UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SECCION DE POSTGRADO

XIX SIMPOSIO INTERNACIONAL

"ÚLTIMOS AVANCES EN LA INGENIERÍA SÍSMICA Y GESTIÓN DEL RIESGO DE LOS DESASTRES"

En honor al Profesor YUJI ISHIYAMA

ACTUALIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS SISMOLÓGICOS EN LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN EL PERÚ

Dr. Ing. Jorge E. Alva Hurtado
Ing. Miriam R. Escalaya Advíncula

CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACIONES SISMICAS Y MITIGACION DE DESASTRES

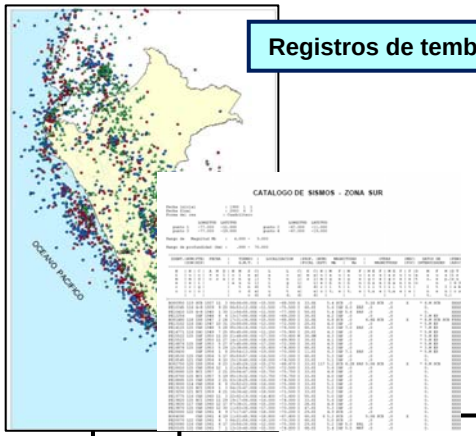
CONTENIDO

- INTRODUCCIÓN
- FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO
- EVALUACIÓN DE FUENTES SISMOGÉNICAS
- EVALUACIÓN DE LA RECURRENCIA SÍSMICA
- LEYES DE ATENUACIÓN
- DETERMINACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO
- CONCLUSIONES

FUNDAMENTOS DEL ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO

El método de Cornell

Registros de temblores



Relación de atenuación

$$\ln A = c_1 + c_2 M + c_3 \ln r + c_4 r + c_5 S + \ln \varepsilon$$

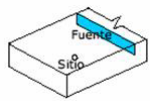
Distribución de Poisson

$$p_t(n) = \frac{(Nt)^n e^{-Nt}}{n!}$$

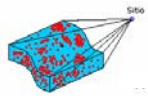
Modelo de fuentes generadoras:

- Fuente en un punto

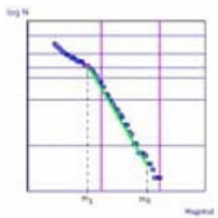
- Fuente en una línea



- Fuente en una área

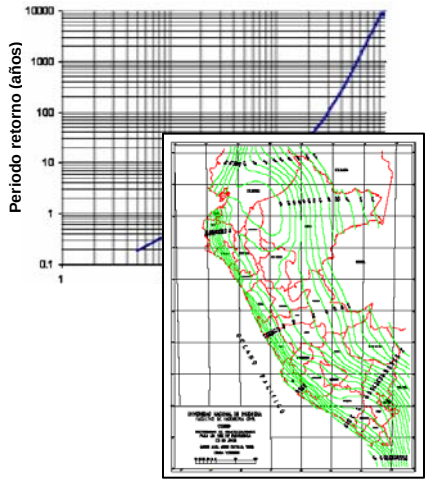


Relación Gutenberg-Richter



$$\log N = a - bM$$

Análisis Probabilístico



EVALUACIÓN DE FUENTES SISMOGÉNICAS

- En el presente trabajo se ha realizado una revisión de la actividad sísmica del pasado, reafirmando la definición de las fuentes sismogénicas presentada por Castillo (1993).

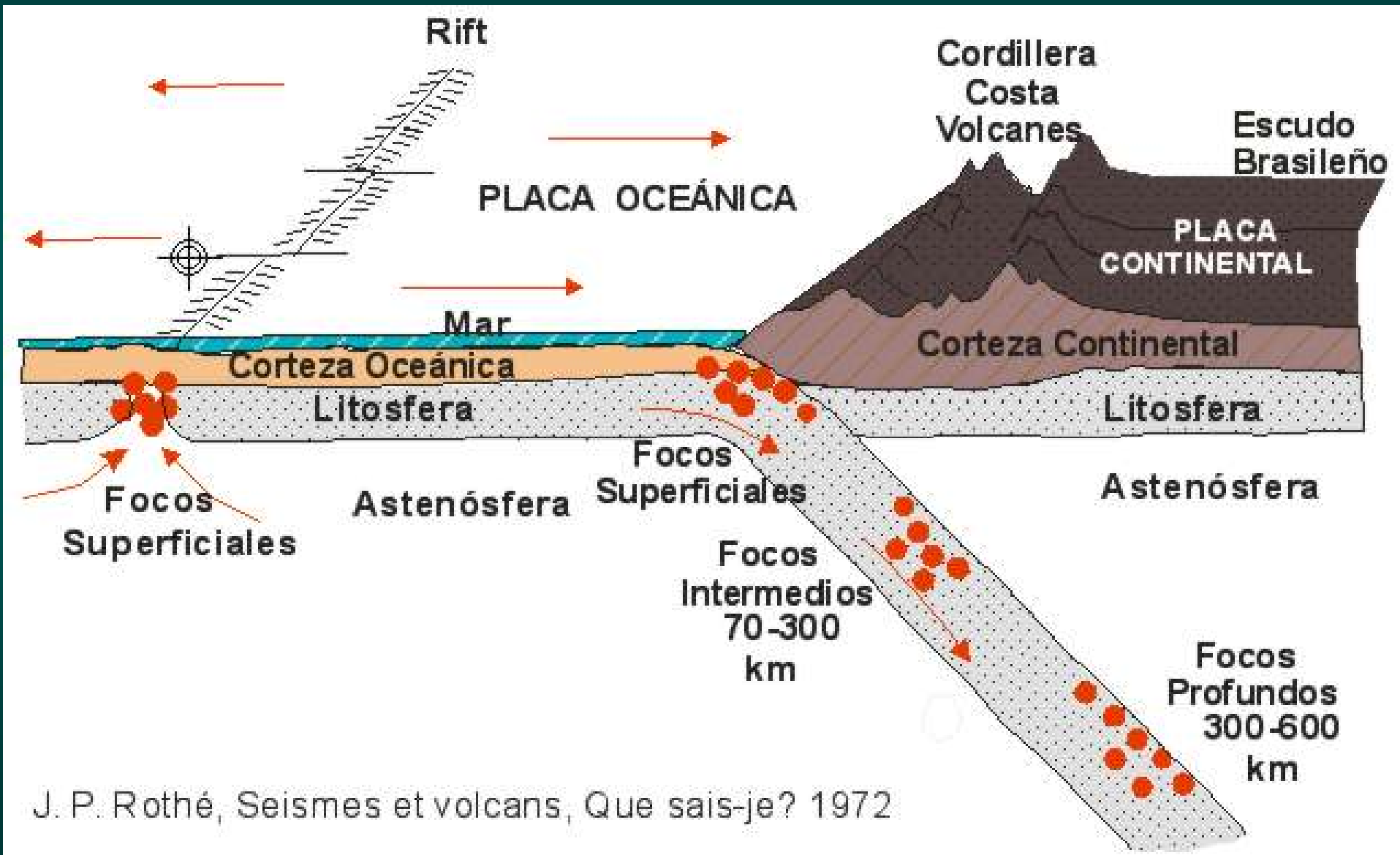
- La determinación de estas fuentes se basó en las **características tectónicas de nuestro país**, así como en el **mapa de distribución de epicentros**, agrupándose en Fuentes de Subducción y Fuentes Continentales.

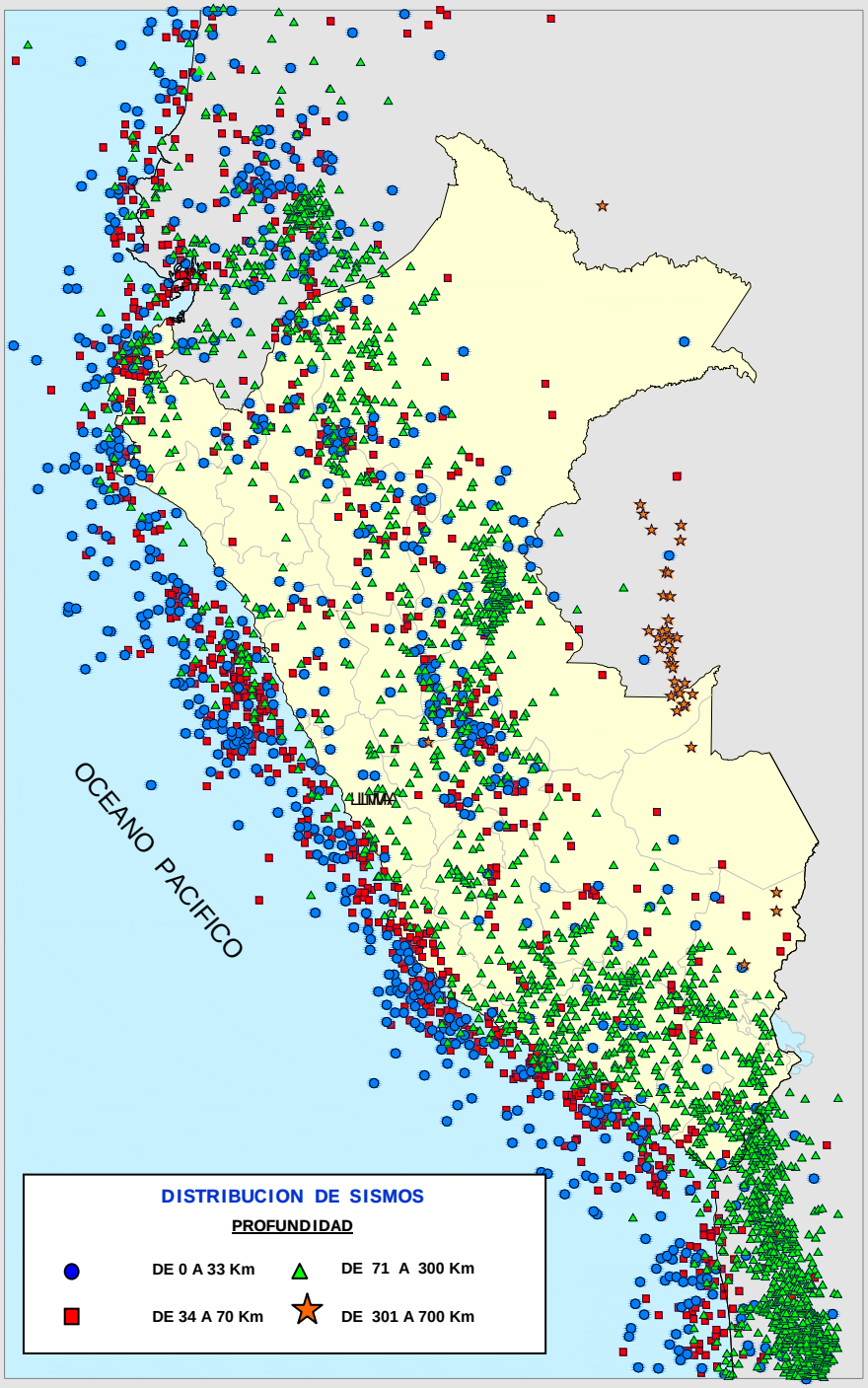
- Las Fuentes de Subducción modelan la interacción de las placas Sudamericana y de Nazca.

- Las Fuentes Continentales están relacionadas con la actividad superficial andina.

CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS

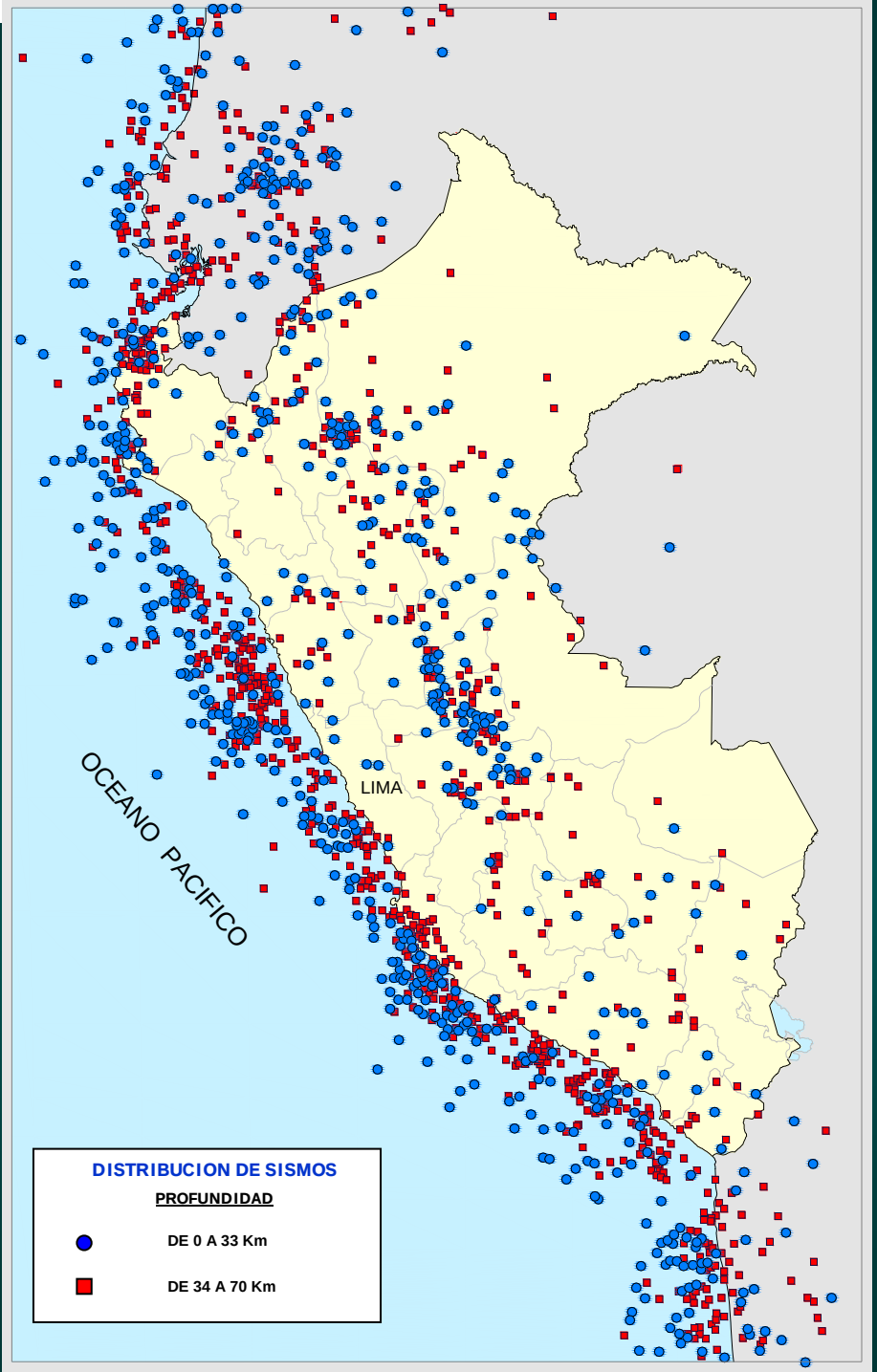
ESQUEMA DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN EN PERÚ, MOVIMIENTO DE PLACAS Y DISTRIBUCIÓN DE SISMOS





MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE HIPOCENTROS

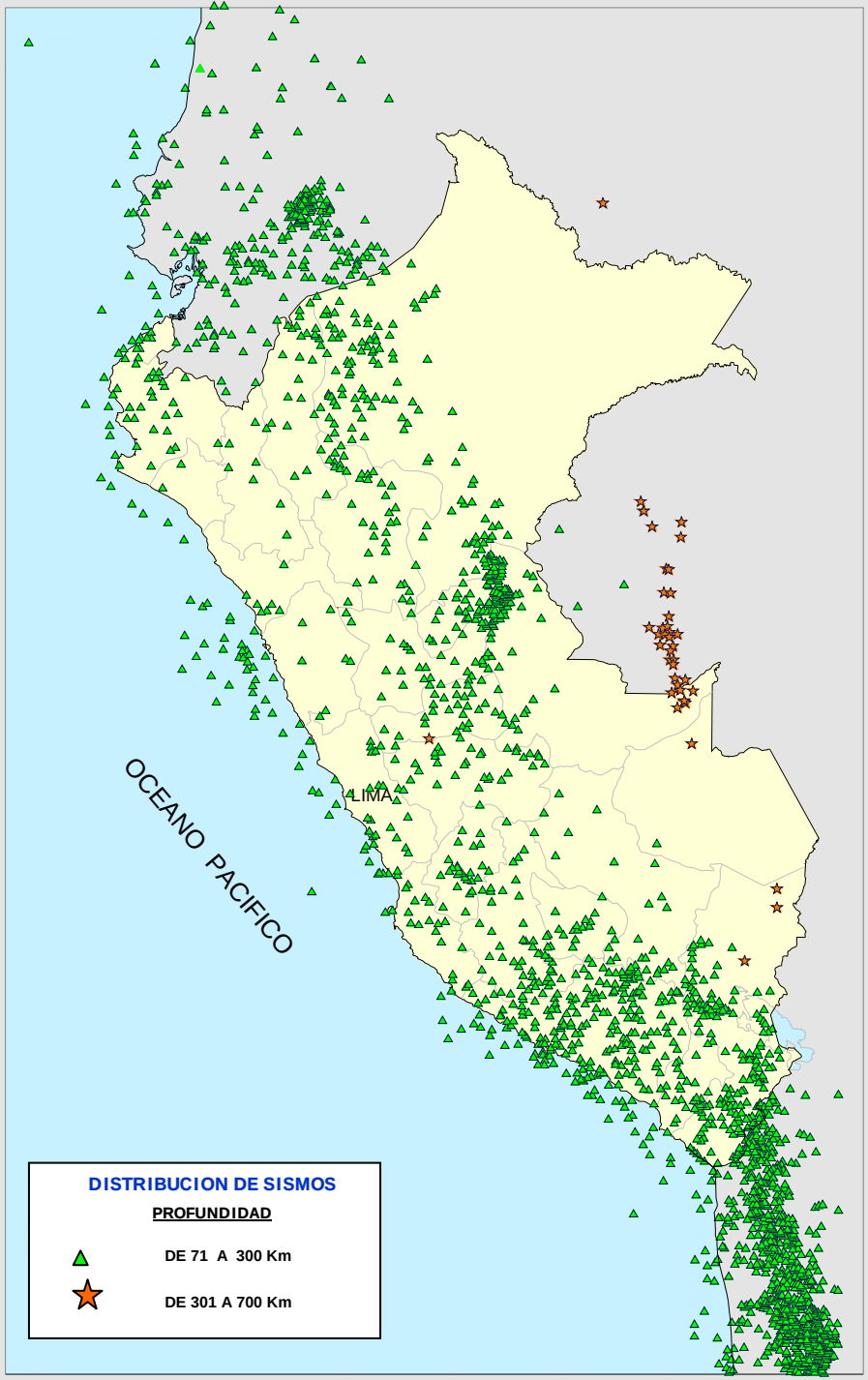
(Castillo, 1993)



SISMICIDAD SUPERFICIAL

0-70 Km

(Castillo, 1993)



SISMICIDAD INTERMEDIA

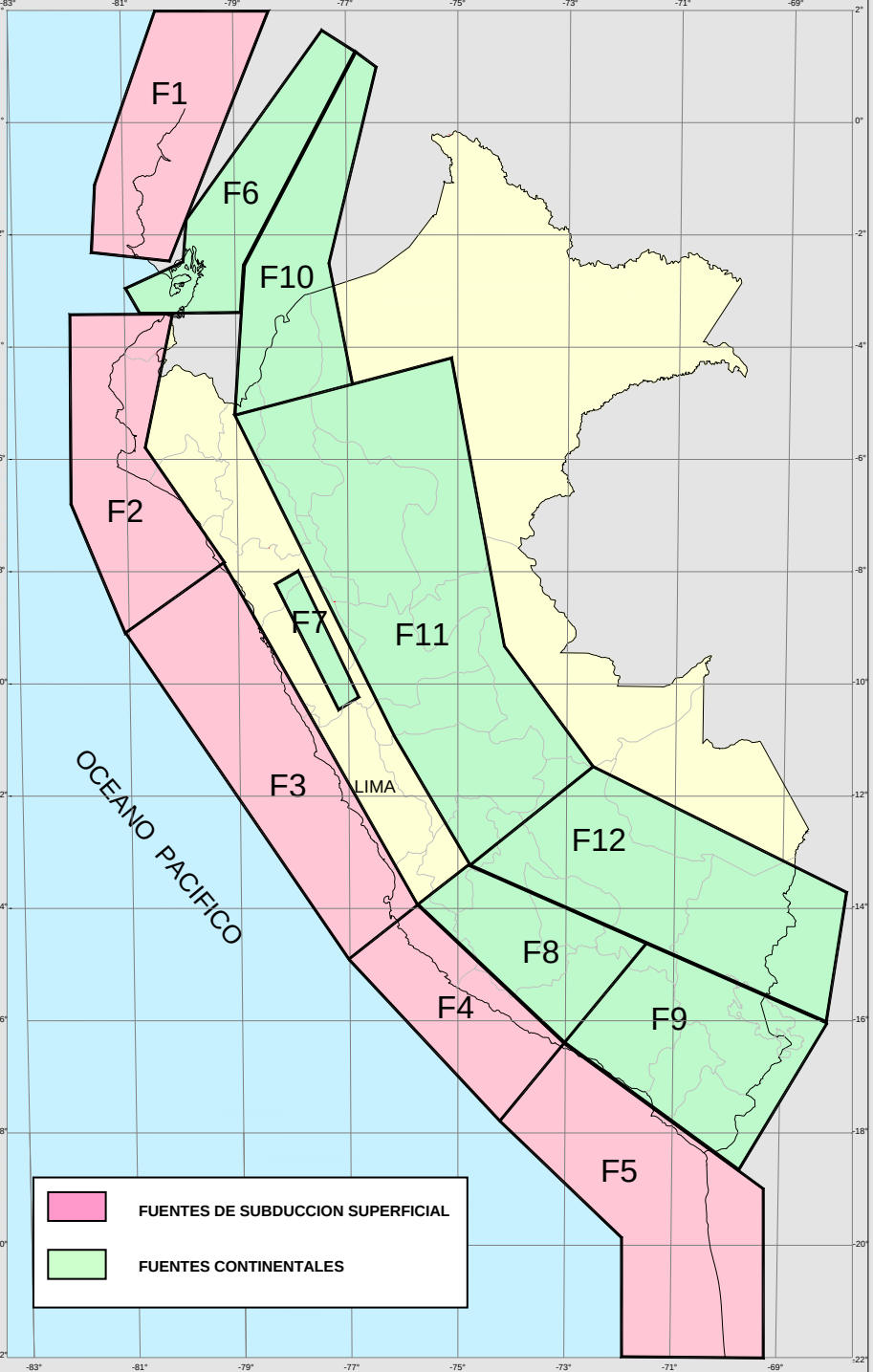
71 - 300 Km

Y

SISMICIDAD PROFUNDA

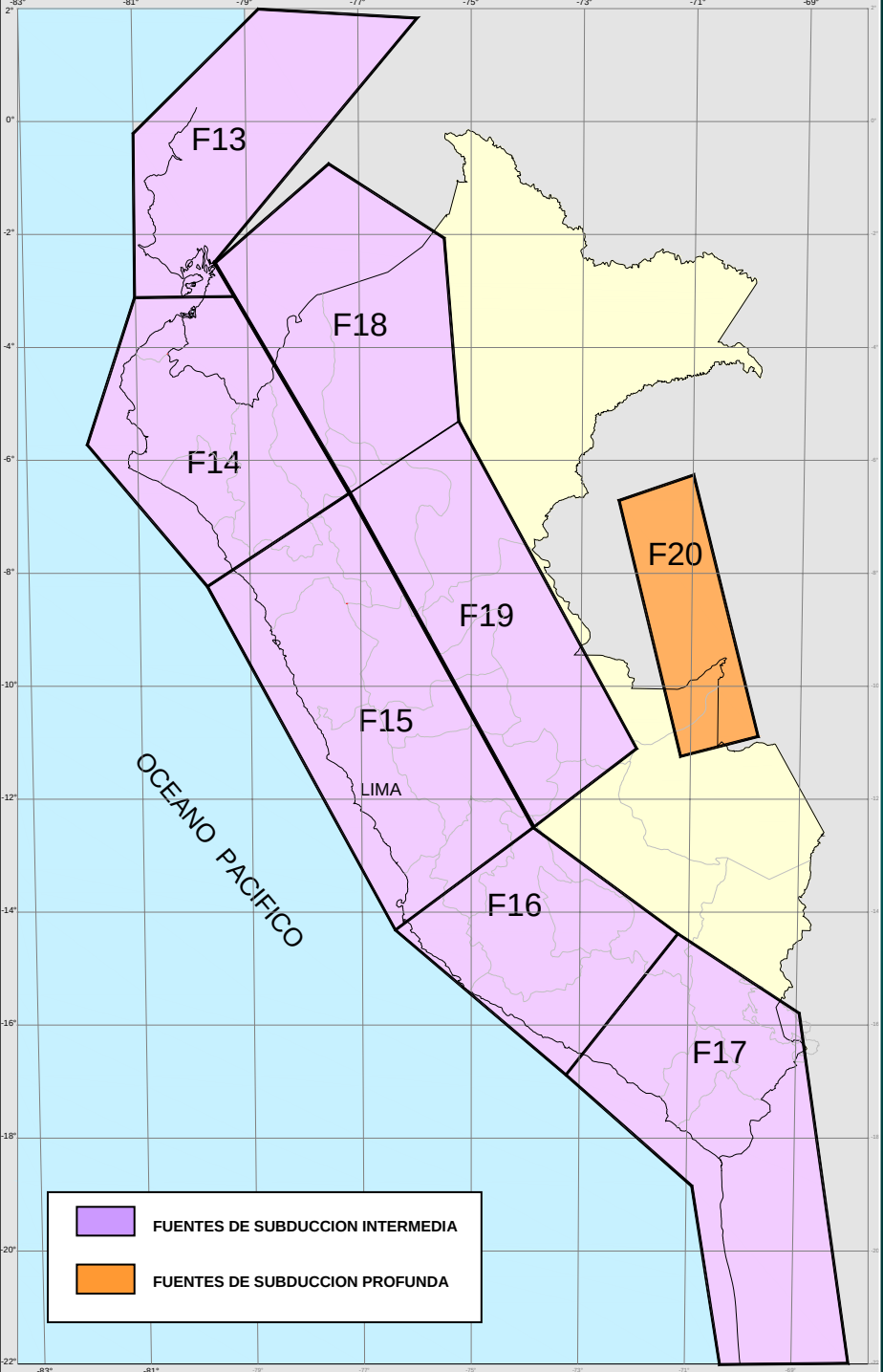
301 - 700 Km

(Castillo, 1993)



FUENTES SISMOGÉNICAS DE SUBDUCCIÓN SUPERFICIALES Y CONTINENTALES

(Castillo, 1993)



FUENTES SISMOGÉNICAS DE SUBDUCCIÓN INTERMEDIA Y PROFUNDA

(Castillo, 1993)

COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LAS FUENTES DE SUBDUCCIÓN SUPERFICIALES Y DE LAS FUENTES CONTINENTALES

FUENTES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS (°)			
FUENTE 1	-80.29 -81.39 -81.52	+02.00 -00.97 -02.39	-78.32 -79.65 -80.19	+02.00 -01.21 -02.50
FUENTE 2	-82.00 -82.00 -81.17	-03.39 -06.83 -09.00	-80.17 -80.67 -79.27	-03.45 -05.42 -07.90
FUENTE 3	-81.17 -77.00	-09.00 -14.80	-79.27 -75.84	-07.90 -13.87
FUENTE 4	-77.00 -74.16	-14.80 -17.87	-75.84 -73.00	-13.87 -16.53
FUENTE 5	-74.16 -71.85 -71.85	-17.87 -19.87 -22.00	-73.00 -69.21 -69.21	-16.53 -19.00 -22.00
FUENTE 6	-77.50 -79.83 -79.96 -80.92	+01.58 -01.65 -02.46 -02.96	-76.92 -78.90 -78.97 -80.79	+01.19 -02.53 -03.43 -03.44
FUENTE 7	-78.28 -77.21	-08.20 -10.47	-77.86 -76.83	-08.07 -10.23
FUENTE 8	-75.84 -73.00	-13.87 -16.53	-74.76 -71.41	-13.13 -14.67
FUENTE 9	-73.00 -69.71	-16.53 -18.67	-71.41 -68.12	-14.67 -16.13
FUENTE 10	-76.92 -78.90 -79.10	+01.19 -02.53 -05.20	-76.50 -77.35 -77.00	+ 01.00 -02.40 -04.77
FUENTE 11	-79.10 -76.34 -74.76	-05.20 -10.67 -13.13	-75.10 -74.17 -72.48	-04.33 -09.33 -11.40
FUENTE 12	-74.76 -68.12	-13.13 -16.13	-72.48 -67.76	-11.40 -13.80

COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LAS FUENTES DE SUBDUCCIÓN INTERMEDIAS Y PROFUNDAS

FUENTES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS (°)			
FUENTE 13	-78.73 -81.00 -81.00	+02.00 -00.67 -03.07	-76.00 -79.59 -79.20	+01.82 -02.55 -03.07
FUENTE 14	-81.00 -81.93 -79.80	-03.07 -05.73 -08.13	-79.20 -78.60 -77.17	-03.07 -04.00 -06.53
FUENTE 15	-79.80 -76.38	-08.13 -14.30	-77.17 -73.86	-06.53 -12.46
FUENTE 16	-76.38 -73.28	-14.30 -16.87	-73.86 -71.21	-12.46 -14.40
FUENTE 17	-73.28 -70.86 -70.38	-16.87 -18.80 -22.00	-71.21 -68.93 -67.98	-14.40 -15.73 -22.00
FUENTE 18	-79.59 -78.60 -77.17	-02.55 -04.00 -06.53	-77.50 -75.51 -75.27	-00.73 -02.06 -05.33
FUENTE 19	-77.17 -73.86	-06.53 -12.46	-75.27 -72.03	-05.33 -11.13
FUENTE 20	-72.31 -71.14	-06.67 -11.30	-71.00 -69.69	-06.33 -10.93

EVALUACIÓN DE LA RECURRENCIA SÍSMICA

Para cuantificar *la* ***relación de recurrencia*** de la actividad sísmica de la zona en estudio se utilizó la expresión propuesta originalmente por Ishimoto-Ida en 1939 y posteriormente adecuada por Richter (1958).

$$\mathbf{Log\ N = a - bM}$$

donde:

N = número de sismos de magnitud M o mayor por unidad de tiempo.

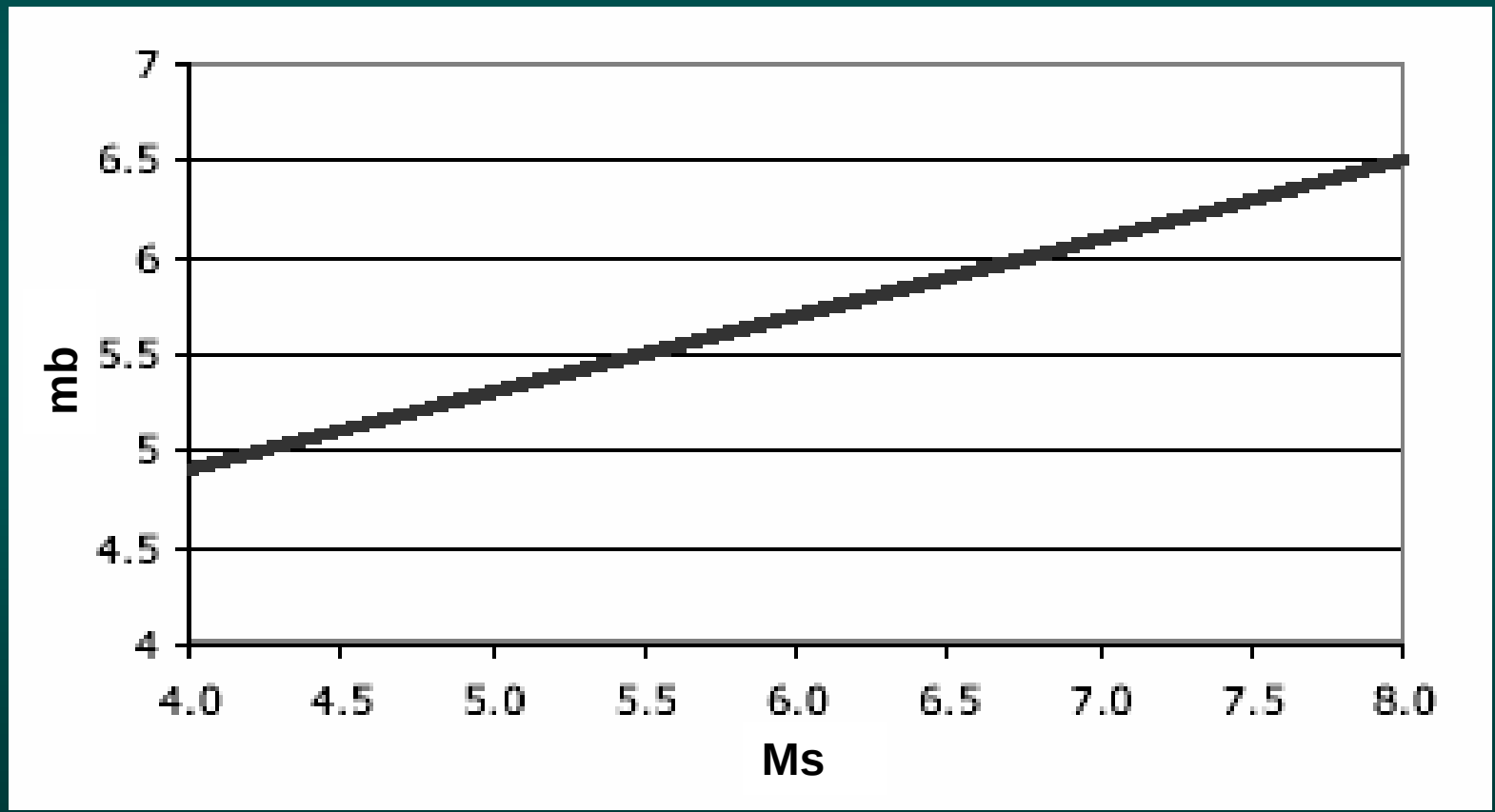
a,b = parámetros que dependen de la región y son constantes determinadas de una regresión no-lineal del catálogo de sismicidad local.

Para la determinación de a y b se usó el método de mínimos cuadrados

Para la obtención de los parámetros a y b es necesario que la base de datos disponible esté completa y lo más actualizada posible, por tal motivo se utilizó datos sismológicos desde el año 1963 al año 2003. La información sismológica fue obtenida del catálogo sísmico del Proyecto SISRA (1985) hasta el año 1992 con los datos verificados publicados por el ISC (Internacional Seismological Centre) y actualizados hasta el año 2003 por el IGP (2003).

CORRELACIÓN DE MAGNITUDES mb Y Ms (Castillo , 1993)

mb = 3.30 + 0.40 Ms

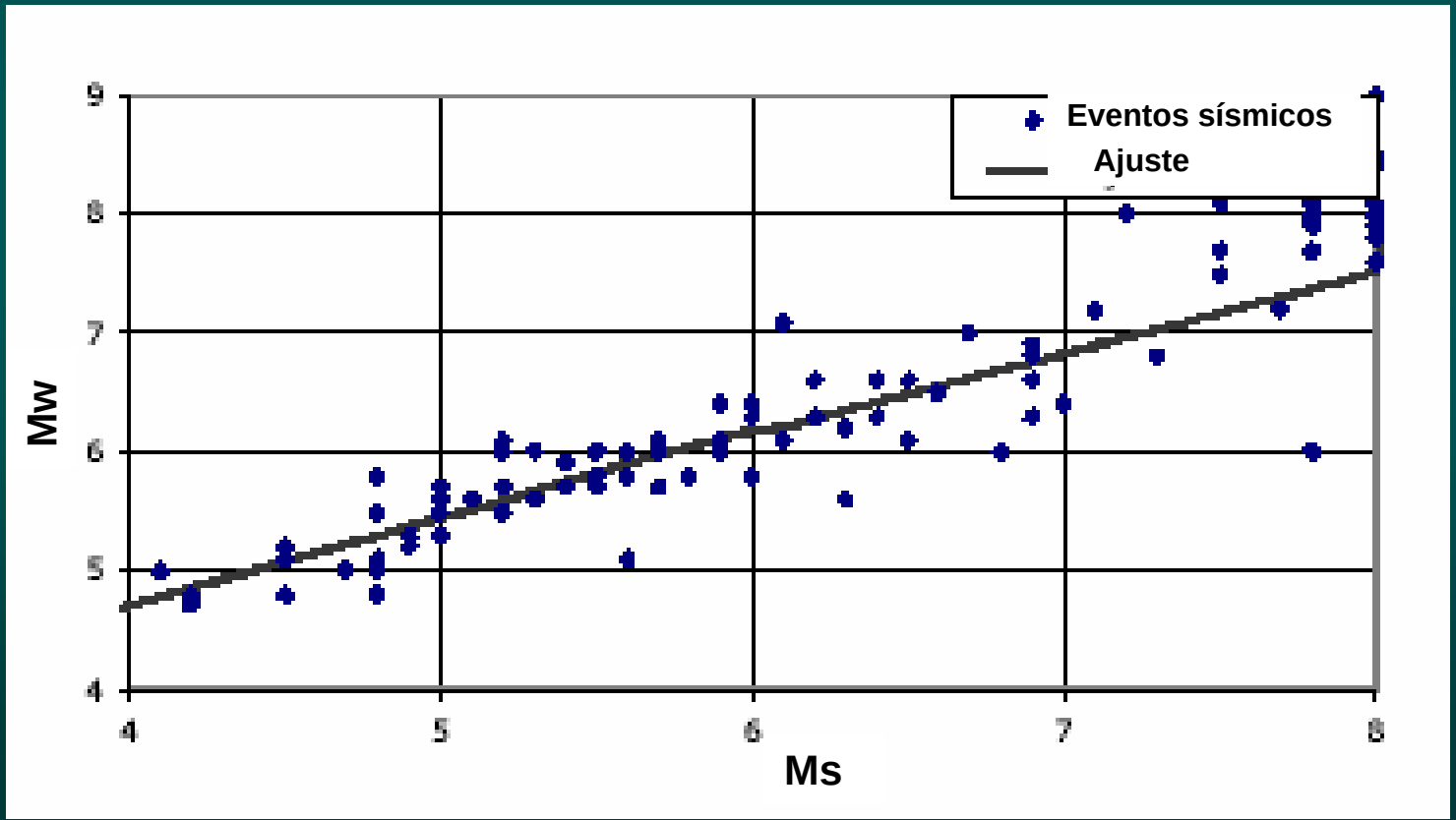


CORRELACIÓN DE MAGNITUDES Ms Y Mw (Bolaños y Monroy, 2004)

$Mw = 0.740\ Ms + 1.742$ $\quad Ms \leq 6;$

$Mw = 0.683\ Ms + 2.039$ $\quad 6 < Ms < 8;$

$Mw = 1.093\ Ms - 0.593$ $\quad Ms \geq 8$



mb	Ms	Mw	N	Nacum
4	1.8	3.0	43	429
4.1	2.0	3.2	32	386
4.2	2.3	3.4	33	354
4.3	2.5	3.6	35	321
4.4	2.8	3.8	33	286
4.5	3.0	4.0	30	253
4.6	3.3	4.1	31	223
4.7	3.5	4.3	35	192
4.8	3.8	4.5	40	157
4.9	4.0	4.7	36	117
5	4.3	4.9	24	81
5.1	4.5	5.1	12	57
5.2	4.8	5.3	11	45
5.3	5.0	5.4	8	34
5.4	5.3	5.6	6	26
5.5	5.5	5.8	7	20
5.6	5.8	6.0	1	13
5.7	6.0	6.2	3	12
5.9	6.5	6.6	2	9
6	6.7	6.7	1	7
6.1	7.0	6.8	2	6
6.3	7.5	7.2	1	4
6.4	7.8	7.3	2	3
6.6	8.3	7.7	1	1

FUENTE 11

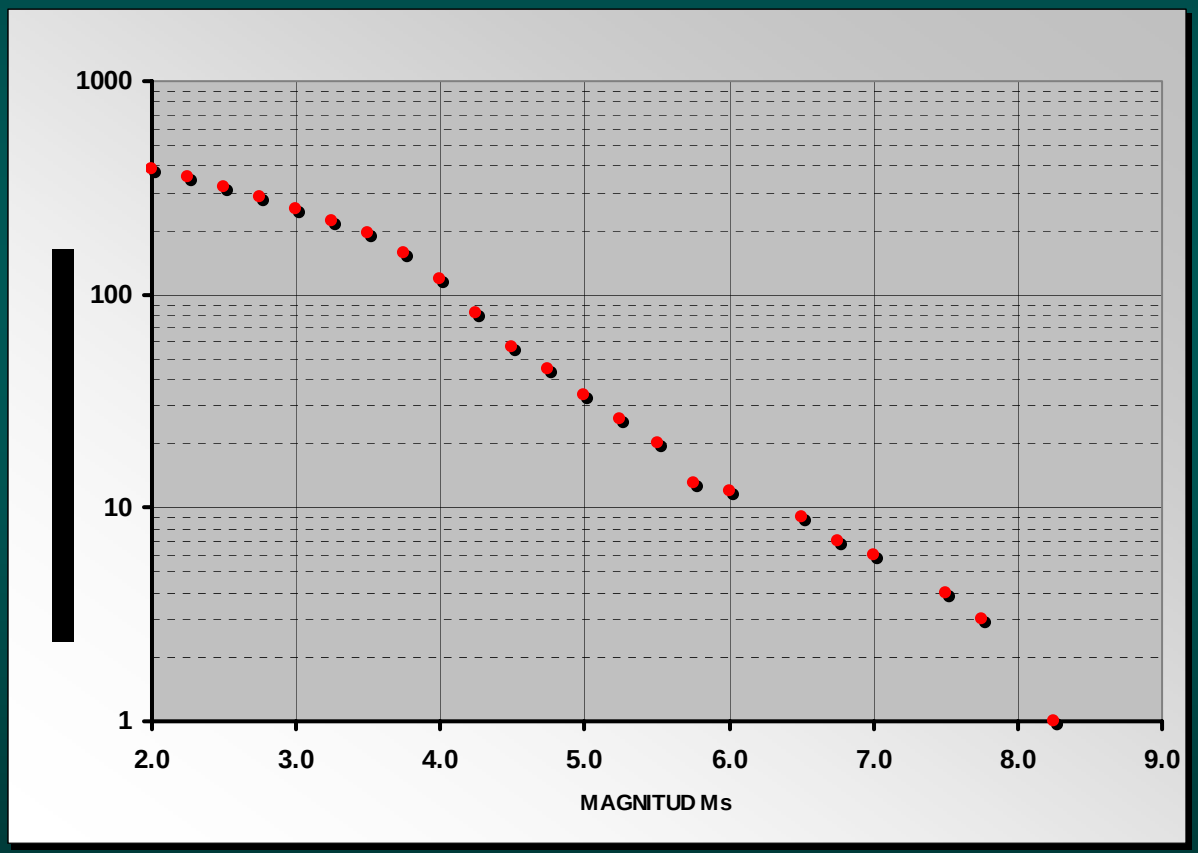
PERIODO 1963-2003

NÚMERO DE SISMOS ANALIZADOS 429

FUENTE 11

CURVA DE RECURRENCIA SÍSMICA PARA MAGNITUDES Ms

PERIODO 1963 - 2003



a = 3.7534

b = 0.4362

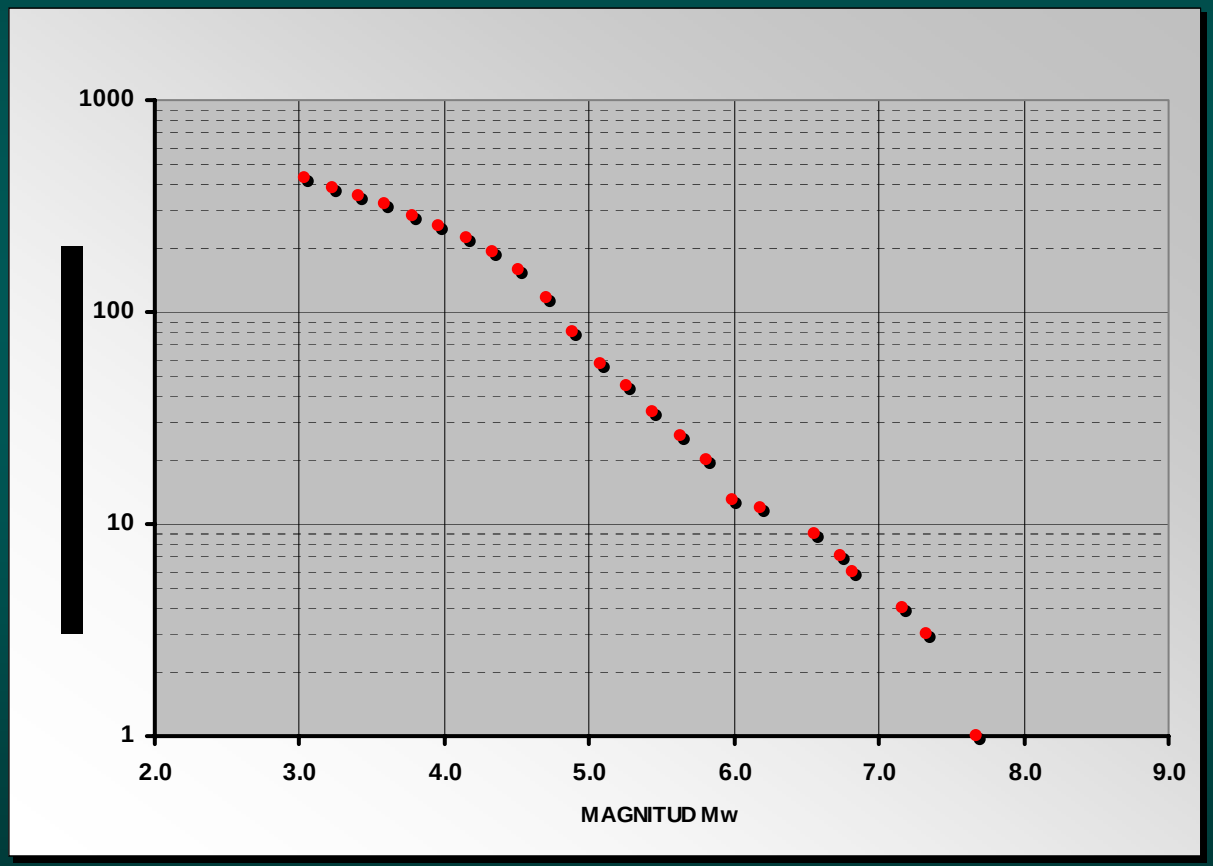
Mo = 3.0

μ = 6.962

FUENTE 11

CURVA DE RECURRENCIA SÍSMICA PARA MAGNITUDES Mw

PERIODO 1963 - 2003



a = 4.8948

b = 0.6126

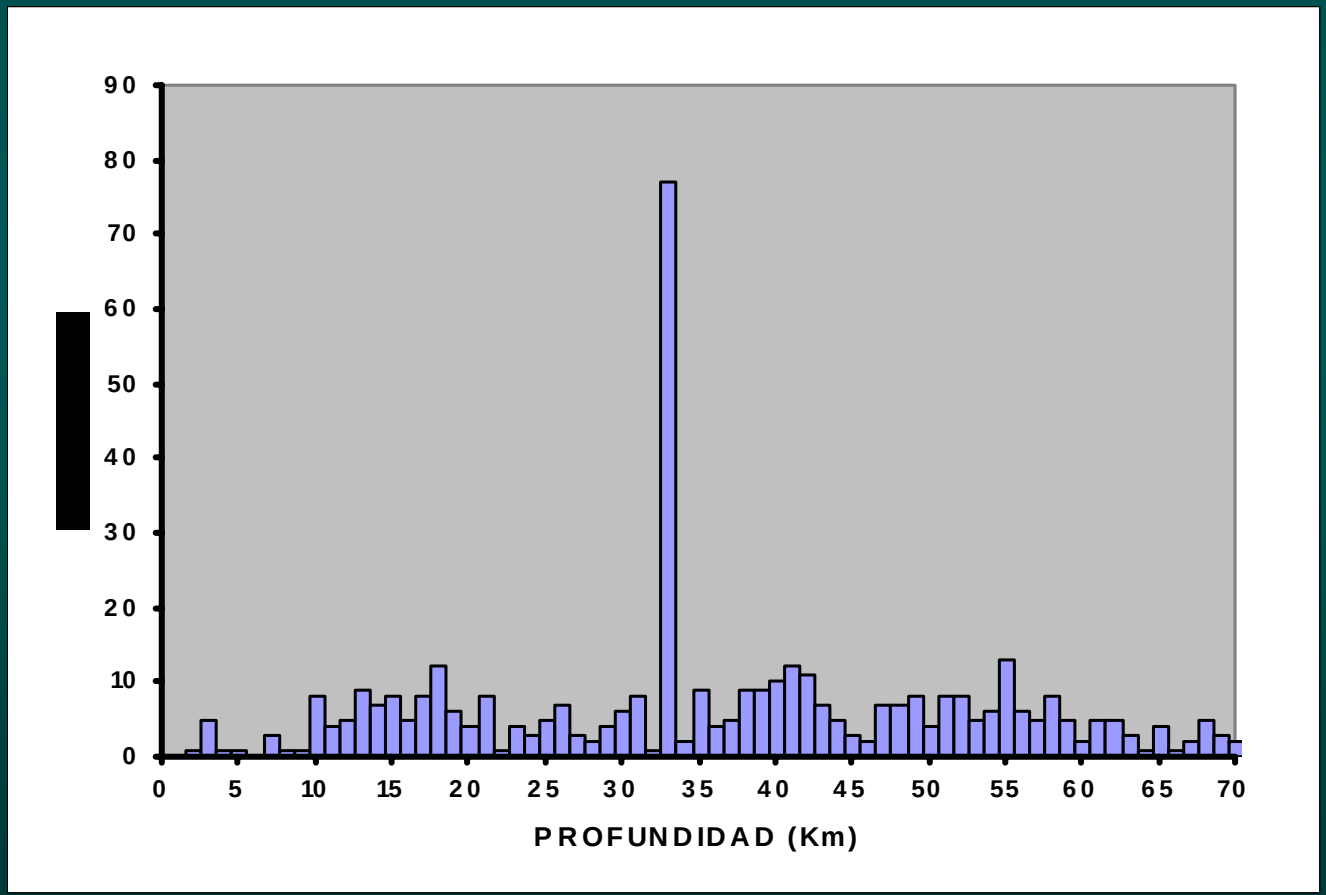
Mo = 4.0

μ = 6.96

FUENTE 11

HISTOGRAMA DE PROFUNDIDADES

PERIODO 1963 - 2003



PARÁMETROS SÍSMICOS CALCULADOS EN BASE A MAGNITUDES Ms
PERIODO 1963 - 2003

FUENTE	Ms						PROF. (Km)
	a	b	Mmin	Mmax	BETA	TASA	
F1	2.8532	0.3468	3.0	8.1	0.80	1.62	40
F2	4.4932	0.5955	4.5	7.9	1.37	1.63	40
F3	4.1264	0.4836	3.5	8.0	1.11	6.79	40
F4	4.2187	0.5393	4.0	8.2	1.24	2.88	40
F5	4.1756	0.5254	4.0	8.2	1.21	2.97	40
F6	2.7701	0.3822	2.8	7.4	0.88	1.25	40
F7	2.2523	0.4252	3.5	7.4	0.98	0.15	45
F8	3.2145	0.5414	2.8	7.0	1.25	1.25	45
F9	3.1971	0.4536	3.5	7.5	1.04	1.02	40
F10	3.2445	0.4265	3.8	7.3	0.98	1.05	40
F11	3.7534	0.4362	3.0	7.1	1.00	6.96	40
F12	2.9039	0.4447	3.0	7.1	1.02	0.93	45
F13	3.0047	0.4711	3.0	6.9	1.08	0.98	125
F14	3.2452	0.4747	3.5	6.5	1.09	0.96	130
F15	3.4352	0.4352	3.8	7.2	1.00	1.51	130
F16	4.4482	0.6110	4.0	7.2	1.41	2.52	115
F17	5.5512	0.6915	4.8	7.5	1.59	4.26	130
F18	3.5942	0.4026	3.5	7.5	0.93	3.83	155
F19	4.3398	0.5671	4.3	7.0	1.31	1.99	160
F20	3.0434	0.3660	4.5	7.5	0.84	0.62	580

PARÁMETROS SÍSMICOS CALCULADOS EN BASE A MAGNITUDES Mw
PERIODO 1963 – 2003

FUENTE	M_W						PROF. (Km)
	a	b	Mmin	Mmax	BETA	TASA	
F1	3.7217	0.4795	4.0	8.3	1.10	1.59	40
F2	6.0894	0.8392	5.1	7.4	1.93	1.61	40
F3	5.4177	0.6828	4.3	8.2	1.57	7.57	40
F4	5.6176	0.7528	4.7	8.4	1.73	3.00	40
F5	5.5403	0.7337	4.7	8.4	1.69	3.09	40
F6	3.7363	0.5305	3.8	7.1	1.22	1.31	40
F7	3.2533	0.5746	4.3	7.1	1.32	0.15	45
F8	4.4890	0.7316	3.8	6.8	1.68	1.28	45
F9	4.3551	0.6309	4.3	7.2	1.45	1.10	40
F10	4.2485	0.5763	4.5	7.0	1.33	1.13	40
F11	4.8948	0.6126	4.0	6.9	1.41	6.96	40
F12	3.9508	0.6010	4.0	6.9	1.38	0.88	45
F13	4.1138	0.6367	4.0	6.8	1.47	0.92	125
F14	4.3627	0.6415	4.3	6.5	1.48	1.01	130
F15	4.5287	0.6015	4.5	7.0	1.39	1.66	130
F16	5.8866	0.8257	4.7	7.0	1.90	2.53	115
F17	7.4704	0.9855	5.3	7.2	2.27	4.42	130
F18	4.6431	0.5638	4.3	7.2	1.30	4.14	155
F19	5.7901	0.7880	4.9	6.8	1.81	2.12	160
F20	4.0533	0.5213	5.1	7.2	1.20	0.62	580

LEYES DE ATENUACIÓN

Para evaluar la variabilidad de resultados al ser integrados con diferentes leyes de atenuación, se utilizaron diversas relaciones de atenuación y se compararon los resultados que de ahí se derivan.

- **Idriss, I. M. (1993)**
- **Sadigh, K. et al. (1993).**
- **Boore, D.; Joyner, W. y Fumal, T. (1993)**
- **McGuire (1974)**
- **Campbell, K.W. (1981).**
- **Dahle, A.; Climent, A.; Taylor, W; Bungum, H.; Santos, P.; Ciudad Real, M.; Lindholm, C.; Strauch, W. y Segura, F. (1995).**
- **Schmidt, V.; Dahle, A. y Bungum, H. (1997).**
- **Youngs, R.R.; Chiou,S-J.; Silva, W.J. y Humphrey, J.R. (1997).**
- **Sadigh, K.; Chang, C.-Y.; Egan, J.A.; Makdisi, M; Youngs, R.R. (1997).**
- **Casaverde y Vargas (1980)**

LEYES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE ZONA DE SUBDUCCIÓN

Youngs, Chiou, Silva y Humphrey (1997)

Han desarrollado relaciones de atenuación para dos tipos de sismos que ocurren en la zona de subducción:

SISMOS DE INTERFASE

SISMOS DE INTRAPLACA

Estas relaciones fueron desarrolladas por medio de un análisis de regresión utilizando una base de datos de 174 sismos que han ocurrido en diversas partes del mundo, tales como Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México, Perú y Solomon Islands

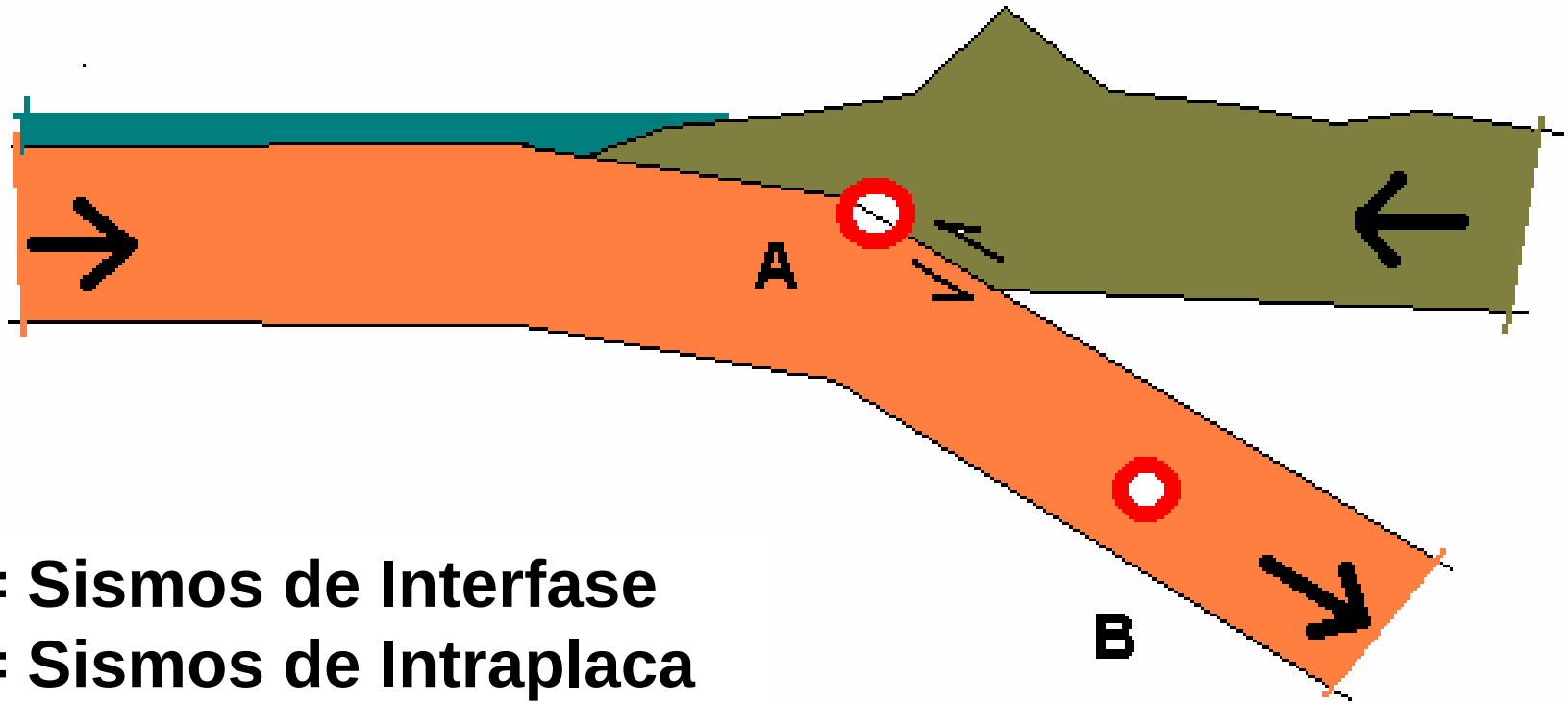
SISMOS DE INTERFASE

Ocurren en la superficie de contacto entre la placa oceánica de subducción y la placa continental (Alaska 1964 M 9.2 ; Chile 1985 M 8.0 ; México 1985 M 8.0)

SISMOS DE INTRAPLACA

Ocurren dentro de la placa oceánica que está subductándose por debajo de la placa continental (Puget Sound, USA 1949 M7.1 y 1965 M 6.5)

TIPOS DE SISMOS EN ZONA DE SUBDUCCIÓN



A = Sismos de Interfase

B = Sismos de Intraplaca

LEYES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE SUBDUCCIÓN

YOUNGS, CHIOU, SILVA Y HUMPHREY (1997)

Caso 1: Suelo tipo Roca

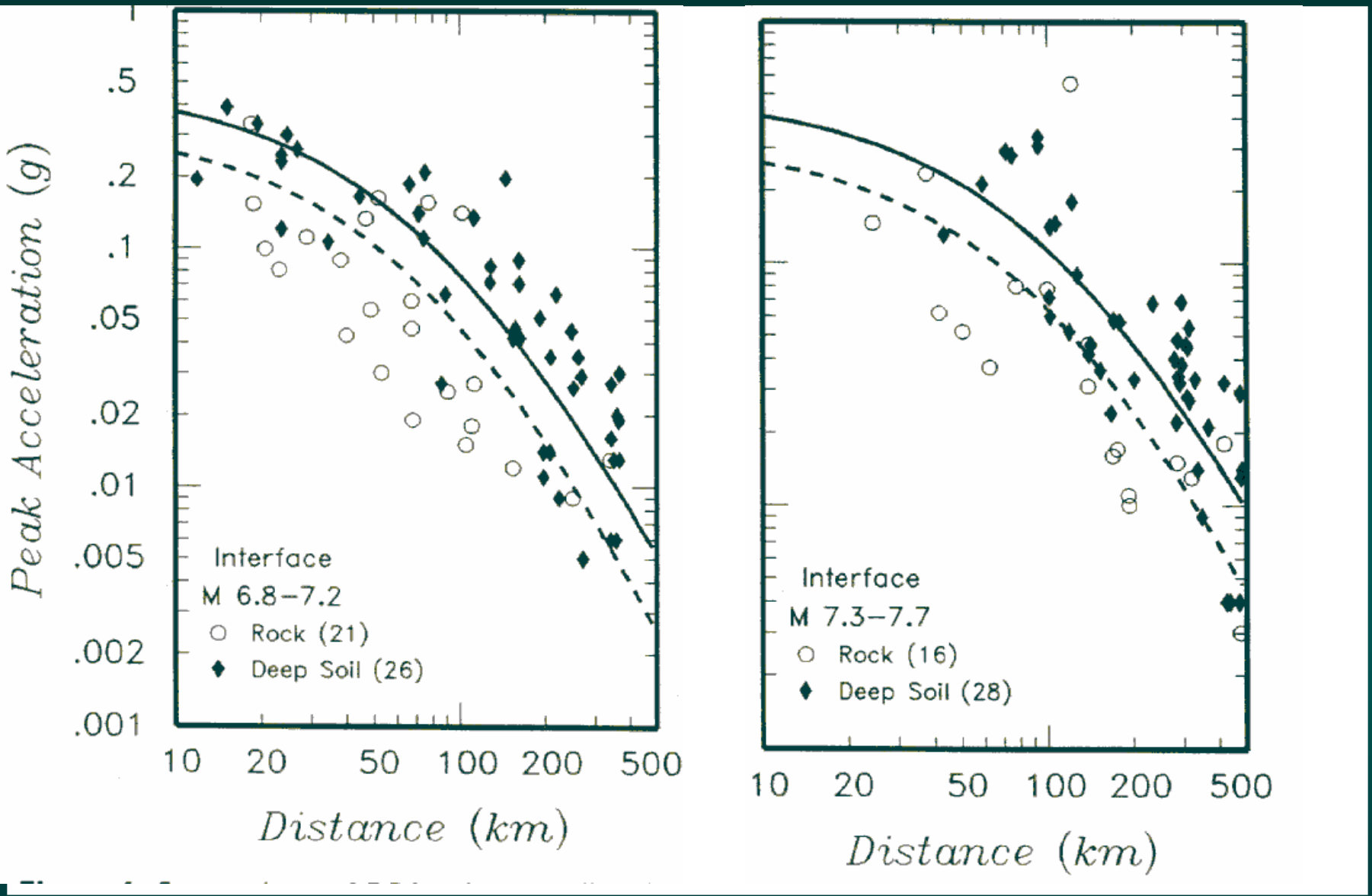
$$\ln(y) = 0.2418 + 1.414\,M + C_1 + C_2\,(10-M)^3 + C_3 \ln\left(r_{rup} + 1.7818 \times e^{0.554M}\right) + 0.00607\,H + 0.3846\,Z_T$$

Caso 2: Depósitos Suelos Profundos

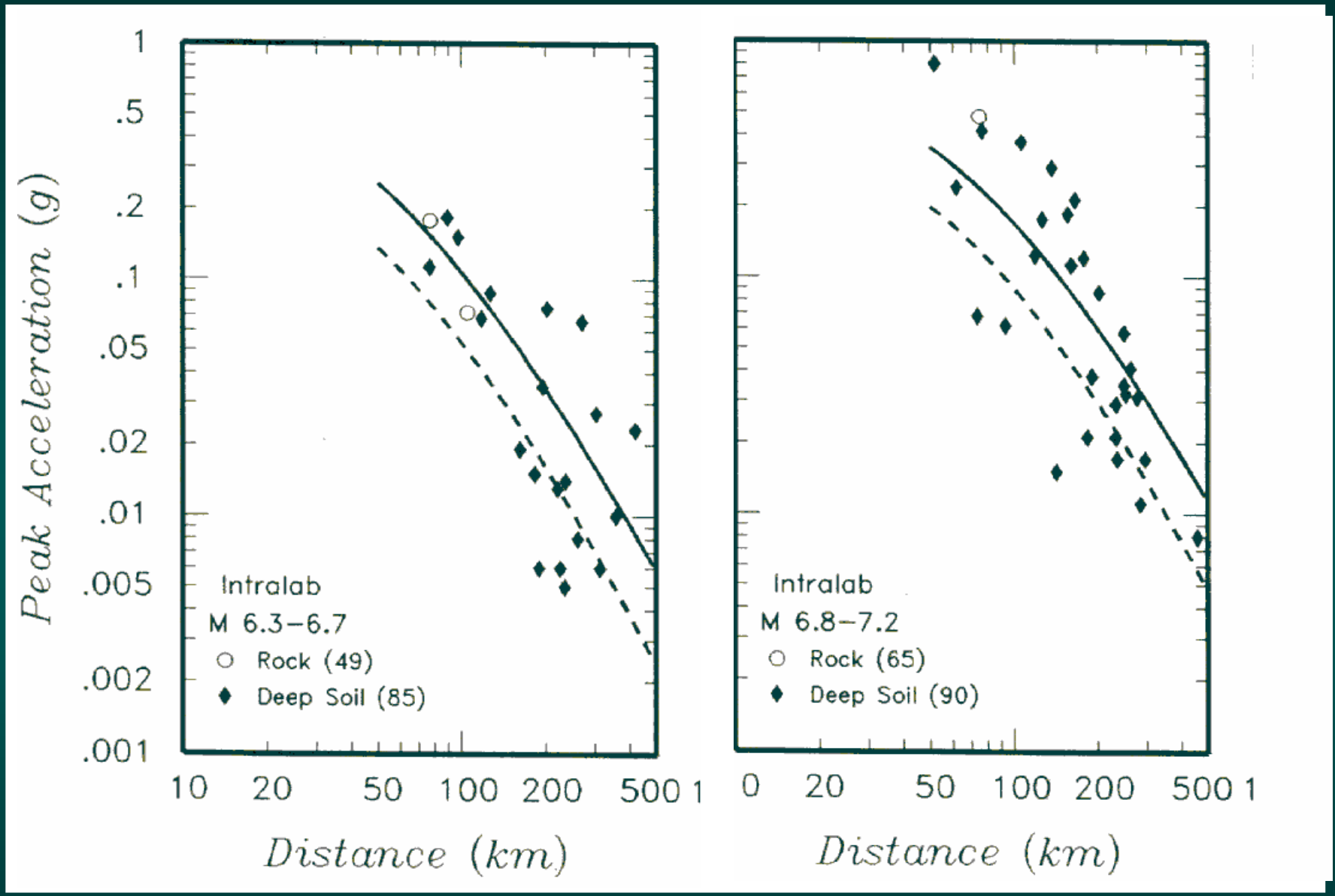
$$\ln(y) = -0.6687 + 1.438\,M + C_1 + C_2\,(10-M)^3 + C_3 \ln\left(R + 1.097 \times e^{0.617M}\right) + 0.00648\,H + 0.3643\,Z_T$$

Donde:

- y = aceleración espectral (g)
- M = magnitud momento (Mw)
- r_{rup} = distancia más cercana a la rotura (Km)
- H = profundidad (Km)
- Z_T = tipo de fuente, 0 para interfase y 1 para intraplaca



RELACIONES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE INTERFASE



RELACIONES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE INTRAPLACA

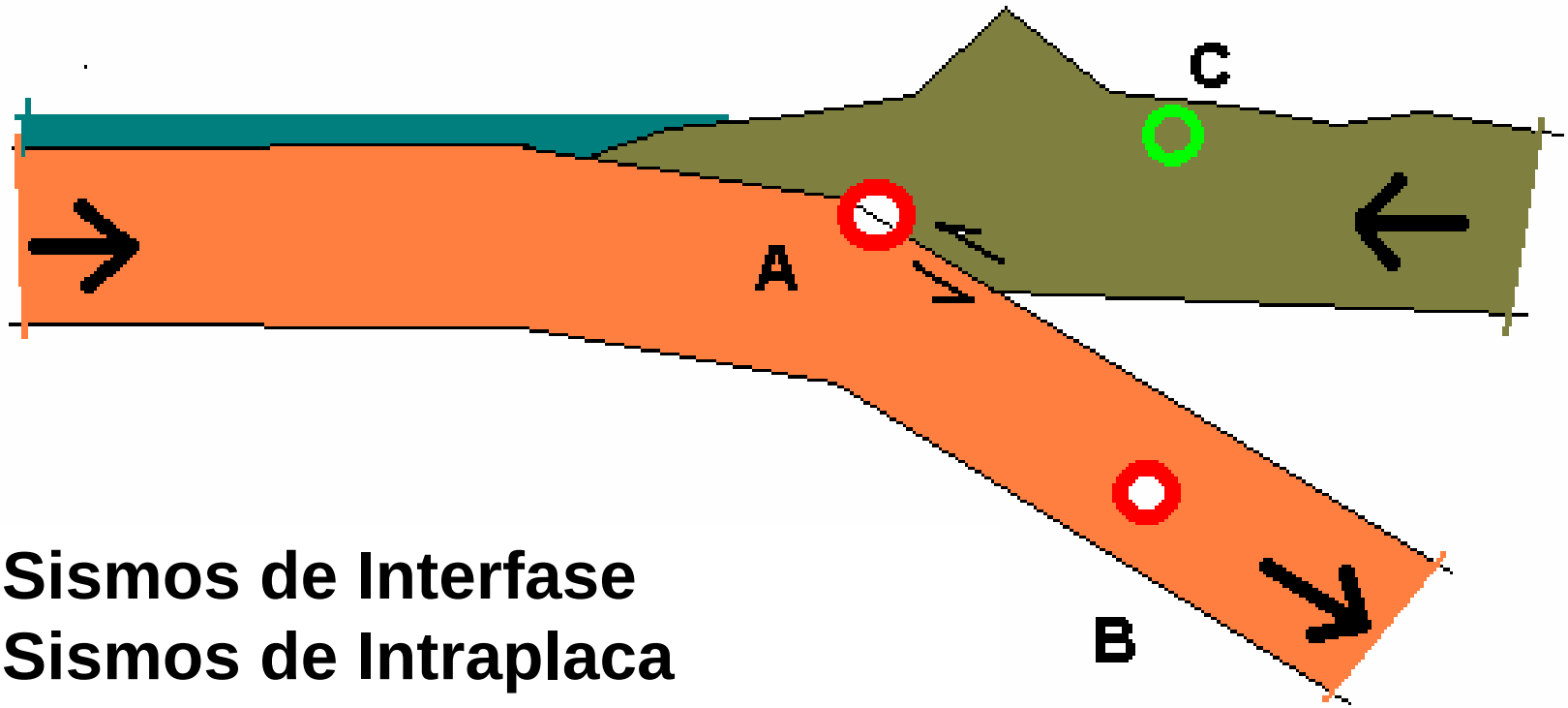
LEYES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE CORTEZA SUPERFICIAL

Sadigh, Chang, Egan, Makdisi y Youngs (1997)

Han desarrollado relaciones de atenuación para sismos que se originan en la Corteza Superficial, utilizando una base de datos de terremotos de California.

Estas relaciones fueron desarrolladas por medio de un análisis de regresión utilizando una base de datos de 121 acelerogramas de sismos de momento magnitud M 3.8 o mayor, registrados en sitios dentro de los 200 kilómetros de la superficie de ruptura. También se incluye datos de terremotos de la USSR e Irán.

TIPOS DE SISMOS EN ZONA DE SUBDUCCIÓN Y SISMOS DE CORTEZA SUPERFICIAL



A = Sismos de Interfase
B = Sismos de Intraplaca
C = Sismos de Corteza Superficial

LEYES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE CORTEZA SUPERFICIAL

SADIGH, CHANG, EGAN, MAKDISI Y YOUNGS (1997)

Caso 1: Suelo tipo Roca - M<=6.5

$$\ln(y) = C_1 + C_2\, M + C_3\, (8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln\left(r_{rup} + \exp(C_5 + C_6\, M)\right) + C_7 \ln\left(r_{rup} + 2\right)$$

Caso 2: Suelo tipo Roca - M>6.5

$$\ln(y) = C_1 + C_2\, M + C_3\, (8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln\left(r_{rup} + \exp(C_5 + C_6\, M)\right) + C_7 \ln\left(r_{rup} + 2\right)$$

LEYES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE CORTEZA SUPERFICIAL

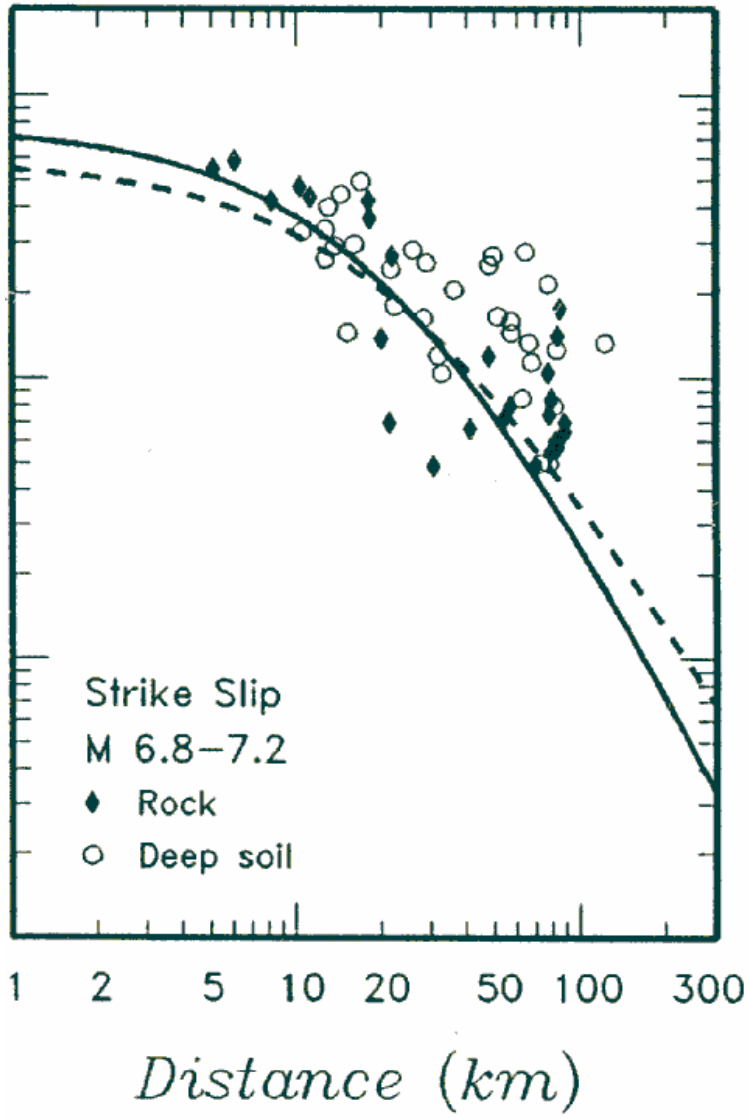
SADIGH, CHANG, EGAN, MAKDISI Y YOUNGS (1997)

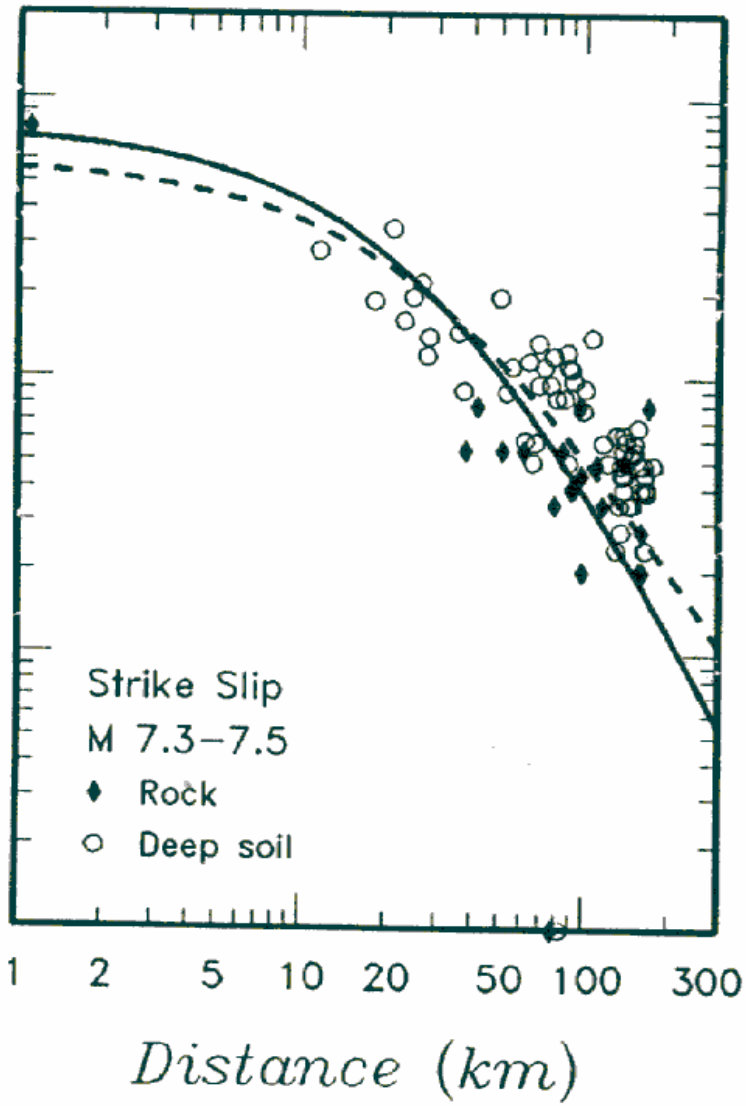
Caso 3: Depósitos Suelos Profundos

$$\ln(y) = C_1 + C_2 M - C_3 \ln (r_{rup} + C_4 e^{C5 M}) + C_6 + C_7 (8.5 - M)^{2.5}$$

Donde:

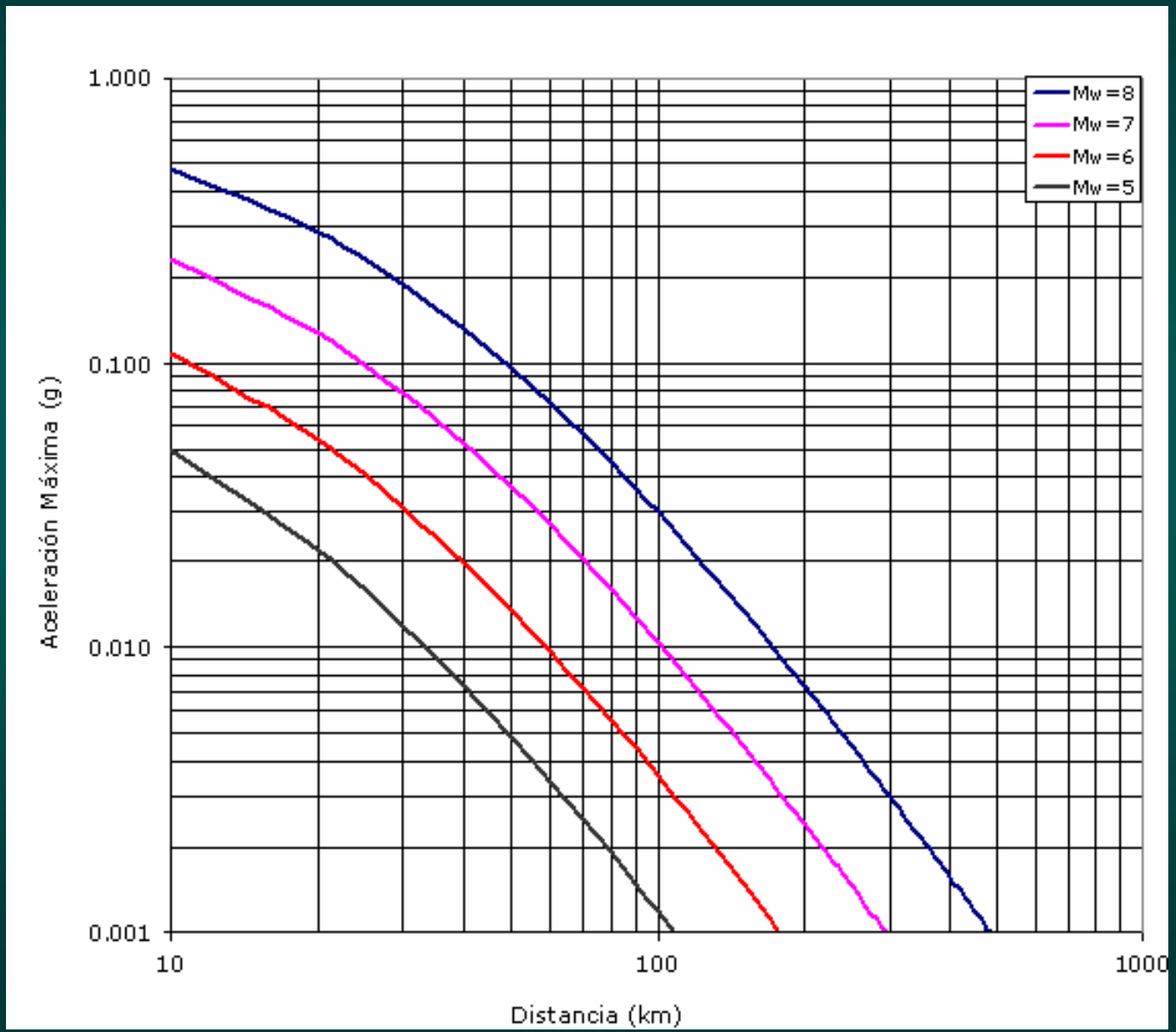
- y = aceleración espectral (g)
- C_1 = -2.17 para strike-slip, -1.92 para reverse
- C_2 = 1.0
- C_3 = 1.70
- C_4 = 2.1863, C_5 = 0.32 para M <= 6.5
- C_4 = 0.3825, C_5 = 0.5882 para M > 6.5
- r_{rup} = distancia más cercana a la superficie de rotura





RELACIONES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE CORTEZA SUPERFICIALES

CURVAS DE ATENUACIÓN PROPUESTAS POR SADIGH K., CHANG C. EGAN J., MAKDISI F., YOUNGS R. (1997) PARA SISMOS DE CORTEZA



DETERMINACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO

El Peligro Sísmico puede calcularse considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se encuentra la estructura.

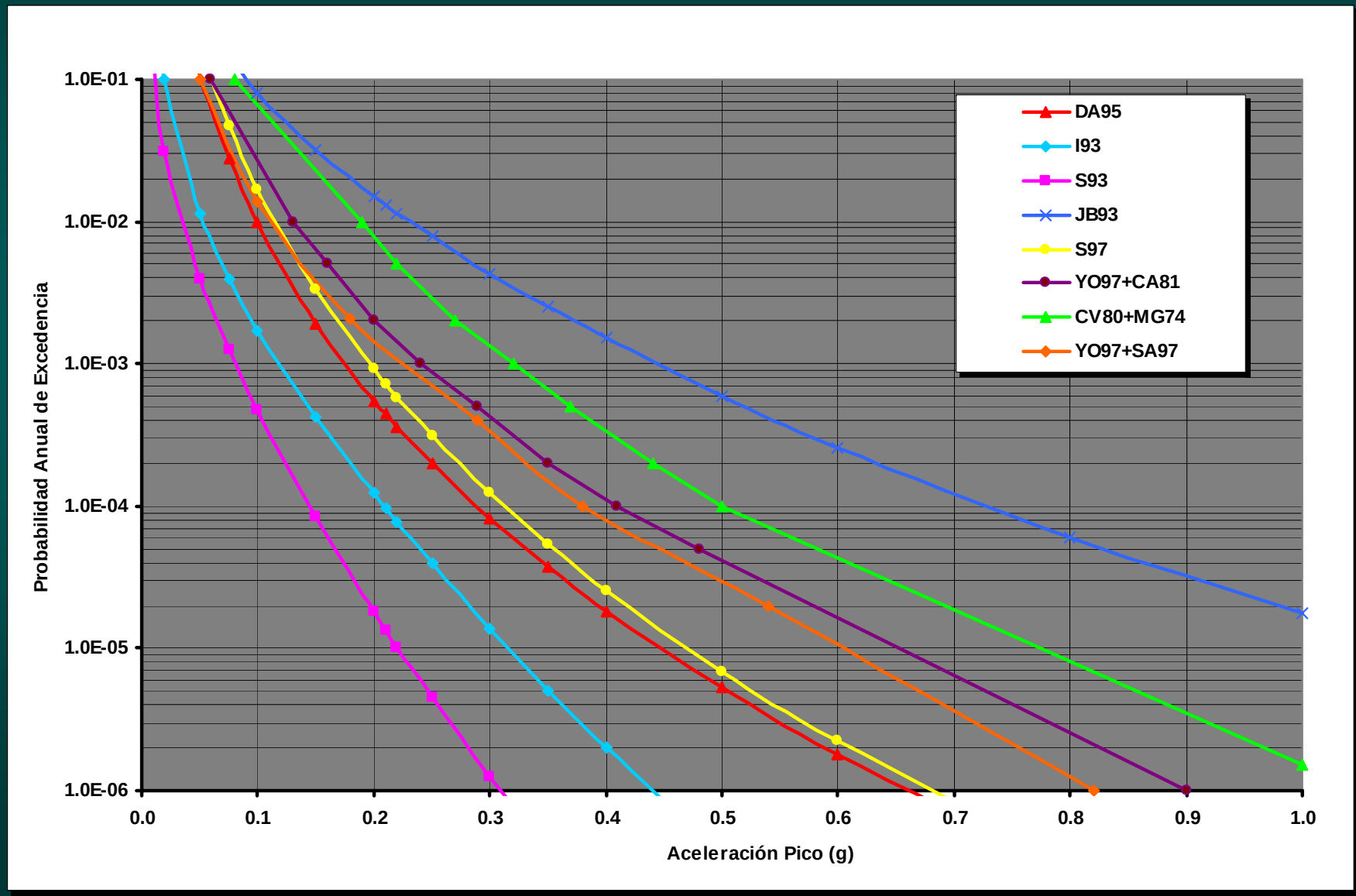
Programas de Cómputo Utilizados:

- RISK y EZRISK desarrollados por R. McGuire (1976, 1995)
- MRIESGO desarrollado por Bolaños y Monroy (2004).

La diversidad de programas de cómputo utilizados se debe a su capacidad para incluir las leyes de atenuación propuestas.

CURVAS DE PELIGRO SÍSMICO

ACELERACIÓN MÁXIMA EN LA ROCA BASE
(Coordenadas Longitud -71.33º; Latitud -14.90º)



ACELERACIONES MÁXIMAS ESPERADAS (% g) OBTENIDAS CON DIFERENTES LEYES DE ATENUACIÓN

(Coordenada Longitud -71.33º, Latitud -14.90º)

LEY DE ATENUACIÓN	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	100	200	500	1000	2000	3000	5000	10000
Idriss, I. M. (1993) I 93	0.05	0.07	0.10	0.13	0.15	0.16	0.19	0.21
Sadigh, K. et al. (1993) S 93	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.11	0.14	0.15
Boore, Joyner y Fumal (1993,4): JB 93	0.23	0.29	0.38	0.46	0.53	0.57	0.66	0.76
Dahle, A. et al (1995) DA 95	0.10	0.13	0.15	0.18	0.20	0.22	0.25	0.29
Schmidt, et al. (1997): S 97	0.13	0.14	0.18	0.20	0.23	0.25	0.28	0.32
Youngs, et al, (1997) y Campbell, K. (1981) YO97 + CA81	0.13	0.16	0.20	0.24	0.29	0.31	0.35	0.41
Casaverde y Vargas(1980) y R.McGuire (1974) CV80+M74	0.19	0.22	0.27	0.32	0.37	0.39	0.44	0.50
Youngs, et al, (1997) y Sadigh,et al. (1997) YO97 + SA 97	0.11	0.14	0.18	0.23	0.27	0.31	0.33	0.38

- Se puede observar la amplia dispersión de los resultados. Es evidente que algunas de las leyes de atenuación utilizadas no son aplicables al caso en estudio. Por ejemplo I93, S93 y JB93 fueron desarrolladas para la costa oeste de EEUU y producen en nuestro caso la mayor variabilidad de resultados. Las otras leyes son para sismos de subducción o han sido utilizadas en combinación con sismos continentales, pudiéndose observar que el rango de variación de resultados es mucho menor.

CONCLUSIONES

- En el presente trabajo se ha realizado una revisión de la actividad sísmica del pasado, reafirmando la definición de las fuentes sismogénicas presentada por Castillo (1993).

- Para la actualización de los parámetros de recurrencia sísmica se utilizó información sismológica obtenida del catálogo sísmico del Proyecto SISRA (1985) hasta el año 1992 con los datos verificados publicados por el ISC (Internacional Seismological Centre) y actualizados hasta el año 2003 por el IGP.

- En el estudio probabilístico de peligro sísmico se han considerado las fuentes sismogénicas como áreas. Se han utilizado los catálogos sísmicos y determinado recurrencias sísmicas con magnitudes Ms y Mw actualizados al año 2003.

- Se han utilizado diversas fórmulas de atenuación publicadas en la literatura técnica para evaluar los movimientos fuertes del terreno en el sitio generados por los eventos sísmicos ocurridos en las fuentes. Entres éstas se incluyen: Casaverde y Vargas (1980), R. McGuire (1974), Idriss, I. M. (1993), Sadigh, K. et al. (1993), Boore, Joyner y Fumal (1993,4): Campbell, K.W. (1981), Dahle,et al. (1995), Schmidt, et al. (1997), Youngs, et al. (1997), Sadigh, et al. (1997).

- Se puede observar la amplia variabilidad de los resultados. Es evidente que algunas de las leyes de atenuación utilizadas no son aplicables al Perú. Por ejemplo las leyes de atenuación I93, S93 y JB93 fueron desarrolladas para la costa oeste de EEUU y producen en nuestro caso la mayor variabilidad de resultados. Las otras leyes son para sismos de subducción o han sido utilizadas en combinación con sismos continentales, pudiéndose observar que el rango de variación de resultados es mucho menor.