

CARACTERISTICAS EXPERIMENTALES DE LOS MOVIMIENTOS SISMICOS SUDAMERICANOS

Rodolfo SARAGONI*

Jorge CREMPIEN*

Rodrigo ARAYA*

RESUMEN

Considerando la mayoría de los registros de aceleraciones obtenidos en los últimos 24 años, se deducen fórmulas de atenuación para los sismos fuertes de la costa occidental de Sudamérica.

En primer término, se demuestra que el número de eventos de que se dispone es equivalente e incluso superior al empleado en estudios similares para otras partes del mundo. Las fórmulas de atenuación que se deducen corresponden a la aceleración horizontal máxima registrada en suelos duros en función de la magnitud de Richter y de la distancia hipocentral y entre la aceleración horizontal máxima y la intensidad de Mercalli Modificada.

Con estos antecedentes se comparan los movimientos sísmicos registrados en Chile con los de otras zonas del mundo.

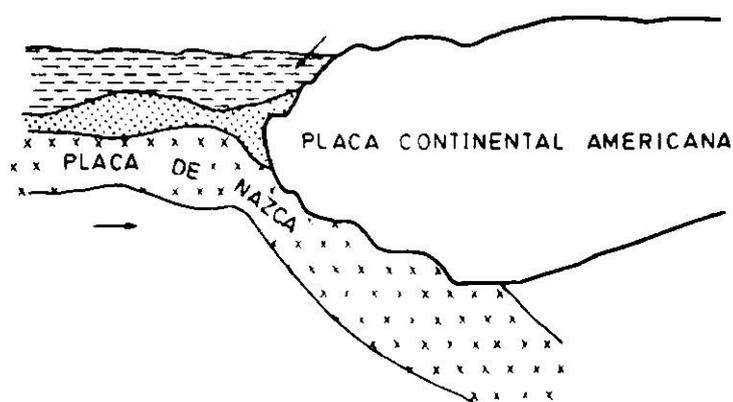
CARACTERISTICAS DE LOS MOVIMIENTOS SISMICOS EN LA COSTA OCCIDENTAL DE SUDAMERICA

En esta sección se considera en detalle la actividad sísmica de Chile, Perú y Argentina que ha sido registrada por acelerógrafos de movimiento fuerte

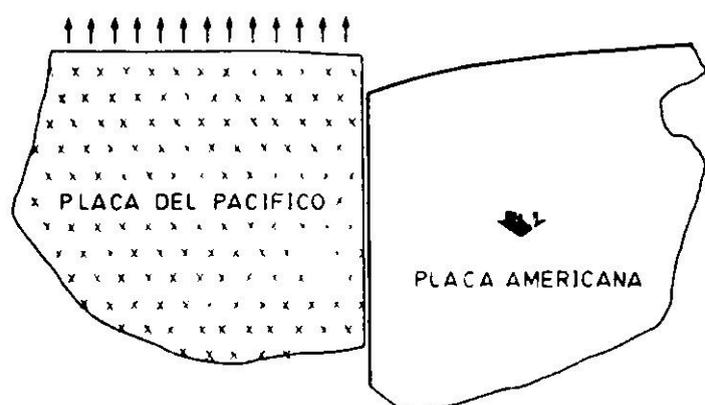
* Profesor Investigador, Sección Ingeniería Estructural, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

en los últimos 24 años. La elección de este universo de registros de movimiento fuerte o acelerogramas corresponde a sismos originados por la interacción de acreción entre la placa de Nazca y la placa Americana.

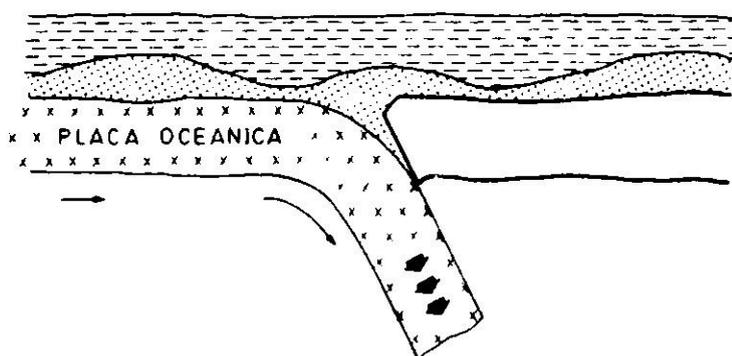
La acreción es un mecanismo de interacción entre dos placas, que en el caso de Chile y Perú consiste en el lento choque de la placa oceánica de Nazca con la placa continental Americana, en el cual la placa va aumentando de espesor a expensas del hundimiento de la placa oceánica (Lomnitz¹, ver Fig. 1a).



a. ACRECENTAMIENTO (CHILE Y PERU)



b. TRANSCURSION (COSTA OESTE DE LOS EEUU)



c. SUBDUCCION (ARCHIPIELAGO DEL JAPON)

Fig. 1. Mecanismo de interacción entre placas (Adaptado de Lomnitz¹).

diferente del de subducción, que ocurre a lo largo de arcos de islas, como en el caso del arco del Japón, en que dos placas de aproximadamente el mismo espesor convergen, hundiéndose la placa oceánica bajo la placa del arco de islas dando lugar a una zona de Benioff, Fig. 1c.

Debido a estas diferencias se ha estimado conveniente considerar un universo de acelerogramas correspondientes sólo a la actividad entre la placa de Nazca

En el caso de Chile, la placa de Nazca en su avance empuja a la costa de Chile en dirección aproximadamente normal y aproximadamente en 45° a la costa del Perú, Fig. 2.

La acreción es un mecanismo de interacción entre placas diferente del de transcurción, que da origen a los temblores de la costa Oeste de los E.U.A., sin considerar Alaska, Fig. 1b. En el caso norteamericano, la placa del Pacífico se desplaza en forma horizontal y relativa con respecto a la placa Americana dando origen a temblores de focos poco profundos y con manifestaciones superficiales asociadas a fallas.

El mecanismo de acreción es también

y Americana para estimar fórmulas de atenuación para las aceleraciones máximas. La fórmula de atenuación que se obtenga será comparada posteriormente con otras fórmulas de la misma naturaleza propuestas para otras regiones con mecanismos de interacción de tipo subductivo o transcurativo, a objeto de discriminar si las fórmulas de atenuación para acreción, correspondientes a Chile y Perú, son similares a las que se obtienen para transcurción (costa occidental de E.U.A) o subducción (Archipiélago del Japón y Alaska).

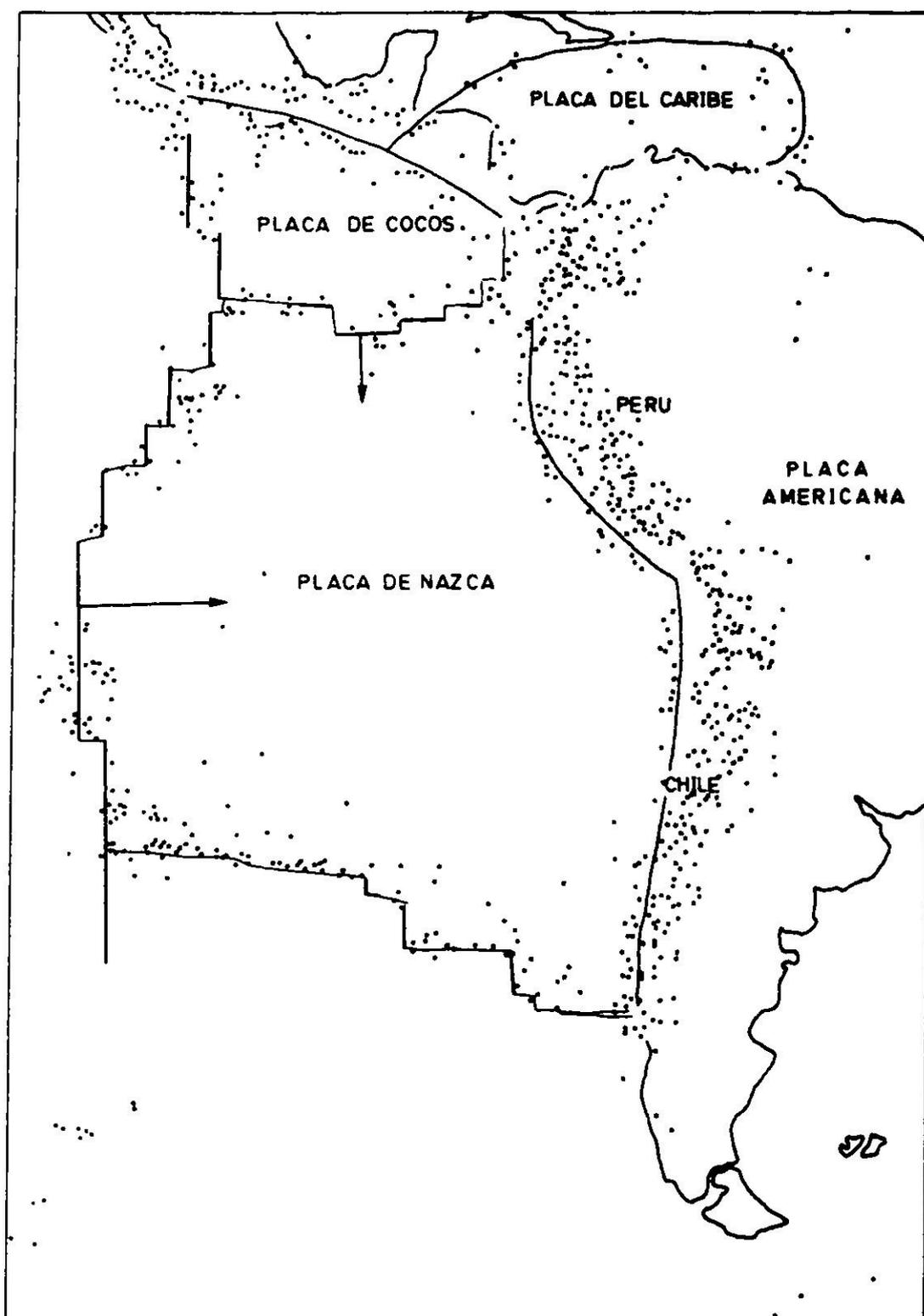


Fig. 2. Acción de la placa de Nazca con respecto a la placa Americana. Se supone que esta placa se mueve normal a la Costa de Chile, esto implica que se mueve en un ángulo de 45° con respecto a la Costa Peruana.

CARACTERISTICAS DE LAS ACELERACIONES HORIZONTALES MAXIMAS REGISTRADAS EN SUDAMERICA CONSIDERADAS EN ESTE ESTUDIO

Para este estudio (Saragoni y colaboradores²) se consideraron 23 acelerogramas chilenos, 2 argentinos y 20 peruanos, lo que da un total de 45 acelerogramas

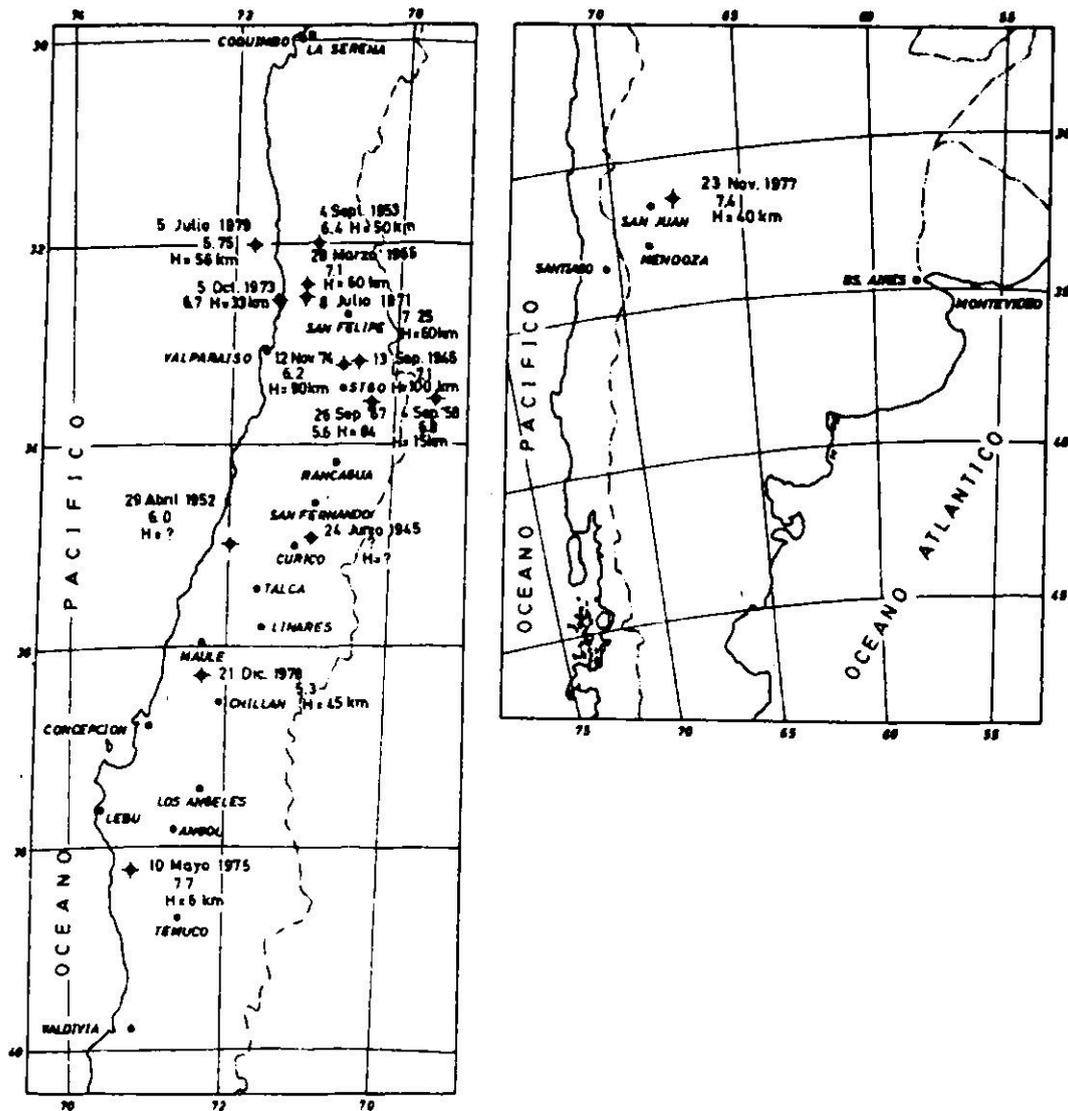


Fig. 3. Ubicación de los epicentros de los temblores chilenos y argentinos.

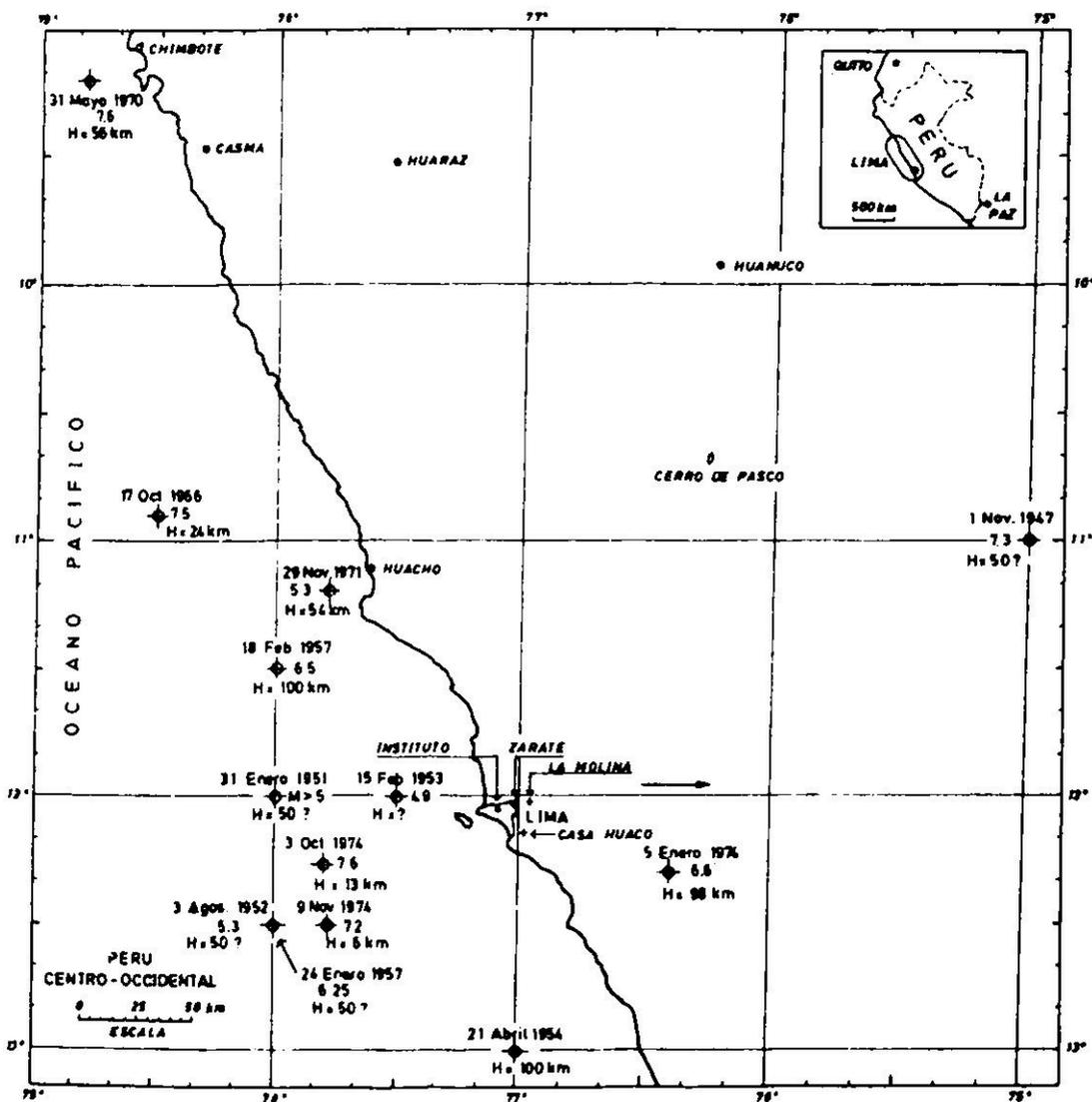


Fig. 4. Ubicación de los epicentros de los temblores peruanos y de las estaciones de acelerógrafos en la vecindad de Lima.

con tres componentes cada uno.

La ubicación de los epicentros de los temblores chilenos y argentinos se indica en la Fig. 3 y la ubicación de los epicentros de los temblores peruanos en la Fig. 4. Las características correspondientes a cada acelerograma, tales como fecha del temblor, ubicación del epicentro, la magnitud de Richter, la distancia epicentral, la identificación de la estación registradora y el tipo de suelo fueron obtenidas de las referencias 3 a 14.

El número de registros horizontales de que se disponía alcanzó a 75, sin embargo, sólo 62 aceleraciones máximas contaban con todos los antecedentes para realizar estudios de correlación con magnitud de Richter y distancia epicentral, ver Tabla I. Las 62 aceleraciones máximas registradas fueron consideradas todas como eventos independientes, no obstante que un número importante de ellas corresponde a dos componentes horizontales registradas en una misma estación. Esta suposición de independencia se aceptó considerando que la aceleración máxima de una componente es el resultado de la superposición de un gran número de ondas que llegan al lugar después de numerosas reflexiones, refracciones y reverberaciones.

Por otra parte, la aceleración máxima de una componente se obtiene en un instante que es normalmente distinto del de la otra componente y con una diferencia de tiempo tal que comparada con la apertura del rango positivo de la función de autocorrelación de estos registros (aproximadamente 0.20s) justifica ampliamente considerar cada componente de un registro como un evento independiente.

En la Tabla II se separan las componentes por rango de magnitud y tipo de suelo en que fueron registradas. Esta distribución de datos se compara con la considerada en un estudio de curvas de atenuación para sismos de mecanismo subductivo que se muestra en la Tabla III y que incorpora parte de los datos empleados en este estudio, Patwardhan et al¹⁵. De esta comparación puede decirse que la distribución de los datos por rango de magnitud es adecuada y representativa para estudios de correlación.

Sin embargo, la distribución de las componentes por tipo de suelo no es adecuada por tenerse un número muy limitado de registros en roca. Este caso es similar al que informan Patwardhan et al¹⁵.

FORMULA DE ATENUACION DE LAS ACELERACIONES HORIZONTALES MAXIMAS REGISTRADAS EN SUDAMERICA EN SUELOS DUROS

La fórmula de atenuación para las aceleraciones horizontales máximas que se consideró fue del tipo:

$$a_{\text{máx}} = \frac{A e^{BM}}{(R + C)^D}$$

TABLA I

ACELERACIONES HORIZONTALES MAXIMAS REGISTRADAS EN LA ZONA DE INTERACCION DE LA PLACA DE NAZCA Y AMERICANA CON ANTECEDENTES SUFICIENTES PARA ESTUDIOS DE CORRELACION

TABLA Ia. TEMBLORES CHILENOS

Nº	Fecha	Estación registradora	Magnitud Richter	Distancia epicentral km	Profundidad km	Distancia hipocentral km	Aceleración horizontal máxima g
1	13.09.1945	Escuela de Ingeniería	7.1	35	100	106	0.131
2		Santiago					0.067
3	29.04.1952	Escuela de Ingeniería	6.0	172	10*	172	0.007
4		Santiago					0.006
5	04.09.1953	Escuela de Ingeniería	6.4	137	50	146	0.015
6		Santiago					0.017
7	04.09.1958	Escuela de Ingeniería	6.8	95	15	96	0.030
8		Santiago					0.052
9	28.03.1965	Escuela de Ingeniería	7.1	140	61	153	0.187
10		Santiago					0.171
11	26.09.1967	Escuela de Ingeniería	5.6	21.5	84	87	0.028
12		Santiago					0.025
13	08.07.1971	Escuela de Ingeniería	7.75	165	60	175	0.134
14		Santiago					0.165
15	05.10.1973	Escuela de Ingeniería	6.7	105	33	110	0.011
16		Santiago					0.010
17	12.11.1974	Escuela de Ingeniería	6.2	29	90	95	0.033
18							0.044
19	12.11.1974	Cerro Sta. Lucía Stgo.	6.2	28	90	94	0.031
20	21.12.1978	Concepción	5.3	74	46	87	0.091
21							0.080
22	21.12.1978	Chillán	5.3	48	46	66	0.051
23							0.050
24	21.12.1978	Talca	5.3	96	46	106	0.026
25							0.031
26	05.07.1979	La Ligua	5.75	74	56	93	0.202
27	05.07.1979	Papudo	5.75	66	56	87	0.200
28	05.07.1979	Viña del Mar	5.75	109	56	123	0.034
29							0.025
30	05.07.1979	Valparaíso U.T.F.S.M.	5.75	111	56	124	0.011

TABLA Ib. TEMBLORES ARGENTINOS

31	23.11.1977	San Juan (INPRES)	7.4	100	40	100	0.202
32							0.207
33	23.11.1977	Viña del Mar	7.4	350	40	352	0.021
34							0.022

TABLA Ic. TEMBLORES PERUANOS

35	01.11.1947	Instituto Geofísico	7.3	255	50**	260	0.0063
36							0.0061
37	31.01.1951	Instituto Geofísico	6.0	105	50**	116	0.062
38							0.081
39	03.08.1952	Instituto Geofísico	5.3	115	50**	125	0.027
40							0.027
41	24.01.1957	Instituto Geofísico	6.25	110	50**	120	0.010
42							0.009
43	18.02.1957	Instituto Geofísico	6.5	115	100	152	0.040
44							0.034
45	17.10.1966	Instituto Geofísico	7.5	205	24	206	0.371
46				(250)		(251)	0.274
47	31.05.1970	Instituto Geofísico	7.75	370	56	374	0.12
48				(315)		(320)	0.13
49	29.11.1971	Instituto Geofísico	5.3	127	54	138	0.06
50							0.09
51	05.01.1974	Instituto Geofísico	6.6	74	98	123	0.09
52							0.11
53	05.01.1974	Zárate	6.6	73	98	122	0.157
54							0.172
55	03.10.1974	Instituto Geofísico	7.5	86	13	87	0.25
56							0.21
57	03.10.1974	Casa del Dr. Huaco	7.5	91	13	92	0.20
58							0.25
59	09.11.1974	Instituto Geofísico	7.2	95	6	95	0.05
60							0.07
61	09.11.1974	La Molina	7.2	103	6	103	0.12
62							0.10

* No se dispone de datos y se asignó profundidad de diez kilómetros por ser superficial.

** No se dispone de datos de profundidad. Se asignó una profundidad estándar de 50 km.

TABLA II
DISTRIBUCION DE LAS ACELERACIONES HORIZONTALES MAXIMAS
POR INTERVALOS DE MAGNITUD Y TIPO DE SUELO

Intervalo de magnitud	Número de componentes		
	Roca	Suelo aluvional	Total
5.3 — 5.75	2	15	17
6.0 — 6.8	1	20	21
7.1 — 7.75	—	24	24
Total	3	59	62

TABLA III
DISTRIBUCION DE LAS ACELERACIONES MAXIMAS POR INTERVALOS DE
MAGNITUD Y TIPO DE SUELO. ESTUDIO DE SISMOS DE MECANISMOS
DE SUBDUCCION. (Patwardhan et al¹⁵).

Intervalo de magnitud	Número de componentes		
	Roca	Suelo aluvional	Total
5.3 — 5.8	—	16	16
6.0 — 6.7	—	16	16
7.0 — 7.8	—	32	32
Total	—	64	64

en que *A*, *B*, *C* y *D* son constantes, *M* es la magnitud de Richter y *R* la distancia hipocentral.

La forma de la Ec. (1) está basada en parte en consideraciones teóricas, Esteva y Rosenblueth¹⁶. El término $\exp(BM)$ describe la relación entre energía y magnitud *M* del terremoto. La distancia hipocentral llevada a una potencia negativa describe la atenuación geométrica de las ondas sísmicas en forma esférica o cilíndrica, y el término constante *C* es un elemento correctivo en la zona de campo cercano a la suposición de una fuente puntual o lineal de emisión de energía sísmica.

Para estimar la fórmula de atenuación de las aceleraciones horizontales máximas se consideró la regresión lineal de los datos con la versión logarítmica de la Ec. (1), esto es:

$$\ln a_{\text{máx}} = \ln A + BM - D \ln (R + C) \tag{2}$$

Para el estudio de la regresión se eliminaron del universo de 62 datos de aceleraciones horizontales máximas que se dispone, 5 aceleraciones por tener valores inferiores a 0.01 g, pues se estimó que los instrumentos de registros empleados no son confiables bajo ese valor.

Los 57 datos restantes, se dividieron, para estudios de regresión, en cuatro grupos:

Primer grupo: los temblores peruanos

Segundo grupo: todos los temblores peruanos excepto los registros obtenidos en Lima para los terremotos de 1966, 1970 y 1971.

Tercer grupo: todos los temblores chilenos y argentinos excepto el registro obtenido en Viña del Mar para el terremoto de San Juan, Argentina, 23 de noviembre de 1977.

Cuarto grupo: todos los registros obtenidos para temblores chilenos y argentinos.

La separación de los temblores peruanos en dos grupos obedece al hecho de que todos los registros de aceleraciones obtenidos en Lima para terremotos con epicentro al Norte de Lima dan aceleraciones bastante más altas que el resto para la misma distancia hipocentral. Los terremotos que caen en esta categoría son el del 17 de octubre de 1966, el del 31 de mayo de 1970 y el del 29 de noviembre de 1971, ver Fig. 4. Las mayores aceleraciones que dan estos temblores parecen ser consecuencia de un efecto azimutal producido porque la zona de interacción entre la placa de Nazca y la costa del Perú al avanzar hacia Lima, produce una especie de efecto Doppler para las ondas sísmicas que se emiten de la fuente en movimiento, lo que se traduce en un aumento de amplitudes.

El registro de aceleraciones desusualmente altas en Lima, ya había sido observado por Cloud y Pérez¹¹.

Por este motivo, en este estudio se ha corregido el epicentro de los grandes terremotos ocurridos en el Perú al Norte de Lima, reemplazando el epicentro por el baricentro de las réplicas. No obstante la mencionada corrección, las aceleraciones máximas obtenidas de estos terremotos a distancias hipocentrales similares son significativamente más altas que las del resto del Perú. Aun en el caso de reemplazar el baricentro de las réplicas por el extremo más próximo de la zona de réplicas a la estación registradora, los valores que se obtienen para las aceleraciones máximas son desusualmente altos.

Considerando la corrección del epicentro por el baricentro del área de las réplicas para los sismos antes mencionados, se obtiene la siguiente fórmula de atenuación para la totalidad de los temblores peruanos:

$$a_{\text{máx}} = \frac{0.79 e^{0.67M}}{(R + 60)^{0.04}} (\text{cm/s}^2) \quad 3$$

La fórmula de atenuación correspondiente a los temblores peruanos sin considerar los temblores de 1966, 1970 y 1971 es:

$$a_{\text{máx}} = \frac{3550 e^{0.69M}}{(R + 60)^{1.63}} (\text{cm/s}^2) \quad 4$$

La fórmula de atenuación de los temblores chilenos sin considerar el

registro obtenido para el terremoto del 23 de noviembre de 1977 de San Juan en la ciudad de Viña del Mar es:

$$a_{\text{máx}} = \frac{1940 e^{0.65 M}}{(R + 60)^{1.52}} \text{ (cm/s}^2\text{)} \quad 5$$

La fórmula de atenuación correspondiente a todos los temblores chilenos y argentinos es:

$$a_{\text{máx}} = \frac{5110 e^{0.67 M}}{(R + 60)^{1.73}} \text{ (cm/s}^2\text{)} \quad 6$$

La separación del registro obtenido en Viña del Mar en 1977 del resto de los registros chilenos y argentinos, se hizo para detectar la influencia que podría tener la Cordillera de los Andes en el paso de las ondas sísmicas desde San Juan a Viña del Mar. El efecto de atenuación de las aceleraciones que pudiera producir la Cordillera, no sería entonces representativo del caso que interesa, que es el de la atenuación de las aceleraciones máximas en Chile con epicentros y lugares ubicados al mismo lado de la cordillera.

Las fórmulas de atenuación obtenidas a partir de las regresiones lineales correspondientes a las Ecs (3),(4),(5) y (6) y los datos se muestran en Fig. 5.

De las comparaciones de estas fórmulas, que se han hecho para un exponente común $\exp(-0.68M)$, se concluye que:

Las curvas de atenuación correspondientes a los temblores de Chile y Argentina, con o sin el registro obtenido en Viña del Mar para el terremoto de San Juan, son similares, Ecs. (5) y (6).

Ambas curvas de los registros de terremotos chilenos y argentinos son similares a la obtenida para los terremotos peruanos exceptuando las aceleraciones máximas obtenidas para los temblores de 1966, 1970 y 1971 Ecs. (5) y (6) con (4). El resultado anterior confirmaría que mientras la estación registradora tenga su dirección aproximadamente perpendicular a la línea de interacción de la placa de Nazca y Americana, tanto los temblores peruanos, chilenos y argentinos tienen el mismo comportamiento. La diferencia entre los temblores peruanos y chilenos aparece cuando la dirección de la distancia a la estación registradora queda en la dirección del rumbo de la zona de interacción de la placa de Nazca y Americana, teniéndose una especie de efecto Doppler, tal como ocurrió con los temblores registrados en Lima en 1966, 1970 y 1971.

La fórmula de atenuación correspondiente a la totalidad de los registros peruanos, chilenos y argentinos excepto Lima 1966, 1970 y 1971 es la siguiente:

$$a_{\text{máx}} = \frac{2300 e^{0.71 M}}{(R + 60)^{1.6}} \text{ (cm/s}^2\text{)} \quad 7$$

La comparación de la Ec. (7) con los datos considerados se muestra en la Fig. 6, y la variación de la Ec. (7) con la magnitud se muestra en la Fig. 7.

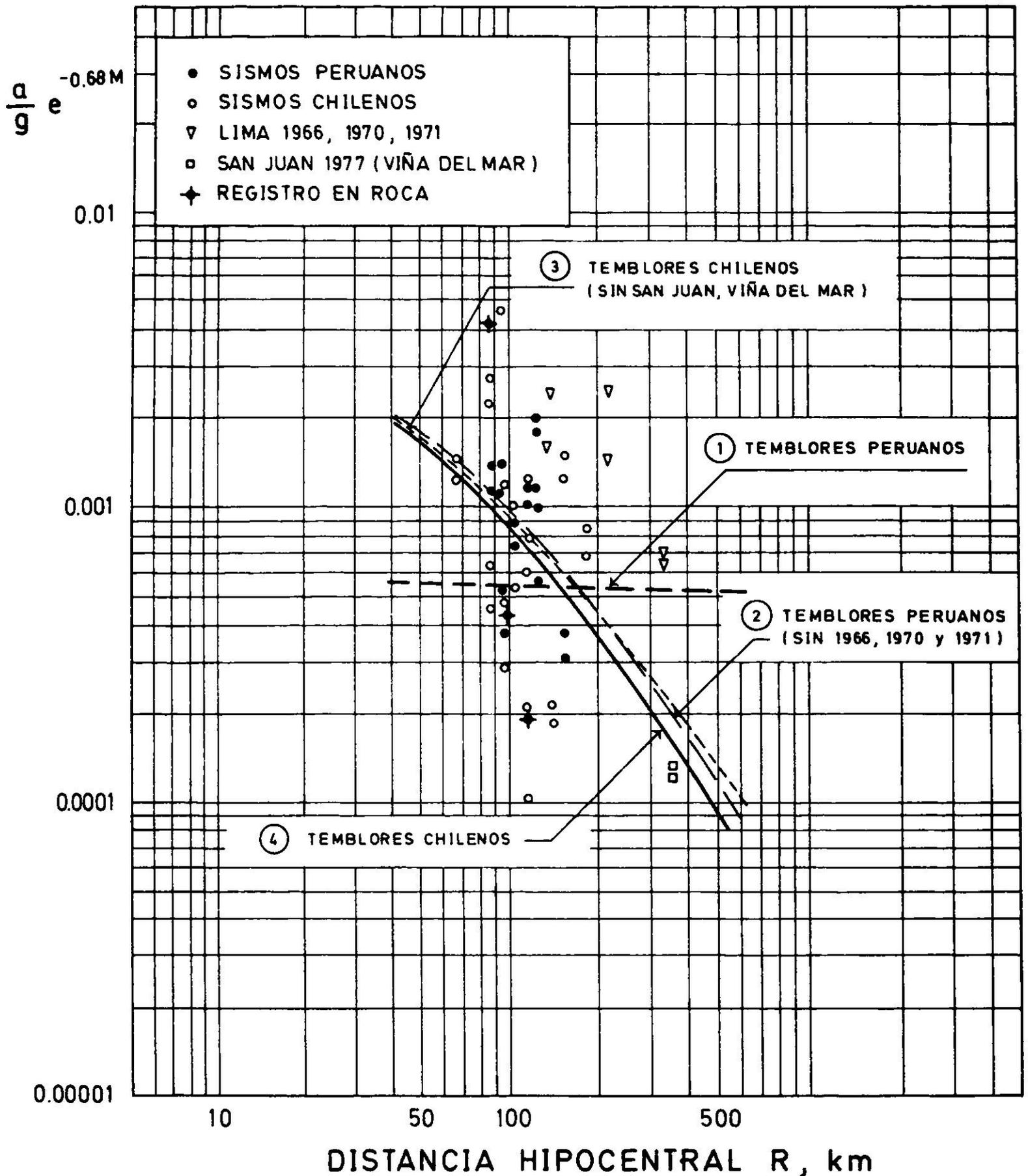


Fig. 5. Sensibilidad de las funciones de regresión al universo de datos chilenos, peruanos y argentinos considerados. (1) Todos los temblores peruanos, (2) Todos los temblores peruanos excepto Lima 1966, 1970 y 1971. (3) Todos los temblores chilenos y argentinos excepto el registro de Viña del Mar obtenido para el terremoto de San Juan, 1977. (4) Todos los temblores chilenos y argentinos.

En la Ec. (7) se eligió arbitrariamente la constante $C = 60$ km, por estimarse que es el valor más representativo de la profundidad focal de los temblores sudamericanos. Sin embargo la elección del valor de la constante C no tiene mayor influencia en la correlación, de acuerdo a estudios que se hicieron para $C = 0; 25; 60$ y 100 km.

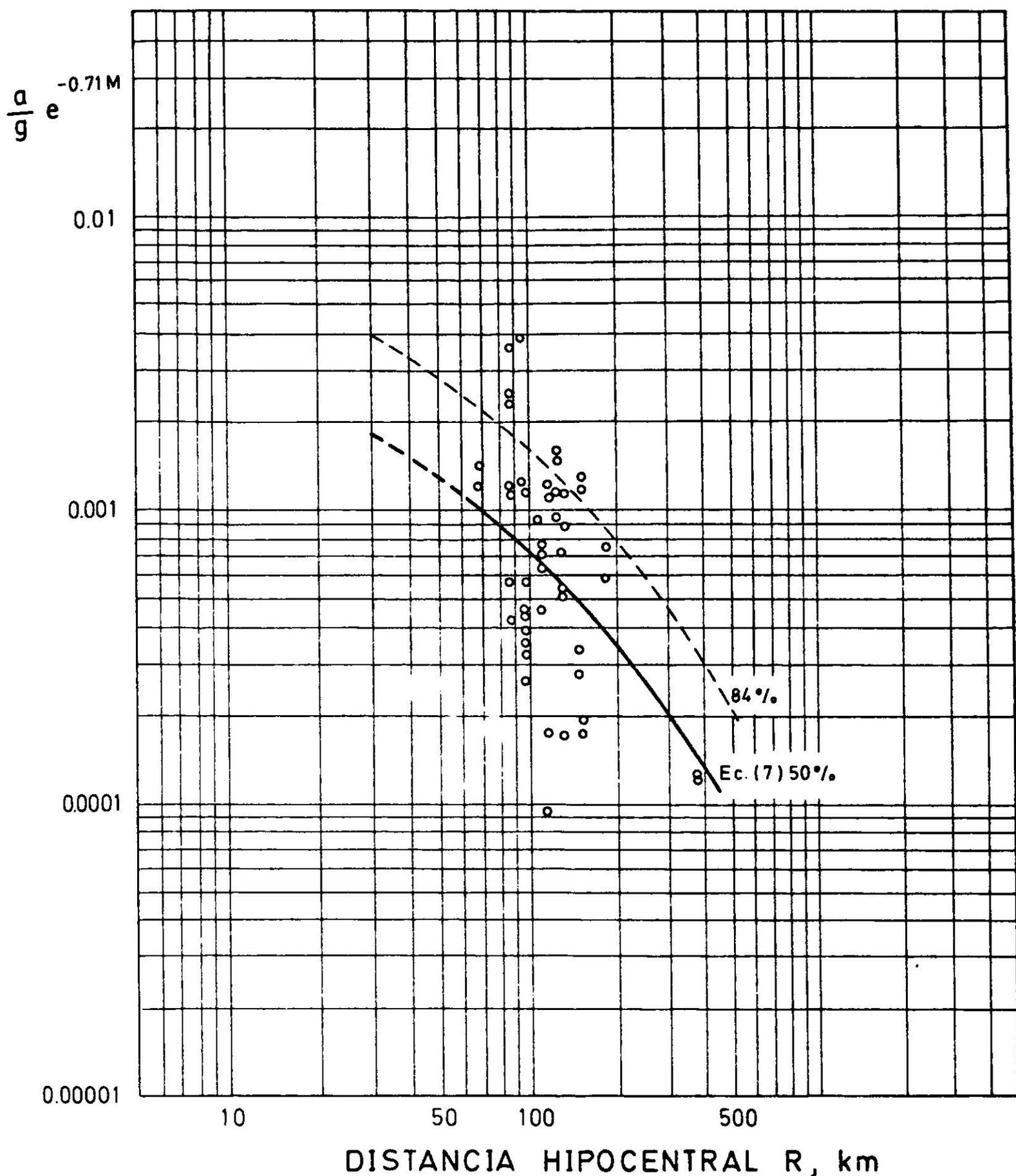


Fig. 6. Comparación de la curva de atenuación de las aceleraciones horizontales de temblores chilenos, peruanos y argentinos, sin considerar registros con efecto azimutal de la zona de contacto de la placa de Nazca con la placa Americana, con las aceleraciones horizontales máximas registradas.

Suponiendo una distribución normal para los logarítmicos de las aceleraciones máximas se pudo estimar la desviación estándar S correspondiente: $S = 0.794$ y $\exp(0.794) = 2.21$. Con lo que se pudo trazar en la Fig. 6 la curva que incluye el 84% de las aceleraciones máximas que se registran.

La fórmula de la Ec. (7), por ser un estimador estadístico de la función del valor esperado de las aceleraciones horizontales máximas de Sudamérica

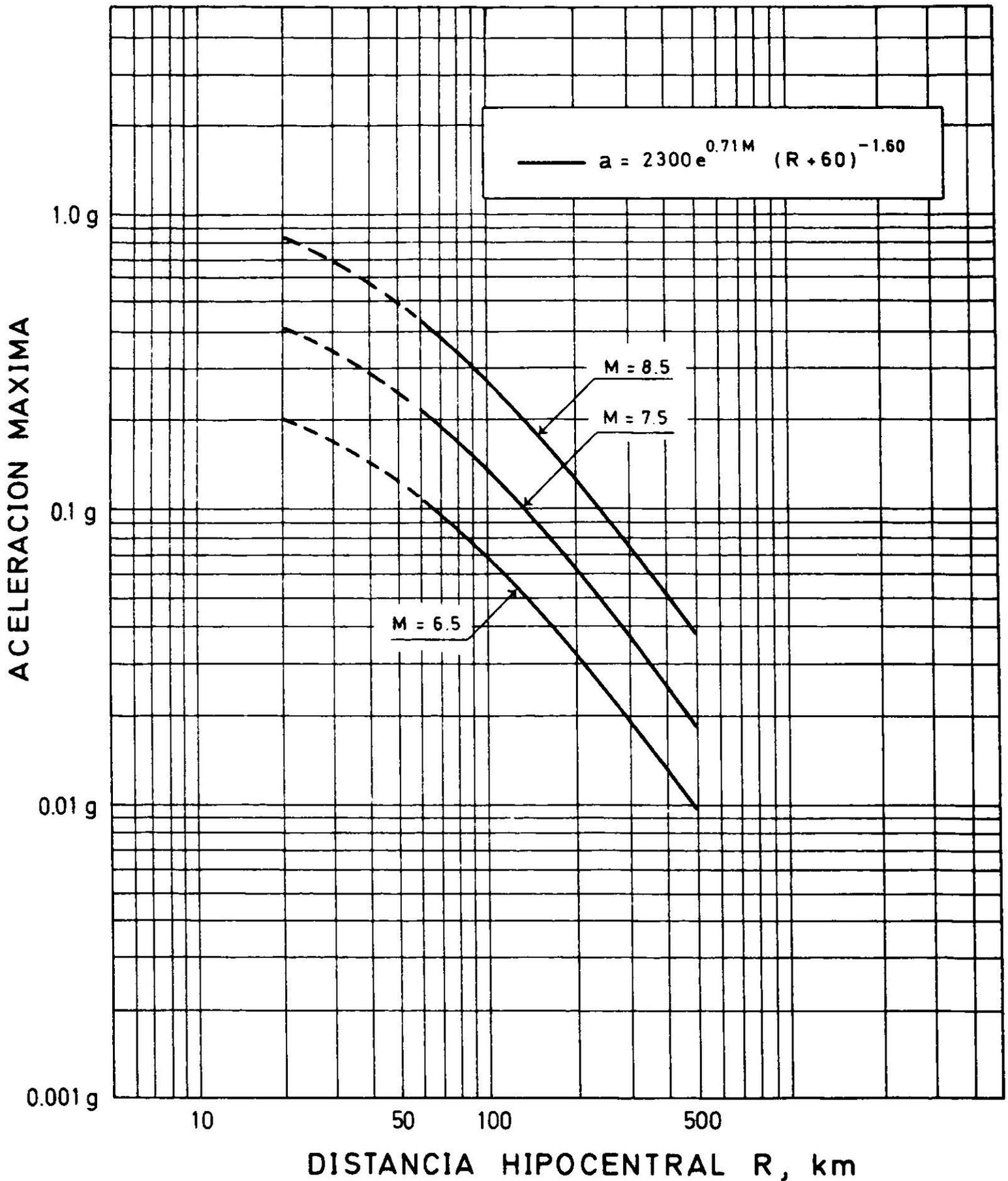


Fig. 7. Curvas de atenuación de las aceleraciones horizontales máximas en suelos duros para Chile.

en suelos duros, no es única. Existe por ello siempre la posibilidad de que otras fórmulas que den resultados similares en el ámbito de interés de los parámetros R y M sean también buenos estimadores de $a_{\text{máx}}$.

COMPARACION DE LA FORMULA DE ATENUACION DE LAS ACELERACIONES HORIZONTALES MAXIMAS EN SUELOS DUROS PARA CHILE CON OTRAS FORMULAS DE ATENUACION

En esta sección se compara la fórmula de atenuación de las aceleraciones horizontales máximas obtenidas para Chile en suelos duros con las propuestas

por otros autores para temblores producidos por diferentes tipos de mecanismos sísmicos.

En la Fig. 8 se compara la curva de atenuación propuesta con la deducida por Donovan¹⁷, para sismos de mecanismos transcurso. La fórmula para Chile aparece indicada con línea llena, en tanto que la de Donovan aparece indicada con línea de punto y segmento. Ambas fórmulas dibujadas para $M = 6.5; 7.5$ y 8.5 aparecen dibujadas de segmento para $R < 60$ km porque no hay datos en ese rango.

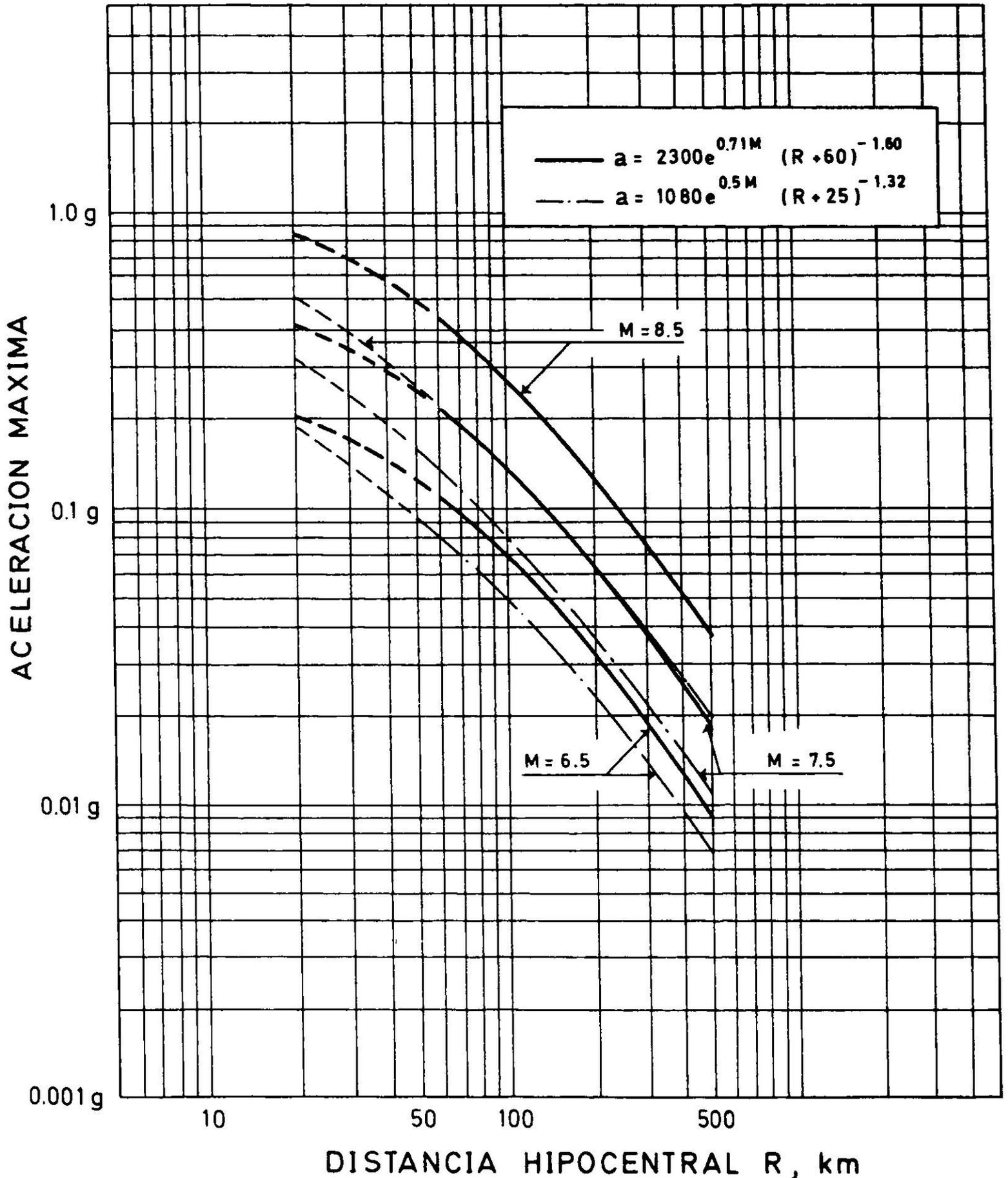


Fig. 8. Comparación de las curvas de atenuación de las aceleraciones horizontales máximas en suelos duros para Chile con las propuestas por Donovan¹⁷ para sismos de mecanismo transcurso.

De la comparación se concluye que las fórmulas de atenuación deducidas a partir de datos transcurivos, tales como la propuesta por Donovan, subestiman notablemente las aceleraciones, especialmente en el ámbito de las mayores magnitudes de Richter.

En la Fig. 9, se compara la curva de atenuación propuesta con la obtenida por Patwardhan et al¹⁵ para sismos de mecanismo transcurivo (superficial). La conclusión que se obtiene es la misma que la obtenida para la fórmula de Donovan.

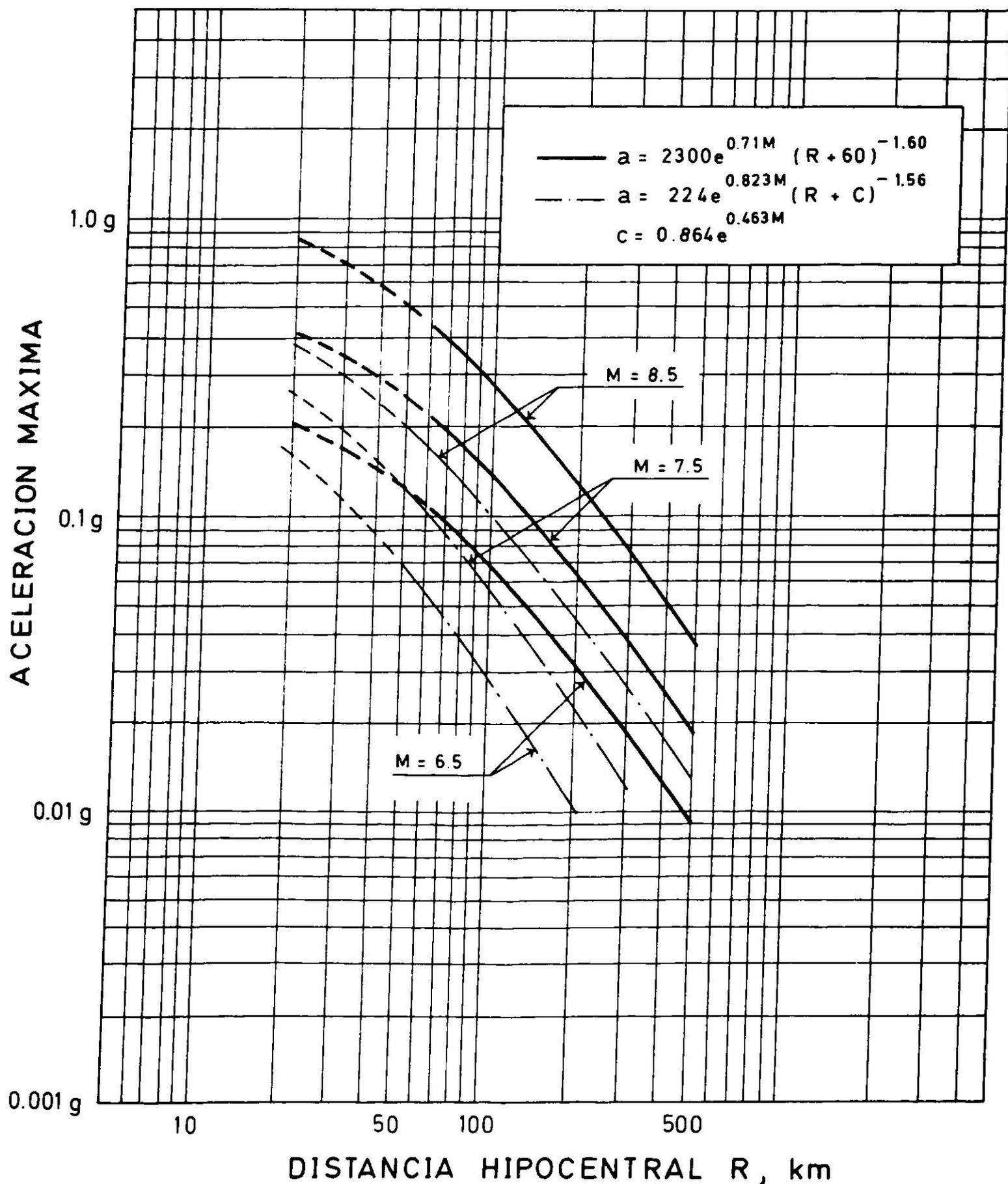


Fig. 9. Comparación de las curvas de atenuación de las aceleraciones horizontales máximas en suelos duros para Chile con las propuestas por Patwardhan et al¹⁵ para sismos de mecanismo transcurivo.

En la Fig. 10 se hace la comparación con la fórmula propuesta para sismos de mecanismo subductivo por Patwardhan et al¹⁴.

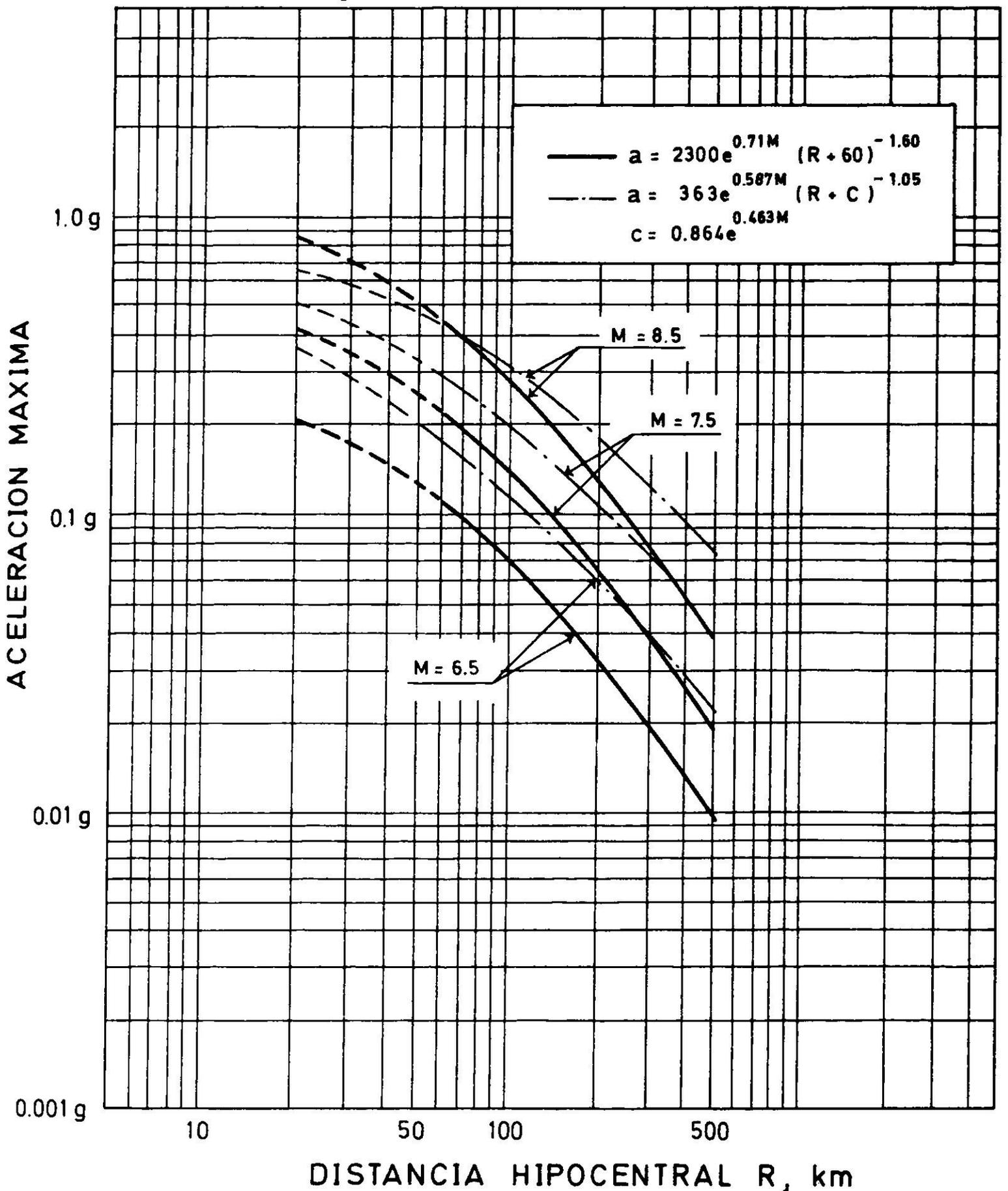


Fig. 10. Comparación de las curvas de atenuación de las aceleraciones horizontales máximas en suelos duros para Chile con las propuestas por Patwardhan et al¹⁵ para sismos de mecanismo subductivo.

Las curvas de Patwardhan et al¹⁵ para $M = 6.5; 7.5$ y 8.5 aparecen mostradas de segmento y punto, en tanto que las de la fórmula del presente estudio aparecen indicadas con línea llena. De la comparación se concluye que la fórmula de Patwardhan et al, subestimaré las aceleraciones para $M = 8.5$ en el rango de los $R < 150$ km, en general subestimaré las aceleraciones para $M = 6.5$ y para todas las magnitudes para $R > 150$ km.

De la comparación de la curva de atenuación de aceleraciones máximas obtenidas para Chile en suelos duros con otras curvas de atenuación similares propuestas se concluye que las aceleraciones máximas horizontales que se producen en Chile por interacción entre placas de acreción son mayores que las que se producen en zona de interacción de transcurción (Costa Oeste de los E.U.A., sin incluir Alaska) para una misma magnitud de Richter.

Otra conclusión importante de esta comparación es que las aceleraciones máximas que se producen en Chile en suelos duros se atenúan según leyes diferentes a las que afectan las aceleraciones de mecanismos transcurivos (Costa Oeste de los E.U.A., sin incluir Alaska) y subductivo (Archipiélago del Japón). Con respecto a este último caso las aceleraciones máximas en Chile se atenúan más rápidamente con la distancia hipocentral que en el caso de Japón.

Debe notarse también que la fórmula de atenuación de aceleraciones horizontales máximas que se propone ha sido obtenida con un número similar al empleado en otros estudios (56 datos) distribuidos adecuadamente en cuanto a intervalos de magnitud de Richter, así es que no hay dudas de que las aceleraciones horizontales máximas en suelos duros en Chile pueden ser el doble de las obtenidas en zonas de mecanismos de interacción intraplaca de tipo transcurivo. Es más, en el caso del Perú, debido al mencionado efecto Doppler, puede llegar esta relación a ser bastante mayor.

El hecho de que en la costa occidental de Sudamérica se registren aceleraciones horizontales máximas sistemáticamente mayores que en la costa occidental de los E.U.A. induciría a pensar que los sismos que se producen en Sudamérica son notablemente más destructivos que los norteamericanos. Sin embargo, del análisis de 945 datos de intensidad de Mercalli Modificada informados por Kausel y Barrientos¹⁸ se observa que ellos no superan en general el grado X. Por consiguiente los terremotos que se producirán en esta región son similares o menos destructivos que los que se producen en E.U.A.

Por este motivo no parece adecuado el uso en Chile, Perú y Argentina de la aceleración horizontal máxima como único criterio en el estudio del riesgo sísmico de obras civiles de gran envergadura o en la elección del coeficiente sísmico básico C_0 , pues ella no tiene el mismo significado comparativo que en el caso de las zonas de transcurción.

COMPARACION CON OTRAS FORMULAS DE ATENUACION PARA LAS ACCELERACIONES HORIZONTALES MAXIMAS EN SUELOS DUROS EN CHILE

Goldsack y colaboradores²⁰ dedujeron la siguiente fórmula de atenuación para las aceleraciones horizontales máximas registradas en suelos duros en Chile:

$$a_{\text{máx}} = \frac{4920 e^{0.8M}}{(R_1 + 25)^2} \text{ (cm/s}^2\text{)}$$

con $R_1 = \sqrt{D^2 + H^2 + 20^2}$ en km
 D = distancia epicentral en km
 H = profundidad focal en km

En la Fig. 11 se compara la fórmula de atenuación de la Ec. (8) para $M = 6.5$; 7.5 y 8.5 con la obtenida en este trabajo. La fórmula de la Ec. (8) aparece en esta figura mostrada de segmentos y puntos en tanto que la obtenida en este estudio aparece mostrada con línea llena. De la comparación se concluye que la fórmula de Goldsack y colaboradores²⁰ da resultados similares a la obtenida en este estudio en el intervalo $60 < R < 100$ km, en que hay datos empíricos.

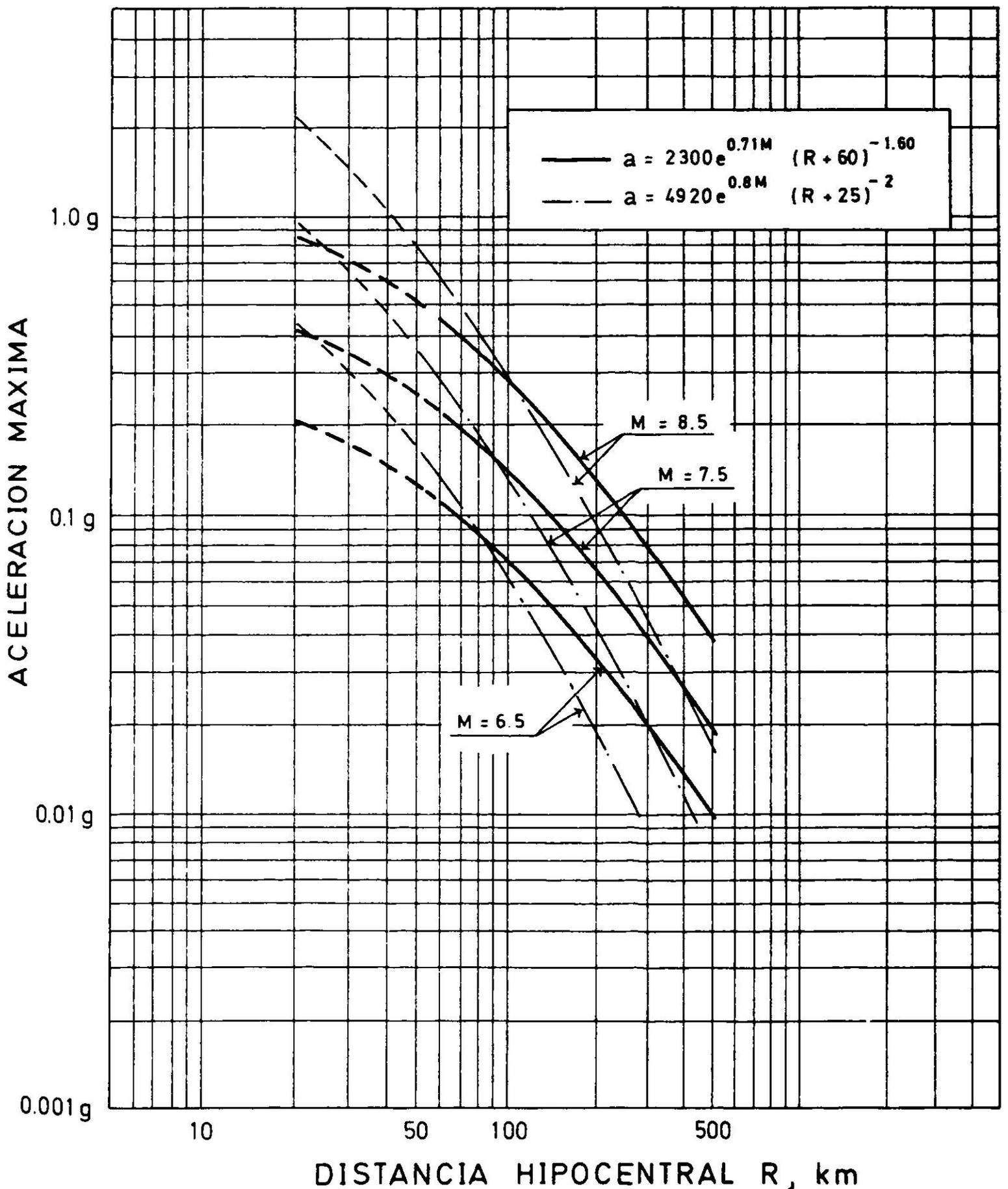


Fig. 11. Comparación de las curvas de atenuación de las aceleraciones horizontales máximas de suelos duros para Chile propuestas en este trabajo con las propuestas por Goldsack et al²⁰.

Sin embargo la fórmula de la Ec. (8) subestima las aceleraciones máximas para distancias hipocentrales $R > 100$ km y sobrestima para $R < 60$ km.

CORRELACION ENTRE ACELERACIONES HORIZONTALES MAXIMAS E INTENSIDADES DE MERCALLI MODIFICADA

En esta sección se establece una fórmula de correlación entre las intensidades de Mercalli Modificada y las aceleraciones máximas registradas en el lugar en que se informan las intensidades.

Los valores empleados en el estudio son 36. En este grupo se ha incluido un registro obtenido recientemente en Arequipa, Perú, el 16 de febrero de 1979. Este registro no fue considerado en las secciones precedentes por no disponerse de él al momento de realizar el estudio. Sin embargo, por sus características, el registro de Arequipa corresponde a los obtenidos en Lima en 1966, 1970 y 1971 que no fueron considerados posteriormente en el estudio por efecto Doppler de las ondas sísmicas. La distribución de los datos en representación semilogarítmica se muestra en la Fig. 12. En esta figura se han separado los datos registrados en roca de los obtenidos en suelo aluvional. De la distribución de ambos tipos de datos no se observa una tendencia manifiesta que permita separarlos en dos grupos. Debe tenerse presente, eso sí, que el número de datos obtenidos en roca es bastante limitado.

Considerando todos los datos como un solo universo, se obtiene la siguiente fórmula de correlación.

$$\log a_{\text{máx}} = \frac{I}{2.9} - \frac{1}{4.5} \quad 9$$

donde:

I = Intensidad de Mercalli Modificada

$a_{\text{máx}}$ = Aceleración máxima horizontal medida en cm/s^2

Esta fórmula es similar en su estructura a la establecida por Richter¹⁹, a partir de datos de California.

$$\log a_{\text{máx}} = \frac{I}{3} - \frac{1}{2} \quad 10$$

En la Fig. 12 se compara la recta de regresión obtenida para Sudamérica Ec. (9), con la obtenida por Richter para California, Ec. (10).

Se concluye de esta comparación que los sismos sudamericanos para el mismo nivel de destructividad observada o intensidad de Mercalli Modificada, tienen aceleraciones máximas más elevadas que los de California. Según las fór-

mulas que se comparan, las aceleraciones que se registran en Chile son aproximadamente un 90% más altas que las registradas en California para la misma intensidad de Mercalli Modificada.

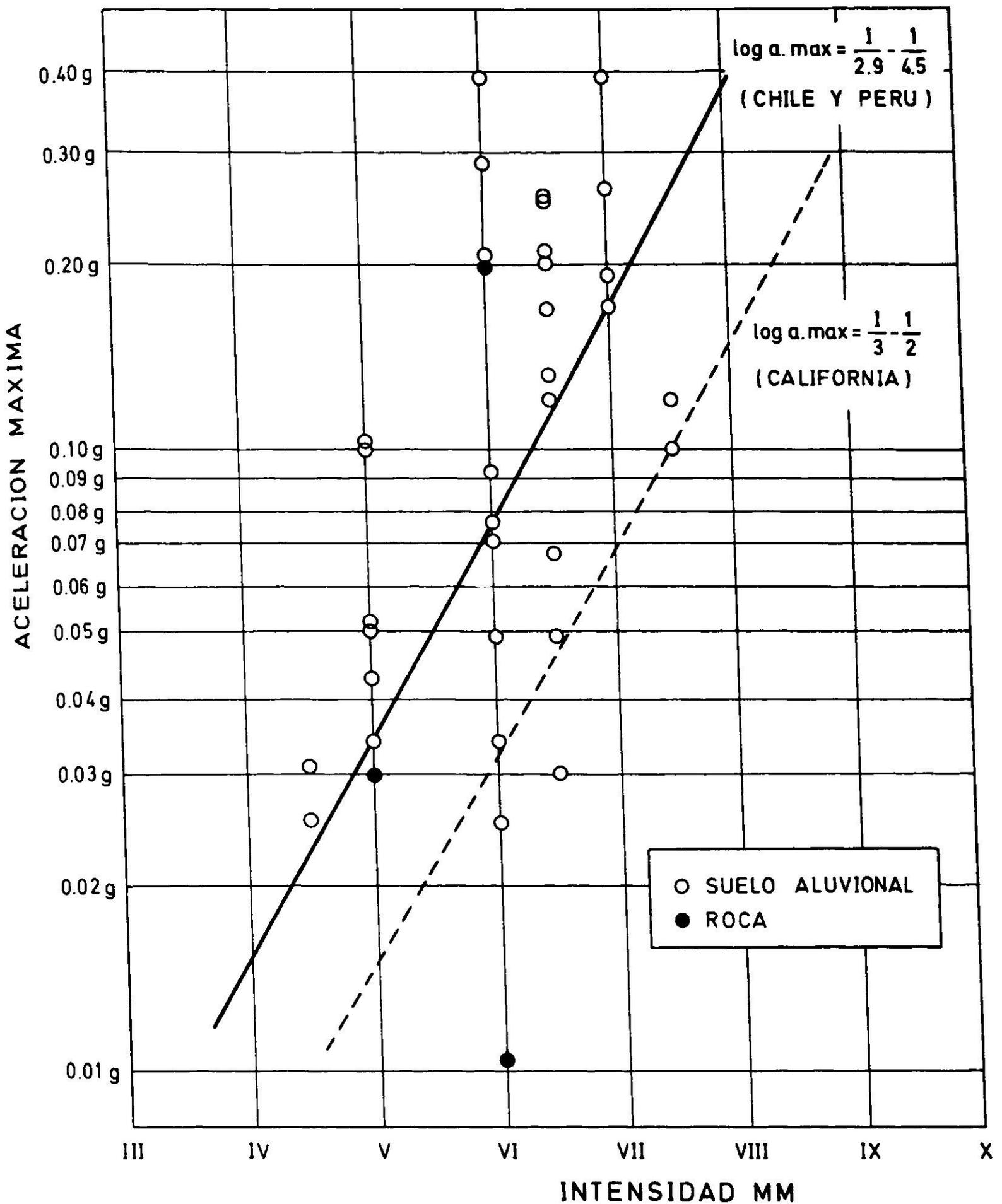


Fig. 12. Correlación de aceleraciones horizontales máximas con intensidades de Mercalli Modificada (IMM) y comparación con datos.

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

1. Las aceleraciones horizontales máximas que se producen en Chile en suelos duros por interacción de acreción de la placa de Nazca con la Americana

son mayores que las que se producen en zonas de interacción de transcurción (Costa Oeste de los E.U.A.) para una misma magnitud de Richter y distancia hipocentral.

2. Las aceleraciones horizontales máximas registradas en Chile son aproximadamente un 90% más altas que las registradas en zonas de transcurción, para un mismo grado de intensidad de Mercalli o destructividad.
3. Las aceleraciones máximas horizontales que se producen en Chile en suelos duros se atenúan según leyes diferentes a las que afectan las aceleraciones de mecanismo transcurcivo (Costa Oeste de los E.U.A.) y subductivo (archipiélago del Japón).
4. La fórmula de atenuación de las aceleraciones horizontales máximas ha sido estimada con un número de datos similar al empleado en otros estudios distribuidos adecuadamente en cuanto a rango de magnitud de Richter.
5. La fórmula de atenuación de aceleraciones máximas es válida para toda la costa de Chile que interactúa con la placa de Nazca. No es por consiguiente válida al sur de la península de Taitao, por existir otros tipos de interacción entre placas.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte de una asesoría clasificada realizada por el primero de los autores para la Comisión Chilena de Energía Nuclear. Considerando la gran importancia que él tiene para la Ingeniería Sísmica nacional, la Comisión Chilena de Energía Nuclear ha accedido posteriormente a que los resultados sean publicados en la Revista del IDIEM, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Los autores desean manifestar sus agradecimientos al Dr. Daniel Huaco del Instituto Geofísico del Perú por los antecedentes de sismos peruanos que aportara a este estudio.

BIBLIOGRAFIA

1. LOMNITZ, C. Global tectonics and earthquake risk. *Developments in Geotectonics 5*, Elsevier Scientific Publishing Company.
2. SARAGONI, G.R.; CREMPIEN, J. y ARAYA, R. *Características de los movimientos sísmicos fuertes de Chile*, Publicación SES I 2/81 (164), Sección Ingeniería Estructural, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 1981.
3. U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. *United States Earthquakes*, Washington, D.C. 1945 - 1958.

4. HUSID, R. *Terremotos: Análisis espectral y características de acelerogramas como base del diseño sísmico*. Ed. Andrés Bello, Santiago, Chile, 1970.
5. SARAGONI, G.R. *Análisis de la Interacción Dinámica Suelo-Estructura*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, 1968.
6. Sección Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
7. PEREIRA, M.L.; CREMPIEN, J. y SARAGONI, G.R. Estudio e instalación de una red local de acelerógrafos de alta densidad en una placa de subducción fracturada, *XX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*, Córdoba, Argentina, julio 1979.
8. INSTITUTO NACIONAL DE PREVENCION SISMICA. *El terremoto de San Juan del 23 de noviembre de 1977*, Informe Preliminar, San Juan, Argentina, diciembre 1977.
9. U.S. GEOLOGICAL AND GEODETIC SURVEY. *Strong motion earthquake accelerograms digitization and analysis, 1971 records*, Report julio 1976.
10. BRADY, A.G. y PEREZ, V. *Strong motion earthquake accelerograms digitization and analysis: Records from Lima, Perú: 1951 to 1974*. U.S. Geological Survey, Menlo Park, California 1977.
11. CLOUD, W.K. y PEREZ, V. Unusual accelerograms recorded at Lima, Perú. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 61:3, 1971.
12. KNUDSON, Ch.F. y PEREZ, V. Accelerograph records from Lima, Perú, *Proceedings 6 World Conference on Earthquake Engineering*, vol. 3, Nueva Delhi, India, enero 1977.
13. SILGADO, E. Sismicidad de la región occidental de la América del Sur entre los paralelos 2° y 18° latitud sur. *I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Lima Perú, septiembre 1969.
14. CHAVEZ, J. y HUACO, D. Regionalización sísmica del Perú mediante intensidades, *Reunión Andina de Seguridad Sísmica*, Lima, Perú, agosto 1975.
15. PATWARDHAN, A.; SADIGH, K.; IDRIS, I.M. y YOUNG, R. Attenuation of strong ground motion — Effect of site conditions, transmission path characteristics and focal depths, (en prensa para envío al *Bulletin of the Seismological Society of America* para posible publicación).
16. ESTEVA, L. y ROSENBLUETH, E. Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes, *Primeras Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Santiago, Chile, julio 1963.
17. DONOVAN, N.C. A Statistical evaluation of strong motion data including the february 9, 1971 San Fernando Earthquake, *Proceedings, Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Roma 1973.
18. KAUSEL, E. y BARRIENTOS, S. *Regionalización sísmica de Chile*. Informe Departamento de Geofísica y Sismología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
19. RICHTER, C.F. *Elementary seismology*, W.H. Freeman, 1958.
20. GOLDSACK, A.; LABBE, J.C. y SARAGONI, G.R. Algunas relaciones macrosísmicas para la evaluación del riesgo sísmico en Chile. *Segunda Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, julio 1976, Santiago, Chile.

EMPIRICAL CHARACTERISTICS OF SOUTHAMERICAN EARTHQUAKES

SUMMARY

Attenuation formulas for strong ground motion of the West Coast of Southamerica are derived, using most of the accelerograms recorded in the last 24 years.

A demonstration that the number of events available is equivalent or even greater than those used in similar studies carried out for other parts of the world is made. The attenuation formulas are derived for maximum peak acceleration in terms of Richter Magnitude and hipocentral distance and for maximum peak acceleration in terms of Modified Mercalli intensity.

Using those expressions, a comparison is made between earthquake recorded in Chile with those of other zones of the world.