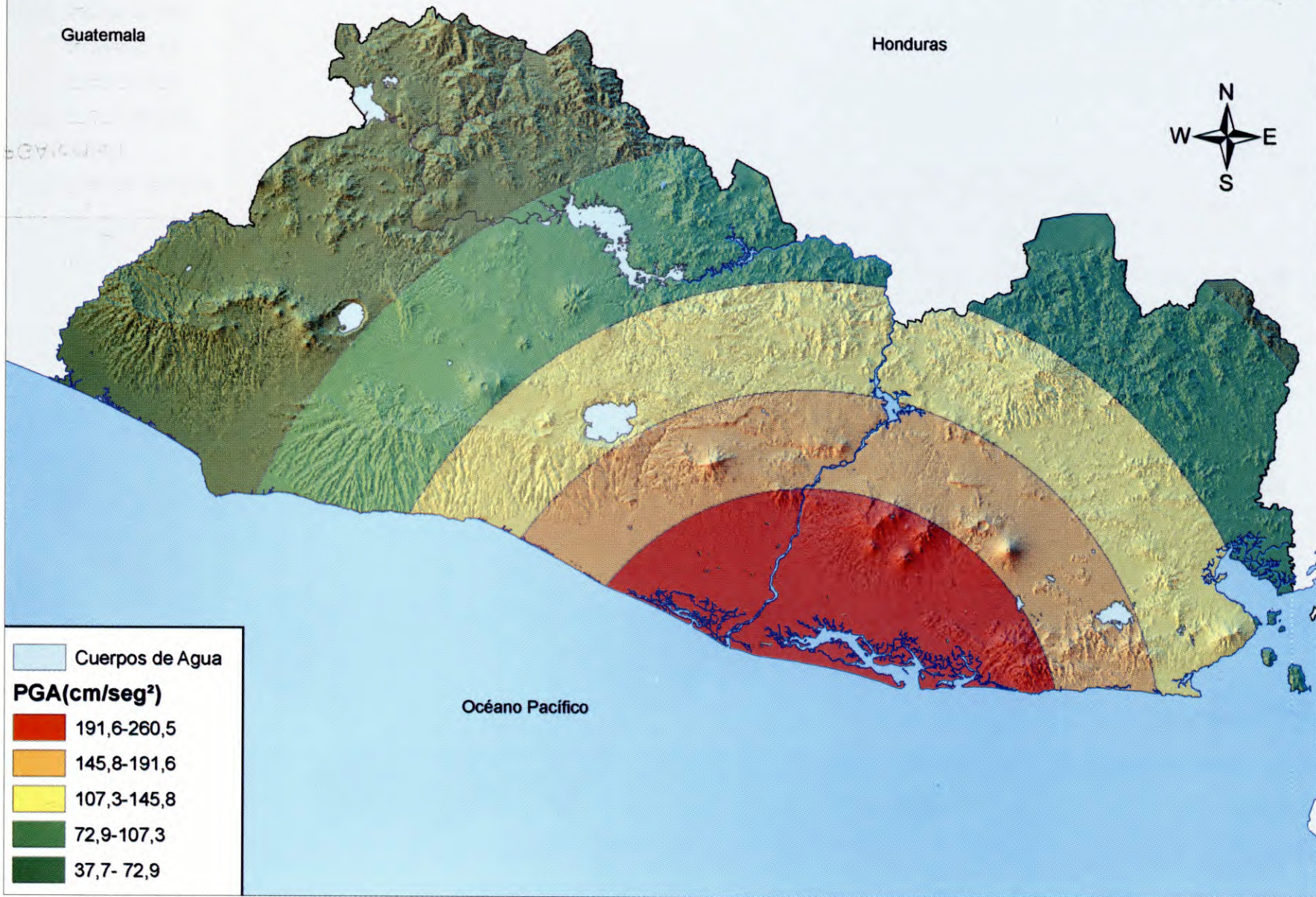


Figura 3.10. Distribución espacial de aceleración máxima horizontal para el terremoto del 13 de enero de 2001. Simulación desarrollada con la ecuación 3.1 ajustada, para fuente puntual y condiciones de roca en terreno plano



Figura 3.11. Distribución espacial de aceleración máxima horizontal para el terremoto del 13 de febrero de 2001. Simulación desarrollada con la ecuación 3.2 ajustada, para fuente puntual y condiciones de roca en terreno plano.