



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA CONSIDERANDO EL EFECTO COMBINADO DEL AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL Y EL COMPORTAMIENTO INELÁSTICO

FELIPE LUIS ANTEQUERA DE LA FUENTE

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
RAFAEL RIDDELL CARVAJAL

Santiago de Chile, julio de 2010

© 2010, Felipe Antequera De la Fuente



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA CONSIDERANDO EL EFECTO COMBINADO DEL AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL Y EL COMPORTAMIENTO INELÁSTICO

FELIPE LUIS ANTEQUERA DE LA FUENTE

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

RAFAEL RIDDELL CARVAJAL

MATÍAS HUBE GINESTAR

PETER DECHENT ANGLADA

LUIS FERNANDO ALARCÓN CARDENAS

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, julio de 2010

A mi madre que fue un apoyo siempre, a mi padre, mis hermanos, sobrinos y especialmente a mis amigos, quienes me acompañaron y apoyaron en los momentos más difíciles. Y a Sarita y Meli, dos ángeles en la tierra.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer de manera especial a quien me aceptó como alumno, me guió y acompañó en el desarrollo de esta investigación, el profesor Rafael Riddell C, ya que sin su guía y apoyo este trabajo no hubiera sido posible.

A los profesores integrantes de la comisión quienes mostraron una gran disponibilidad y fueron un importante aporte con sus comentarios, observaciones y consejos, para mi investigación.

A los miembros de la Dirección de docencia de la Escuela de Ingeniería que fueron un apoyo y me incentivaron en todo momento a seguir adelante con mi investigación.

Para todos los miembros del departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica: Profesores, compañeros de magister, alumnos y personal administrativo, mis más sinceros agradecimientos por hacer que el ambiente de trabajo fuera siempre ameno y me motivaron para seguir siempre adelante.

Al profesor Carlos Araujo del departamento de matemáticas y estadísticas.

A mis grandes amigos Sergio, Daniel, Paula, Carlos, Rolly, Emiliano, María José, Jorge, Alan, Tomás y Viviana que siempre me dieron su apoyo y animo durante el transcurso de este trabajo y a muchos otros amigos que no alcanzaría a nombrar, pero de quienes siempre recibí palabras de aliento.

Y por supuesto a mi Camila quien siempre ha creído en mí, de manera incondicional. También a mis principales motivaciones Agustín, José Antonio, Víctor Manuel, Martina y Emilia.

Finalmente agradezco a mi Universidad, y a tantas personas que han hecho que mi paso por esta casa de estudios sea una experiencia inolvidable, llena de buenos momentos y sumamente gratificante, lo que me llena orgullo.

INDICE GENERAL

Pág.

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
INDICE DE TABLAS.....	vi
INDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUCCION	1
1.1 Motivación y objetivos del estudio.....	1
1.2 Revisión bibliográfica de trabajos anteriores.	2
1.3 Descripción de la influencia del amortiguamiento y estado del arte actual.	3
1.4 Estructuras aisladas sísmicamente.....	6
1.5 Contenido del Estudio.	10
2. MODELO ESTRUCTURAL Y REGISTROS UTILIZADOS	12
2.1 Sistema considerado y ecuación del movimiento.....	12
2.2 Relaciones fuerza-deformación utilizadas en este estudio.	14
2.3 Registros y datos utilizados.	16
2.4 Registros con condiciones iniciales.....	17
3. CALCULO DE ESPECTROS DE RESPUESTA	26
3.1 Procedimientos de integración y programas utilizados.....	26
3.2 Obtención de espectros de respuesta.	27
3.3 Normalización de los datos y espectros promedio.	30
3.4 Observaciones generales de los espectros de respuesta.....	33
4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	49
4.1 Descripción del procedimiento para el análisis estadístico.	49

4.2	Determinación de regiones espectrales y estadísticas en cada intervalo de frecuencias.	52
4.3	Presentación de resultados, ajuste de los datos y funciones de interpolación.	55
4.4	Análisis y comparación de resultados	60
5.	APLICACIÓN DEL ESTUDIO Y CONCLUSIONES	150
5.1	Construcción de Espectros de Diseño.	150
5.2	Conclusiones.....	153
	BIBLIOGRAFIA	162
	A N E X O S	165
	Anexo A: REGISTROS USADOS EN ESTE ESTUDIO.....	166
	Anexo B: AJUSTE TRAPEZOIDAL PARA TODOS LOS CASOS CONSIDERADOS EN ESTE ESTUDIO.....	217

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Registros sísmicos considerados	20
Tabla 4.1 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 0% de amortiguamiento.....	66
Tabla 4.2 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 2% de amortiguamiento.....	67
Tabla 4.3 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 5% de amortiguamiento.....	68
Tabla 4.4 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 10% de amortiguamiento.....	69
Tabla 4.5 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 20% de amortiguamiento.....	70
Tabla 4.6 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 50% de amortiguamiento.....	71
Tabla 4.7 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 100% de amortiguamiento.....	72
Tabla 4.8 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de amplificación ψ_μ , sistema elastoplástico.....	73
Tabla 4.9 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de reducción ϕ_μ , sistema elastoplástico	74
Tabla 4.10 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 0% de amortiguamiento.	75

Tabla 4.11 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 2% de amortiguamiento.	76
Tabla 4.12 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 5% de amortiguamiento.	77
Tabla 4.13 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 10% de amortiguamiento.	78
Tabla 4.14 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 20% de amortiguamiento.	79
Tabla 4.15 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 50% de amortiguamiento.	80
Tabla 4.16 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 100% de amortiguamiento.	81
Tabla 4.17 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de amplificación ψ_{μ} , sistema bilineal.....	82
Tabla 4.18 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de reducción ϕ_{μ} , sistema bilineal	83
Tabla 4.19 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 0% de amortiguamiento.....	84
Tabla 4.20 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 2% de amortiguamiento.....	85
Tabla 4.21 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 5% de amortiguamiento.....	86
Tabla 4.22 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 10% de amortiguamiento.....	87

Tabla 4.23 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 20% de amortiguamiento.....	88
Tabla 4.24 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 50% de amortiguamiento.....	89
Tabla 4.25 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 100% de amortiguamiento.....	90
Tabla 4.26 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de amplificación ψ_μ , sistema con degradación de rigidez	91
Tabla 4.27 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de reducción ϕ_μ , sistema con degradación de rigidez	92
Tabla 4.28 Diferencia de los factores de amplificación y reducción con respecto al valor obtenido para 5% de amortiguamiento, caso elastoplástico	93
Tabla 4.29 Diferencia de los factores de amplificación y reducción con respecto al valor obtenido para 5% de amortiguamiento, caso bilineal	94
Tabla 4.30 Diferencia de los factores de amplificación y reducción con respecto al valor obtenido para 5% de amortiguamiento., caso con degradación de rigidez	95
Tabla 4.31 Diferencia de los factores de amplificación y reducción para el caso bilineal con respecto al valor obtenido para el caso elastoplástico.....	96
Tabla 4.32 Diferencia de los factores de amplificación y reducción para el caso con degradación de rigidez con respecto al valor obtenido para el caso elastoplástico.....	97
Tabla 4.33 Comparación de los factores de reducción con respecto a reglas clásicas e investigaciones anteriores	98

Tabla 4.34 Comparación de los factores de reducción por amortiguamiento (B) propuestos por otros estudios.....	99
Tabla 4.35 Comparación de los factores de reducción por amortiguamiento (B) usados en códigos.	100
Tabla 5.1 Coeficientes para obtener valores promedio de ordenadas espectrales para $f=30\text{cps}$	156
Tabla 5.2 Coeficientes para obtener valores promedio + 1 desviación estándar de ordenadas espectrales para $f=30\text{cps}$	157
Tabla 5.3 Ordenadas espectrales para $f=30\text{cps}$ para espectros normalizados a aceleración máxima del suelo	158

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Modelo de un grado de libertad	23
Figura 2.2 Modelos no lineales de fuerza-deformación utilizados	24
Figura 2.3 Registro Valparaíso, U.T.F.S.M., 03/03/1985, corregido	25
Figura 3.1 Curva de desplazamiento v/s fuerza en el resorte, registro SCT, México (19/09/1985), sistema elastoplástico	35
Figura 3.2 Espectros de respuesta para modelo elastoplástico, amortiguamiento $\xi=2\%$, registro Corralitos (18/10/1989)	36
Figura 3.3 Espectros de respuesta para modelo elastoplástico, amortiguamiento $\xi=50\%$, registro Corralitos (18/10/1989)	37
Figura 3.4 Comparación de espectros de respuesta, amortiguamiento $\xi=10\%$, ductilidad $\mu=3$, modelo bilineal, registros Ochiai Bridge y Pacoima	38
Figura 3.5 Espectros promedio y promedio + 1DE, normalizados a PGA, PGD y PGV, modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$	39
Figura 3.6 Espectros promedio y promedio + 1DE, normalizados a PGA, PGD y PGV, modelo bilineal, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$	40
Figura 3.7 Espectros promedio y promedio + 1DE, normalizados a PGA, PGD y PGV, modelo con degradación de rigidez, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$	41
Figura 3.8 Espectros normalizados, registro Kushiro Kisyo-Dai (23/04/1962), modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=2\%$	42
Figura 3.9 Espectros normalizados, registro La Ligua (07/11/1981), modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=2\%$	43

Figura 3.10 Espectros normalizados, registro Kushiro Kisyō-Dai (23/04/1962), modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=20\%$	44
Figura 3.11 Espectros normalizados, registro La Ligua (07/11/1981), modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=20\%$	45
Figura 3.12 Espectros de respuesta, registro KSR Kushiro (15/01/1993), modelos elastoplástico y bilineal.....	46
Figura 3.13 Espectros de respuesta, registro KSR Kushiro (15/01/1993), modelos elastoplástico y degradación de rigidez	47
Figura 3.14 Espectros de respuesta, registro KSR Kushiro (15/01/1993), modelos bilineal y degradación de rigidez	48
Figura 4.1 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=5\%$	101
Figura 4.2 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=1,5$; amortiguamiento $\xi=5\%$	102
Figura 4.3 Espectro promedio y promedio + desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=5\%$	103
Figura 4.4 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$	104
Figura 4.5 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=5\%$	105
Figura 4.6 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=5\%$	106
Figura 4.7 Ajuste de línea trapezoidal al espectro promedio	107
Figura 4.8 Ajuste trapezoidal, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=10\%$	108

Figura 4.9 Ajuste trapezoidal, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=1,5$, amortiguamiento $\xi=10\%$	109
Figura 4.10 Ajuste trapezoidal, sistema elastoplástico. ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=10\%$	110
Figura 4.11 Ajuste trapezoidal, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=10\%$	111
Figura 4.12 Ajuste trapezoidal, sistema elastoplástico. ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=10\%$	112
Figura 4.13 Ajuste trapezoidal, sistema elastoplástico. ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=10\%$	113
Figura 4.14 Factores de amplificación para región espectral de desplazamiento, caso elastoplástico. Ajuste a tres intervalos: $\xi=0\%$; 2-20% y 50-100%.....	114
Figura 4.15 Factores de amplificación para región espectral de velocidad, caso elastoplástico. Ajuste a tres intervalos: $\xi=0\%$; 2-20% y 50-100%.....	115
Figura 4.16 Factores de amplificación para región espectral de aceleración, caso elastoplástico. Ajuste a tres intervalos: $\xi=0\%$; 2-20% y 50-100%.....	116
Figura 4.17 Factores de amplificación para región espectral de desplazamiento, caso bilineal. Ajuste a tres intervalos: $\xi=0\%$; 2-20% y 50-100%.....	117
Figura 4.18 Factores de amplificación para región espectral de velocidad, caso bilineal. Ajuste a tres intervalos: $\xi=0\%$; 2-20% y 50-100%.....	118
Figura 4.19 Factores amplificación para región espectral de aceleración, caso bilineal. Ajuste a tres intervalos: $\xi=0\%$; 2-20% y 50-100%.....	119
Figura 4.20 Factores de amplificación para región espectral de desplazamiento, caso degradación de rigidez. Ajuste a tres intervalos: $\xi=0\%$; 2-20% y 50-100%	120

Figura 4.21 Factores de amplificación para región espectral de velocidad, caso degradación de rigidez. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.	121
Figura 4.22 Factores de amplificación para región espectral de aceleración, caso degradación de rigidez. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%	122
Figura 4.23 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso elastoplástico. Ajuste $\xi = 0\%$	123
Figura 4.24 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso elastoplástico. Ajuste $\xi = 2-20\%$	124
Figura 4.25 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso elastoplástico. Ajuste $\xi = 50-100\%$	125
Figura 4.26 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso elastoplástico. Ajuste $\xi = 0\%$	126
Figura 4.27 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso elastoplástico. Ajuste $\xi = 2-20\%$	127
Figura 4.28 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso elastoplástico. Ajuste $\xi = 50-100\%$	128
Figura 4.29 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso elastoplástico. Ajuste $\xi = 0\%$	129
Figura 4.30 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso elastoplástico. Ajuste $\xi = 2-20\%$	130
Figura 4.31 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso elastoplástico. Ajuste $\xi = 50-100\%$	131
Figura 4.32 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso bilineal. Ajuste $\xi = 0\%$	132

Figura 4.33 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso bilineal. Ajuste $\xi=2-20\%$	133
Figura 4.34 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso bilineal. Ajuste $\xi=50-100\%$	134
Figura 4.35 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso bilineal. Ajuste $\xi=0\%$	135
Figura 4.36 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso bilineal. Ajuste $\xi=2-20\%$	136
Figura 4.37 Factores reducción para región espectral de velocidad, caso bilineal. Ajuste $\xi=50-100\%$	137
Figura 4.38 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso bilineal. Ajuste $\xi=0\%$	138
Figura 4.39 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso bilineal. Ajuste $\xi=2-20\%$	139
Figura 4.40 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso bilineal. Ajuste $\xi=50-100\%$	140
Figura 4.41 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=0\%$	141
Figura 4.42 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=2-20\%$	142
Figura 4.43 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=50-100\%$	143
Figura 4.44 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=0\%$	144

Figura 4.45 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=2-20\%$	145
Figura 4.46 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=50-100\%$	146
Figura 4.47 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=0\%$	147
Figura 4.48 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=2-20\%$	148
Figura 4.49 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=50-100\%$	149
Figura 5.1 Construcción de espectro de diseño elástico.....	160
Figura 5.2 Construcción de espectro de diseño inelástico.....	161

RESUMEN

En este estudio se calculó la respuesta de un sistema de un grado de libertad considerando diferentes relaciones constitutivas de fuerza-deformación (elastoplástica, bilineal y con degradación de rigidez). Se consideran además diferentes valores para el amortiguamiento y la ductilidad. Estos resultados permiten la construcción del espectro de diseño sísmico (elástico e inelástico), que entrega una estimación de la respuesta de un sistema de 1gdl. Se consideró un set de 51 registros del Cinturón Circumpacífico, y para cada registro se obtuvo la respuesta máxima (desplazamiento) para un rango de frecuencias entre 0,02 y 50 cps. La respuesta obtenida para cada registro es normalizada según los parámetros máximos del movimiento del suelo (aceleración, velocidad y desplazamiento). Esto permite obtener un espectro de respuesta promedio, y mediante un análisis estadístico es posible realizar un ajuste trapezoidal, a partir del cual se pueden determinar intervalos de frecuencias que determinan 3 regiones espectrales (aceleración, velocidad y desplazamiento), y en cada una de ellas es posible calcular los factores necesarios para construir el espectro de diseño (factores de amplificación, aplicados a los valores del movimiento máximo del suelo o factores de reducción del espectro elástico). Se han considerado valores de amortiguamiento entre 0% y 100%, debido a que el uso de dispositivos de reducción de vibraciones puede incorporar amortiguamientos mayores que el típico amortiguamiento estructural de 5%. Altos valores del amortiguamiento, hasta 100%, se incorporan como valores extremos para analizar la tendencia general, aunque es probable que efectivamente no se den en la práctica. Finalmente se obtuvieron factores de amplificación y reducción de la respuesta para construir el espectro de diseño, estos se presentan en forma de ecuaciones para lograr mayor generalidad. Además se concluyó que la relación fuerza-deformación elastoplástica es conservadora respecto a las otras dos, y por lo tanto se puede usar de manera general.

Palabras Claves: amortiguamiento, espectro inelástico, diseño sísmico, deformación inelástica, factores de reducción por amortiguamiento.

ABSTRACT

In this study the response of single degree of freedom systems (SDOF) for different force-deformation relationships (elastoplastic, bilinear and stiffness-degrading systems) has been calculated. It also considered different values for damping and ductility. These results permit the construction of seismic design spectra (elastic and inelastic), that provides an estimation for the response of a SDOF system. The set of records considered is an ensemble of 51 earthquakes records on the Circumpacific Belt, and for each record the maximum response (displacement) is calculated, for a frequency range between 0.02 and 50 hz. The response obtained for each record is normalized according to the maximum parameters of ground motion (acceleration, velocity and displacement). This allows to obtain an average response spectra, and by statistical analysis is possible to perform a trapezoidal adjustment, from which can be determinate ranges of frequencies that determine three spectral regions (acceleration, velocity and displacement), and in each of those is possible to calculate the factors necessary to construct the design spectra (amplification factors applied to the values of the maximum ground motion or reduction factors for elastic spectra). Damping factors from 0% to 100% have been considered, because the use of vibration reduction devices can add significant damping, higher than the typical structural damping of 5%. High damping factors up to 100% are incorporated as extreme values for analyzing general trend, although it is likely they may not actually occur in practice. Finally amplification and reduction factors of the response, used to construct the inelastic design spectra, were obtained; those are presented by equations, in order to achieve greater generality. It also concluded that the elastoplastic force-deformation relationship is conservative compared to the other two, and therefore can be used in general.

Key Words: damping, inelastic spectra, seismic design, inelastic deformation, damping reduction factors.

1. INTRODUCCION

1.1 Motivación y objetivos del estudio

El diseño sísmico de estructuras ha sido estudiado ampliamente durante los últimos años, y para nuestro país esto incide directamente dado que estamos expuestos a una intensa actividad sísmica.

Para realizar un análisis simple de una estructura, ya sea para un prediseño o un análisis P-delta, por ejemplo, la aproximación de un sistema estructural complejo mediante un sistema de un grado de libertad (1gdl) ha sido ampliamente utilizada. En este sentido es necesario obtener espectros de diseño que permiten estimar los máximos esfuerzos (desplazamiento, velocidad y aceleración) a los que será sometido este sistema estructural simplificado, en función de la ductilidad y frecuencia, pero por lo general los procedimientos presentados en normas para la obtención del espectro de diseño consideran solo valores de amortiguamiento del orden de un 5% del amortiguamiento crítico de la estructura, que corresponde al comportamiento intrínseco de los materiales utilizados en la construcción. En este sentido, un aspecto de interés es el efecto del amortiguamiento combinado con el comportamiento inelástico, que suele abordarse mediante fórmulas aproximadas equivalentes.

Dado el desarrollo tecnológico ahora el tema del amortiguamiento está evolucionando, ya que en el presente es posible la construcción de estructuras en las cuales se incorporan dispositivos capaces de amortiguar los severos movimientos generados por un evento sísmico de manera mucho más eficiente, haciendo que sea necesario considerar altos niveles de amortiguamiento diferentes a los tradicionales. Es sabido que mientras mayor sea el valor del amortiguamiento podemos mejorar el desempeño de una estructura, de esta manera si incorporamos dispositivos de amortiguamiento a la estructura podremos obtener un desempeño

mucho mejor, ya que dichos dispositivos permiten la disipación de energía que introduce el terremoto, liberando en parte a la estructura de su propia disipación mediante comportamiento inelástico que implica daño.

Bajo este escenario es necesario disponer de información apropiada para estas nuevas condiciones, por ello el presente estudio tiene por objeto otorgar factores para determinar espectros de diseño inelásticos tomando en cuenta la variación del amortiguamiento, y así poder contar con una útil herramienta para el diseño sísmico.

En resumen, el objetivo del presente estudio consiste en obtener espectros de diseño inelásticos y fórmulas que nos permitan determinar factores de amplificación del movimiento para las diferentes estructuras y grados de amortiguamiento posibles, tomando valores entre 0 y 100% y de esta manera aplicar estos conceptos al diseño sísmico basado en el comportamiento. Alternativamente, se puede decir que este estudio entrega una herramienta útil para el prediseño y análisis de estructuras que poseen un nivel de amortiguamiento diferente del tradicional.

1.2 Revisión bibliográfica de trabajos anteriores

Respecto a la relación que existe entre el amortiguamiento y la respuesta estructural son escasas las publicaciones cuando necesitamos observar el efecto de valores elevados del amortiguamiento. El desarrollo en los diferentes métodos de análisis y diseño estructural considera por lo general valores bajos del amortiguamiento, llegando en el mejor de los casos a un 10%. Riddell y Newmark (1979) analizaron la respuesta sísmica para sistemas elastoplásticos con 2%, 5% y 10% de amortiguamiento, obteniendo valores para los factores de reducción del espectro elástico, los que permiten la construcción del espectro inelástico a partir del espectro elástico, dependiendo de la ductilidad. Hanson y Soong (2001) consideraron valores de amortiguamiento más elevados, en su estudio se toman

valores de amortiguamiento de 10%, 20%, 30% y 50%, y presentan curvas para determinar los factores de amplificación de la respuesta, en función de la ductilidad y el amortiguamiento, para respuestas normalizadas a la máxima aceleración del suelo, máxima velocidad y máximo desplazamiento. Sin embargo las curvas presentadas por Hanson y Soong han sido calculadas para un período específico (en vez de un espectro) en el caso de la normalización a aceleración y desplazamiento, y para la zona de velocidad no especifican los períodos comprendidos en el intervalo considerado. Esto hace que el uso de estas curvas sea limitado.

Un estudio más reciente de los autores Lin, Miranda y Chang (2005) presenta una comparación de diferentes modelos (Newmark y Hall, Wu y Hanson, Ashour, Ramirez et al., Lin y Chang) que estiman el factor de reducción por amortiguamiento (B) utilizado en diversos códigos para estimar el espectro de respuesta elástica, este factor de reducción se presenta normalizado con respecto al espectro típico con un 5% de amortiguamiento. En general los factores de amortiguamiento usados en los modelos presentados en este estudio llegan hasta un 50%, salvo el modelo de Ramírez et al., que consideró sistemas de 1gdl con razones de amortiguamiento de hasta un 100%. Además en este estudio se presentan algunos factores de reducción usados en códigos (NEHRP-97, UBC-97, IBC 2000, FEMA-273, FEMA-368), los que se basan en los modelos de los autores mencionados anteriormente.

1.3 Descripción de la influencia del amortiguamiento y estado del arte

actual

Como fue mencionado anteriormente, cuando incorporamos amortiguadores a una estructura, estos contribuyen a disipar la energía inducida por un movimiento sísmico y de esta manera pueden reducir la demanda sobre la estructura.

Para explicar los principios bajo los cuales trabaja un amortiguador en las estructuras Hanson y Soong (2001) presentan en su estudio un modelo de un grado de libertad sometido a un impulso sinusoidal. Los valores de amortiguamiento analizados por ellos varían entre un 2% y un 50% del amortiguamiento crítico de la estructura, y muestran dos efectos principales al incrementar el amortiguamiento; en primer lugar la amplitud inicial de la respuesta de la estructura disminuye a medida que aumenta el amortiguamiento y en segundo lugar el número de ciclos necesarios para reducir la amplitud de la respuesta a la mitad también disminuye significativamente a medida que aumenta el amortiguamiento. Si pensamos que un movimiento sísmico es equivalente a una serie de pulsos individuales, la respuesta de una estructura a esta serie de pulsos será simplemente la superposición de las respuestas de cada pulso, por lo tanto es totalmente válido suponer que la respuesta de sistemas con un mayor grado de amortiguamiento será menor que la de un sistema con bajo amortiguamiento, dado que las amplitudes iniciales del movimiento serán menores, y además la respuesta decaerá más rápidamente. Otro punto importante a considerar en el estudio de Hanson y Soong es que bajo un estado estacionario sinusoidal, la amplificación dinámica cerca de la resonancia es máxima, sin embargo, el amortiguamiento tiene un efecto importante en la reducción de la respuesta cuando nos encontramos cerca de la resonancia. En conclusión para ambos casos mencionados un mayor amortiguamiento contribuye significativamente a reducir la amplificación de la respuesta dinámica. Aparte de esta aproximación simple usando un pulso sinusoidal, para llegar a las conclusiones expuestas anteriormente, en el estudio de Hanson y Soong se consideran algunos registros reales, tales como el del terremoto de Ciudad de México de 1985 y el de Landers California de 1992, ya que las características de un movimiento sísmico particular pueden variar con respecto a las aproximaciones usando impulsos sinusoidales.

Por otra parte la presencia de amortiguamiento, o un sistema de disipación de energía en estructuras convencionales ha sido ampliamente

reconocido y aceptado en la práctica, es más, cuando una estructura es afectada por un movimiento sísmico, además de la energía disipada debido al comportamiento inelástico, en el sentido de la mecánica estructural, existe una pérdida de energía incluso en el rango “elástico”, lo que se debe a micro-nolinealidades, efecto de elementos no estructurales, y refracción por interacción con el suelo. Esto es tomado en cuenta mediante la incorporación de un factor de amortiguamiento. Por lo general el grado de amortiguamiento considerado depende del tipo de estructura, de los materiales utilizados, la intensidad del movimiento y el nivel de tensiones en los materiales, y el deterioro que ya podría haber experimentado el sistema, la naturaleza de este sistema de disipación de energía inherente a cada estructura y por lo general se considera un amortiguamiento equivalente de un 2% a un 5%, lo que ha sido aceptado en la práctica para el análisis de la respuesta en estructuras convencionales (Newmark y Hall, 1969, sugieren diferentes valores del amortiguamiento según algunas de estas características). De hecho la gran mayoría de los espectros de diseño de normas asumen un 5% de amortiguamiento. Sin embargo al incorporar un sistema de amortiguamiento especialmente diseñado para este fin se puede aumentar de manera importante el amortiguamiento considerado para el análisis de la respuesta del sistema estructural, lo que hace necesario determinar toda una nueva gamma de espectros para poder aplicar el método de diseño sísmico tradicional a este tipo de estructuras.

El uso de valores de amortiguamiento entre un 2% y un 50% se justifica por 2 razones principales, en primer lugar cuando se incrementa el amortiguamiento más allá de un 30% del amortiguamiento crítico la disminución en la respuesta dinámica del sistema estructural es mucho menos significativa que la observada para un incremento pero dentro de un rango menor al 30%, esta observación se puede apreciar en el estudio de Hanson y Soong (2001) y en el Capítulo 4 de este estudio, donde se presentan los factores de amplificación y reducción obtenidos estadísticamente para la construcción del espectro de diseño

elástico e inelástico. La segunda razón es que existe un costo importante en la incorporación de sistemas de disipación de energía en una estructura, no solo en el ámbito económico, sino que también en el sentido práctico, en este ámbito es importante considerar diversos factores, tales como, costos del diseño y fabricación, mayor dificultad en el análisis, condiciones del suelo, rango de sismicidad considerado, capacidad de los amortiguadores con respecto a los requerimientos de fuerza, desplazamiento y velocidad, detalles de instalación, construcción y mantención, etc, por lo tanto si se pretende llegar a valores muy elevados del amortiguamiento (sobre un 50%) estos factores se vuelven más complejos de analizar y sumado a la primera razón se vuelve poco práctico pretender llegar a valores de amortiguamiento muy elevados.

Por otra parte, los valores extremos de $\xi=0\%$ y 100% se consideraron como valores extremos, para poder observar la tendencia más que para fines prácticos, ya que es difícil que efectivamente se encuentren en la realidad.

1.4 Estructuras aisladas sísmicamente

Las experiencias ocurridas en los terremotos de Northridge, California, 1994, Kobe, Japón, 1995, Centro-sur de Chile, 2010, dejaron una lección significativa respecto a este tema, ya que evidenciaron el buen comportamiento sísmico que mantuvieron las estructuras con aislación basal, o con sistemas de reducción de vibraciones, frente a las estructuras convencionales. Este evento tuvo como resultado un incremento, sobre todo en Japón, en el desarrollo y uso de los sistemas de aislación y despertó un gran interés en la viabilidad de aplicar dispositivos de aislación basal en el diseño sísmico de todo tipo de estructuras. Frente a esta evolución de la Ingeniería sísmica en el mundo se torna necesario complementar los códigos sísmicos que existen actualmente con requisitos específicos para este nuevo tipo de estructuras, o aportar antecedentes y relaciones que permitan hacer estimaciones de prediseño.

El año 2003, en nuestro país se desarrolló una nueva norma para el análisis y diseño de edificios con aislación sísmica (Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile, 2003), la que contempla valores de amortiguamiento incluso mayores al 50%, entre otras consideraciones importantes.

Hasta el año 2004 solo existían 3 edificios aislados sísmicamente en nuestro país, y un cuarto en etapa de construcción. El primero, una vivienda social conocida como Comunidad Andalucía, diseñado y construido entre los años 1991 y 1992 por un equipo de profesores de la Universidad de Chile y el Ministerio de Vivienda. Este edificio de 240 m² distribuidos en cuatro pisos, cuenta un conjunto de 6 aisladores de goma de alto amortiguamiento que lo conectan a los cimientos. Cada uno de estos aisladores está formado por un conjunto de láminas de goma intercaladas con placas metálicas. En segundo lugar tenemos el Centro Médico San Carlos de Apoquindo que fue construido durante el año 2000. Este es un edificio de 8.000 m² distribuidos en seis pisos y en cuya base cuenta con 30 aisladores elastoméricos de amortiguamiento medio, y 22 aisladores elastoméricos con núcleo de plomo. El tercer edificio con aislación sísmica construido en nuestro país fue el edificio San Agustín - Hernán Briones Gorostiaga de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Chile diseñado y construido en dos etapas entre los años 2001 y 2003, la primera etapa cuenta con una planta aproximada de 6.000 m² (San Agustín) y la segunda (Hernán Briones Gorostiaga) con aproximadamente 1.900 m², distribuidos en seis niveles. Este edificio cuenta con 42 aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento y 14 aisladores friccionales. El cuarto, es el edificio del Hospital Militar, que tiene cinco pisos y una planta de 50.000 m² aproximadamente apoyados sobre 164 aisladores, 114 elastoméricos y 50 con núcleo de plomo (Leigh y De la Llera, 2002).

En los últimos años la lista de edificios aislados sísmicamente se ha ido incrementando notoriamente. Entre los años 2004 y 2005 se construyó el edificio de consultas de la ACHS (Asociación Chilena de Seguridad), este edificio de 7

pisos y 3 subterráneos posee una estructura mixta de muros (núcleo) y marcos de hormigón armado. El sistema de aislamiento consta de 32 aisladores (23 elastoméricos y 9 friccionales), distribuidos en el nivel de las fundaciones y en el cielo del primer subterráneo. El edificio Parque Araucano, construido en el año 2005, posee 22 pisos y 6 subterráneos con un total de 50.000 m², tiene una estructuración mixta de muros (núcleo) y marcos de hormigón armado. Este edificio posee un sistema de amortiguamiento de masa sintonizada (AMS) en el piso mecánico del edificio, que consiste en dos AMS de 170ton cada uno, una de las masas está conectada a un disipador magnetoreológico semiactivo que controla en tiempo real el movimiento de la masa, reduciendo aun más las vibraciones del edificio. También tenemos el edificio de oficinas Vulco S.A. que se termino de construir el año 2006 y cuyo sistema de aislación está compuesto por 12 aisladores y 3 deslizadores. Entre los años 2006 y 2008 se construyó el Hospital Clínico de la Universidad de los Andes, que posee un sistema de aislamiento sísmico compuesto por 118 aisladores elastoméricos, 20 de ellos ubicados a nivel de fundaciones y 98 sobre el cielo del primer nivel de estacionamientos. El edificio de la ACHS en Viña del Mar, terminado el año 2008, tiene 7 pisos y 2 subterráneos con un total de 4.200 m², al igual que los anteriores está construido en base a una estructuración mixta de muros y marcos de hormigón armado. El sistema de aislamiento consta de 25 aisladores repartidos en dos niveles del edificio: 5 aisladores elastoméricos en el nivel de las fundaciones y 20 aisladores ubicados en el cielo del primer subterráneo (13 elastoméricos y 7 friccionales) (Sirve.cl, 2010).

A comienzos del 2010 se termino de construir el que por el momento es el edificio más alto de Chile, la Torre Titanium la Portada, con 190mts de altura. Este edificio de 52 pisos y 7 subterráneos posee un sistema de disipación de energía que consta de 45 disipadores metálicos en forma de cruz: 20 en la dirección longitudinal y 25 en dirección transversal, los cuales se estima que pueden reducir hasta en un 40% las deformaciones dinámicas de la estructura (Sirve.cl, 2010).

Además de los edificios mencionados también existe en Chile la incursión del uso de aisladores sísmicos en otro tipo de estructuras, un famoso ejemplo es el Viaducto Marga-Marga, esta es la primera obra de infraestructura vial, construida en Chile, que se encuentra aislada sísmicamente. Tiene una longitud de 383 metros y un sistema estructural consistente en un único tablero continuo formado por vigas metálicas apoyado sobre 36 aisladores sísmicos, distribuidos en dos estribos y siete cepas. Los aisladores son de goma de alto amortiguamiento con placas metálicas y son de 3 tamaños distintos según su ubicación, los cuales fueron fabricados y probados íntegramente en Chile. Otro ejemplo es la incorporación de aisladores sísmicos en el nuevo muelle del puerto de Coronel, en esta obra se incorporó un sistema de aislamiento sísmico para obtener un diseño más económico y seguro que la solución convencional mediante una solución híbrida que incorporó 96 aisladores sísmicos elastoméricos junto con pilotes verticales (Sirve.cl, 2010).

Finalmente, es importante relacionar los dispositivos de aislación con los niveles de amortiguamiento que serán capaces de desarrollar las estructuras donde sean utilizados. Los aisladores elastoméricos pueden alcanzar valores significativos de amortiguamiento a través de una modificación en la composición química de la goma, alcanzando razones de amortiguamiento viscoso equivalente que varían entre 12% y 18%, para un amplio rango de frecuencias y deformaciones típicas de diseño. Alternativamente, los aisladores de goma con corazón de plomo, son algo más eficientes, logrando niveles de amortiguamiento aún más significativos, de un 20% a un 40% (Sirve.cl, 2010).

Tanto el edificio del Centro Médico San Carlos de Apoquindo, como los edificios contiguos San Agustín y Hernán Briones, fueron diseñados asumiendo razones de amortiguamiento del orden de un 30% para los modos más altos (Leigh y De la Llera, 2002).

1.5 Contenido del Estudio

Este estudio se ha organizado de la siguiente manera.

En el Capítulo 2 se presentan el sistema de un grado de libertad utilizado, la ecuación de movimiento, y los distintos modelos de relación fuerza-deformación; elastoplástico, bilineal y con degradación de rigidez, para la obtención de la respuesta inelástica. La idea de analizar la respuesta sísmica considerando tres casos de relación fuerza-deformación es para comparar las respuestas obtenidas para ellos, y así verificar que el modelo elastoplástico es una buena aproximación y se puede usar de manera más general con el atractivo de su simplicidad. También se presenta el conjunto de registros utilizados.

En el Capítulo 3 se presentan los procedimientos para calcular los espectros de respuesta. Se explica el método aplicado y el procedimiento de integración de las ecuaciones del movimiento para obtener la respuesta de cada sistema y luego poder construir los espectros de respuesta propiamente tal. Además se describen algunas características propias de los espectros.

Una vez obtenidos los espectros de respuesta procedemos a realizar el análisis estadístico de los datos, este procedimiento es presentado en detalle en el Capítulo 4, primero se describe el procedimiento estadístico y se presentan las ecuaciones utilizadas para obtener los valores promedio de los espectros normalizados. A continuación se presentan los resultados del análisis estadístico y los resultados obtenidos aplicando modelos de regresión para obtener expresiones que entregan los factores de amplificación y de reducción para obtener espectros de diseño, en función del amortiguamiento y la ductilidad. Por último en este capítulo se realiza un análisis y una comparación de los resultados para los diferentes modelos de fuerza-deformación considerados, los diferentes grados de amortiguamiento y con respecto a algunos de los factores presentados por otros autores.

En el Capítulo 5 se explica el procedimiento para poder construir los espectros de diseño utilizando los factores obtenidos, junto con algunas consideraciones para este fin, como los valores de los movimientos máximos del suelo. Al final de este Capítulo se entregan conclusiones generales del estudio además de un resumen de todo lo expuesto en la presente investigación.

2. MODELO ESTRUCTURAL Y REGISTROS UTILIZADOS

En este Capítulo se presenta el sistema de un grado de libertad utilizado, la ecuación del movimiento, y los distintos modelos de relación fuerza-deformación considerados para la obtención de la respuesta inelástica. También se presenta el conjunto de registros utilizados, algunas de sus características, y las consideraciones cuando los registros presentan condiciones iniciales distintas de cero.

2.1 Sistema considerado y ecuación del movimiento

En este estudio se ocupó un sistema de un grado de libertad (1gdl) simple (Figura 2.1), considerando relaciones de fuerza-deformación dadas por tres modelos no lineales: elastoplástico, bilineal y con degradación de rigidez (Figura 2.2). Estos modelos cubren un amplio rango de casos de comportamiento estructural; la intención es representar comportamientos genéricos, más que características específicas de sistemas individuales en particular. Existe una base para establecer estos modelos, en primer lugar es necesario especificar el alcance de estos. Una aproximación posible es comenzar modelando a nivel de los materiales para predecir el comportamiento de las diferentes secciones, luego modelar miembros de la estructura y finalmente la estructura completa. Alternativamente se podría considerar un modelo como representativo de una parte de la estructura o incluso de la estructura completa. Esta última aproximación es la más apropiada para este estudio por tres razones: la primera es que es consistente con los supuestos considerados para el uso del método del espectro inelástico, es decir, una estructura compleja es representada por un sistema de 1gdl, las características de la fuerza de restitución de estos sistemas debe ser concordante con el comportamiento general de la estructura; la segunda es que es de gran importancia obtener una buena correlación con las tendencias generales de la respuesta de sistemas no lineales, por lo tanto el modelo debe ser representativo de una familia de estructuras, más que de una en particular. Y tercera, la función de

resistencia de una estructura completa no es sensible a deficiencias locales que pudieran existir, las imperfecciones locales en una conexión en particular por ejemplo, no deberían comprometer el comportamiento de toda la estructura.

La ecuación del movimiento del sistema considerado es la siguiente

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{u}(t) + R(u) = 0 \quad (2.1)$$

en que m es la masa del sistema, c es el coeficiente de amortiguamiento, x es el desplazamiento absoluto, $\ddot{x}(t)$ es la aceleración absoluta, $\ddot{y}(t)$ es la aceleración del suelo, u es el desplazamiento relativo de la masa con respecto al suelo ($u = x - y$) y $R(u)$ representa la relación fuerza-deformación del sistema considerado. Además si reemplazamos $\ddot{x} = \ddot{u} + \ddot{y}$, tenemos

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + R(u) = -m \ddot{y}(t) \quad (2.2)$$

La frecuencia circular no amortiguada ω y la fracción del amortiguamiento ξ están dados por

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

$$\xi = \frac{c}{2\omega m} = \frac{c}{2\sqrt{k m}} \quad (2.4)$$

en que k es la rigidez elástica inicial del sistema de 1gdl. La frecuencia circular ω esta relacionada con la frecuencia natural f y con el período T de la siguiente manera

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2.5)$$

La fracción del amortiguamiento crítico ξ se asume constante durante todo el movimiento.

Con las relaciones recién presentadas podemos reescribir la ecuación del movimiento (2.2) de la siguiente manera

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega \dot{u}(t) + \frac{R(u)}{m} = -\ddot{y}(t) \quad (2.6)$$

Para el cálculo de los espectros de respuesta los sistemas se identifican usualmente por sus frecuencias o períodos naturales, no siendo necesario especificar k y m de manera separada ya que solo interesa el cociente entre estas cantidades (Ec. 2.3). Además una propiedad importante de la Ecuación 2.6 es que $R(u)$ y $\ddot{y}(t)$ pueden ser escaladas por una constante y la ductilidad de la respuesta no cambia. Por otra parte la función de resistencia $R(u)$ es definida por la resistencia de fluencia R_y que a su vez depende de la deformación de fluencia u_y , de modo que

$$R_y = k u_y = m \omega^2 u_y \quad (2.7)$$

Con estas relaciones podemos calcular la respuesta de los diferentes sistemas, considerando un rango de frecuencias y amortiguamiento detallados en el Capítulo 3.1

2.2 Relaciones fuerza-deformación utilizadas en este estudio

Para representar el comportamiento histerético de elementos estructurales sometidos a cargas cíclicas se han desarrollado numerosos modelos. Riddell y Newmark (1979), presentan una discusión sobre distintos tipos de materiales y elementos estructurales y el modelo que mejor se adapta al comportamiento de cada uno, en base a ello plantean tres modelos de fuerza-deformación en su estudio estadístico de respuestas inelásticas. Estos modelos corresponden a los modelos

adoptados para nuestro estudio, es decir, elastoplástico, bilineal y con degradación de rigidez.

En el modelo elastoplástico tanto la carga como la descarga se realizan con la misma pendiente igual a la rigidez elástica inicial. La fluencia ocurre para una fuerza que se mantiene constante al aumentar las deformaciones inelásticas. Aunque este es un sistema ideal, difícilmente reproducible en sistemas reales, es el modelo más usado por su simplicidad lo que representa una gran ventaja, además de entregar resultados bastante satisfactorios para fines prácticos.

El modelo bilineal reconoce el fenómeno de endurecimiento que por lo general acompaña a las deformaciones plásticas, la pendiente de endurecimiento considerada es de un 0,03, este valor es considerado ya que no es común encontrar pendientes de endurecimiento mayores y además no es deseable una mayor influencia de este parámetro en el presente estudio. La carga y descarga ocurren siempre con una rigidez igual a la elástica. Este modelo es una idealización de la curva de histéresis que presentan muchos elementos y marcos de acero.

El modelo bilineal con degradación de rigidez simula la pérdida de rigidez en ciclos sucesivos de carga que presentan algunos elementos como marcos o muros de hormigón armado cuando existe un comportamiento flexural predominante y al igual que en el modelo bilineal se considera una pendiente de endurecimiento de un 0,03.

Estas tres idealizaciones permiten modelar con fines analíticos un amplio rango del comportamiento de los sistemas estructurales. De todas maneras es importante tener en cuenta que al usar modelos inelásticos la evidencia experimental disponible en relación con el comportamiento histerético de elementos y sistemas estructurales no es suficiente para predecir y definir con precisión las leyes que rigen dicho comportamiento, ya que son numerosos los

factores involucrados que pueden llegar a influir en dicho comportamiento, como por ejemplo: los materiales utilizados o el tipo de uniones.

Una conclusión importante del estudio de Riddell y Newmark (1979) es que la respuesta promedio de los tres modelos no varía en forma significativa y que el modelo elastoplástico, además de ser el más sencillo, conduce a resultados más conservadores por lo general. Esta hipótesis también es planteada para poderla comprobar en este estudio.

Una observación importante respecto al estudio de Riddell y Newmark (1979) es que solo se usaron diez registros, en nuestro caso el conjunto de registros utilizados es un set de 51 registros del Cinturón Circumpacífico, estos son los mismos utilizados por Riddell, García y Garcés en un estudio más reciente (2002), donde además se consideraron los mismos tipos de relación fuerza-deformación.

2.3 Registros y datos utilizados

Como ya se menciona, para el presente estudio se utilizaron 51 Registros del Cinturón Circumpacífico. En la Tabla 2.1 se presentan los registros utilizados junto con algunas de sus características. Estos registros representan movimientos del suelo de moderada a gran intensidad que se seleccionaron por su relevancia desde el punto de vista de la respuesta estructural. La mayoría de los registros presentados en la Tabla 2.1, presentan al menos dos de las siguientes condiciones: se observó daño estructural cerca del sitio del registro, aceleración máxima del suelo mayor a 0,25g, y velocidad máxima del suelo mayor a 25 cm/s.

No se intentó agrupar estos registros de acuerdo a características similares de las condiciones del suelo, características tectónicas, Intensidad de Mercalli, distancia a la falla, u otras; la razón fue en parte la falta de información confiable, por ejemplo en información geotécnica, y además la dificultad para formar grupos de significancia estadística. Es importante señalar que los factores que han sido

derivados para este grupo de registros en el presente estudio no pretenden ser extrapolados directamente a suelos extremadamente blandos, ya que la mayoría de los registros de movimientos del suelo considerados corresponden a suelos firmes.

Para cada uno de los 51 registros se obtiene un espectro de respuesta para cada 6 valores de ductilidad, 7 de amortiguamiento y para cada uno de los tipos de relación fuerza-deformación, es decir, obtenemos un total de 6.426 espectros.

2.4 Registros con condiciones iniciales

Los registros han sido corregidos; primero considerando como término del registro el último cruce por cero de la velocidad, lo que es necesario para evitar distorsión de la respuesta que se calcula hasta $T/2$ (T =período del sistema) después del término del registro, ya que la respuesta máxima puede ocurrir una vez terminado el movimiento. Además se considera un pulso inicial para aquellos casos en que las condiciones iniciales del movimiento del suelo son distintas de cero, de manera de imponer apropiadamente condiciones iniciales de reposo del sistema, en la Figura 2.3 se muestra el gráfico del registro de Valparaíso del 03 de marzo de 1985 (los demás registros se incluyen en el Anexo 1). Condiciones iniciales del suelo distintas de cero se presentan porque en registros analógicos se pierde una porción inicial del movimiento del suelo, ya que el acelerógrafo no comienza a funcionar desde el comienzo de la excitación, sino cuando ésta sobrepasa cierto umbral, límite inferior para el cual el instrumento comienza automáticamente a grabar. Cuando usamos estos registros, con condiciones iniciales para el movimiento del suelo, en el cálculo de la respuesta del sistema de 1gdl se presenta el problema de que las condiciones iniciales del oscilador son desconocidas. En efecto, si designamos por t_0 el instante para el cual comienza el registro, las condiciones iniciales son

$$u(t_0) = x(t_0) - y(t_0) \quad (2.8)$$

$$\dot{u}(t_0) = \dot{x}(t_0) - \dot{y}(t_0) \quad (2.9)$$

en que $y(t_0)$ e $\dot{y}(t_0)$ son los valores especificados para el desplazamiento y la velocidad inicial del suelo (valores ficticios, supuestamente adecuados, resultantes del procedimiento de ajuste de la línea base), pero $x(t_0)$ y $\dot{x}(t_0)$ son desconocidos, pues dependen de la respuesta del sistema a la porción perdida del movimiento.

La hipótesis habitual es considerar condiciones iniciales igual a cero, es decir el sistema parte en reposo

$$u(t_0) = 0 \quad (2.10)$$

$$\dot{u}(t_0) = 0 \quad (2.11)$$

las que serían erróneas en este caso, ya que considerando las ecuaciones 2.8 y 2.9, esto significaría que $x(t_0) = y(t_0)$ y $\dot{x}(t_0) = \dot{y}(t_0)$, es decir que el oscilador se movió solidariamente con el suelo, lo que solo puede ser cierto para un sistema infinitamente rígido. De lo anterior se desprende que el espectro de respuesta que se obtenga estará distorsionado, especialmente para el rango de frecuencias mas bajas. De hecho en el rango de frecuencias muy bajas las condiciones iniciales mas apropiadas serían $x(t_0) = 0$ y $\dot{x}(t_0) = 0$, lo que implica

$$u(t_0) = -y(t_0) \quad (2.12)$$

$$\dot{u}(t_0) = -\dot{y}(t_0) \quad (2.13)$$

lo que en estricto rigor sería correcto solamente para un oscilador infinitamente flexible, y se explica físicamente pensando que tal sistema no experimenta movimiento absoluto alguno mientras su base se desplaza.

En resumen, las condiciones iniciales dadas por las Ecuaciones 2.10 y 2.11 sólo son válidas para sistemas infinitamente rígidos, y las dadas por las ecuaciones 2.12 y 2.13 son sólo válidas para sistemas infinitamente flexibles, por lo tanto ninguna es apropiada para el rango de frecuencias intermedias. Esto es lo que solucionamos considerando un pulso de aceleración en el acelerograma original (Pecknold, y Riddell, 1979). Este pulso parte con aceleración igual a cero, y termina con la aceleración con que comienza el registro, y además sus integrales son tales que, iniciándose en valores nulos, resultan en los valores de la velocidad y desplazamiento del suelo en el instante t_0 . El resto del registro permanece inalterado.

Tabla 2.1 Registros sísmicos considerados.

Estación, Componente, Fecha	Aceleración máxima (g)	Velocidad máxima (cm/s)	Desplazamiento máximo (cm)	Δt	desplazamiento inicial (cm)	velocidad inicial (cm/seg)
CMD VERNON, CA., U.S.A., COMPONENTE S08W (10/03/1933)	-0,133	-29,03	-19,5	0,02	-3,764	-9,86
EL CENTRO, CA., U.S.A., COMPONENTE S00E (18/05/1940)	-0,348	-33,45	-12,36	0,02	-2,159	4,66
OLYMPIA, WA., U.S.A., COMPONENTE N86E (13/04/1949)	0,28	17,09	-9,38	0,02	0,767	-0,82
EUREKA, CA., U.S.A., COMPONENTE N79E (21/12/1954)	0,258	-29,38	-12,55	0,02	-0,168	0,54
FERNDAL, CA., U.S.A., COMPONENTE N44E (21/12/1954)	-0,159	-35,65	14,72	0,02	0,366	0,3
KUSHIRO KISOY-DAL, JAPÓN, COMPONENTE N90E (23/04/1962)	0,478	-20,01	5,22	0,02	-0,061	-2,32
OCHIAI BRIDGE, JAPÓN, COMPONENTE N00E (5/04/1966)	-0,276	23,66	8,36	0,02	2,443	-1,57
TEMBLO, U.S.A., COMPONENTE S25W (27/06/1966)	0,348	-22,52	-5,55	0,02	-0,87	-0,13
CHOLAME N.2, CA., U.S.A., COMPONENTE N65E (27/06/1966)	0,489	78,08	-26,27	0,02	1,575	2,11
CHOLAME N.5, CA., U.S.A., COMPONENTE N85E (27/06/1966)	0,434	25,44	-6,89	0,02	0,012	-0,77
LIMA, PERÚ, COMPONENTE N08E (17/10/1966)	0,409	-15,2	-11,67	var	0	0
EL CENTRO, CA., U.S.A., COMPONENTE S00W (8/04/1968)	0,13	-25,81	12,96	0,02	0,782	-0,64
HACHINOHE, JAPÓN, COMPONENTE N00E (16/05/1968)	0,269	-35,43	-9,68	0,02	0,195	-0,41
AOMORI, JAPÓN, COMPONENTE N00E (16/05/1968)	-0,257	-39,12	-19,97	0,02	0,059	0,41
MURORAN, JAPÓN, COMPONENTE N00E (16/05/1968)	-0,22	30,28	7,9	0,02	-0,024	0,57
ITAJIMA BRIDGE, JAPÓN, COMPONENTE LONGITUDINAL (06/08/1968)	0,612	-22,56	-4,59	0,02	0,13	-0,67
ITAJIMA BRIDGE, JAPÓN, COMPONENTE LONGITUDINAL (21/09/1968)	-0,261	-12,93	-2,8	0,02	0,987	-0,39
TOYOHAMA BRIDGE, JAPÓN, COMPONENTE LONGITUDINAL (05/01/1971)	0,45	15,9	3,38	0,02	-0,3	1,51
PACOIMA, CA., U.S.A., COMPONENTE S16E (9/02/1971)	1,171	113,23	-41,92	0,02	-0,425	-1,23
ORION L.A., CA., U.S.A., COMPONENTE N00W (09/02/1971)	0,255	30	16,53	0,02	1,275	2,99
CASTAIC, CA., U.S.A., COMPONENTE N21E (09/02/1971)	0,316	17,16	-5,05	0,02	-0,132	-2,82
SAN JUAN, ARGENTINA, COMPONENTE S90E (23/11/1977)	0,193	-20,6	6,33	0,02	-0,099	0,14

Tabla 2.1 (Continuación).

Estación, Componente, Fecha	Aceleración máxima (g)	Velocidad máxima (cm/s)	Desplazamiento máximo (cm)	Δt	desplazamiento inicial (cm)	velocidad inicial (cm/seg)
VENTANAS, CHILE, COMPONENTE TRANSVERSAL (07/11/1981)	0,268	-17,87	-8,04	var	0	0
PAPUDO, CHILE, COMPONENTE LONGITUDINAL (07/11/1981)	-0,603	-18,93	-7,43	var	0	0
LA LIGUA, CHILE, COMPONENTE LONGITUDINAL (07/11/1981)	-0,469	-18,83	4,49	var	0	0
RAPEL, CHILE, COMPONENTE N00E (03/03/1985)	0,467	-21,64	-6,54	0,01	0,39	-0,26
ZAPALLAR, CHILE, COMPONENTE N90E (03/03/1985)	0,304	13,46	-1,69	0,01	-0,019	-0,2
LLO LLEO, CHILE, COMPONENTE N10E (03/03/1985)	-0,712	-40,29	-10,49	0,01	0,003	1,2
VÍÑA DEL MAR, CHILE, COMPONENTE S20W (03/03/1985)	0,363	30,74	-5,42	0,01	-0,005	-2,08
VALPARAISO, U.F.S.M, CHILE, COMPONENTE N70E (03/03/1985)	0,176	14,6	3,11	0,01	0,002	0,92
PAPUDO, CHILE, COMPONENTE S40E (03/03/1985)	0,231	12,41	1,6	0,01	0,001	0,29
LLAYLLAY, CHILE, COMPONENTE S10W (03/03/1985)	-0,352	-41,79	8,43	0,01	-0,005	-2,03
SAN FELIPE, CHILE, COMPONENTE N80E (03/03/1985)	0,434	-17,77	-3,5	0,01	0	0,2
EL ALMENDRAL, CHILE, COMPONENTE N50E (03/03/1985)	0,297	-28,58	-5,78	0,01	0,002	0,81
MELIPILLA, CHILE, COMPONENTE N00E (03/03/1985)	-0,686	34,25	12,02	0,01	-1,186	-2,47
PICHILEMU, CHILE, COMPONENTE N00E (03/03/1985)	0,259	-11,68	3,73	0,01	-0,107	-0,08
ILOCA, CHILE, COMPONENTE N90E (03/03/1985)	0,278	15,09	1,39	0,01	-0,009	0,15
SCT, MÉXICO, COMPONENTE N90E (19/09/1985)	-0,171	-60,61	21,16	var	-0,07	0,3
CORRALITOS, CA., U.S.A., COMPONENTE N00E (18/10/1989)	0,63	-55,2	12,03	0,02	0	0
KSR KUSHIRO JAPÓN, COMPONENTE N63E (15/01/1993)	0,725	33,59	4,73	0,01	0	0
PACOIMA DAM, CA., U.S.A., COMPONENTE S05E (17/01/1994)	-0,415	44,68	4,65	0,02	0,145	0,78
NEWHALL, CA., U.S.A., COMPONENTE N00E (17/01/1994)	0,591	-94,73	28,81	0,02	-1,96	-4,25
PACOIMA-KAGEL, CA., U.S.A., COMPONENTE N00E (17/01/1994)	0,433	-50,88	-6,64	0,02	-0,513	-1,25
SYLMAR, CA., U.S.A., COMPONENTE N00E (17/01/1994)	0,843	-128,88	-30,67	0,02	0	0

Tabla 2.1 (Continuación).

Estación, Componente, Fecha	Aceleración máxima (g)	Velocidad máxima (cm/s)	Desplazamiento máximo (cm)	Δt	desplazamiento inicial (cm)	velocidad inicial (cm/seg)
SANTA MONICA, CA., U.S.A., COMPONENTE N90E (17/01/1994)	-0,883	41,75	-15,09	0,02	-0,505	0,01
MOORPARK, CA., U.S.A., COMPONENTE S00E (17/01/1994)	0,292	20,28	4,67	0,02	0,304	-1
CASTAIC, CA., U.S.A., COMPONENTE N90E (17/01/1994)	0,568	-51,51	-9,19	0,02	-0,35	-1,24
ARLETA, CA., U.S.A., COMPONENTE N90E (17/01/1994)	0,344	-40,37	8,36	0,02	-0,916	-3,21
CENTURY CITY L.A., CA., U.S.A., COMPONENTE N90E (17/01/1994)	0,256	21,36	-6,51	0,02	-0,365	0,1
OBREGON PARK L.A., CA., U.S.A., COMPONENTE N00E (17/01/1994)	-0,408	-30,86	-2,65	0,02	-0,041	0,11
HOLLYWOOD LA, CA., U.S.A., COMPONENTE N00E (17/01/1994)	-0,389	22,26	4,27	0,02	-0,011	0,08

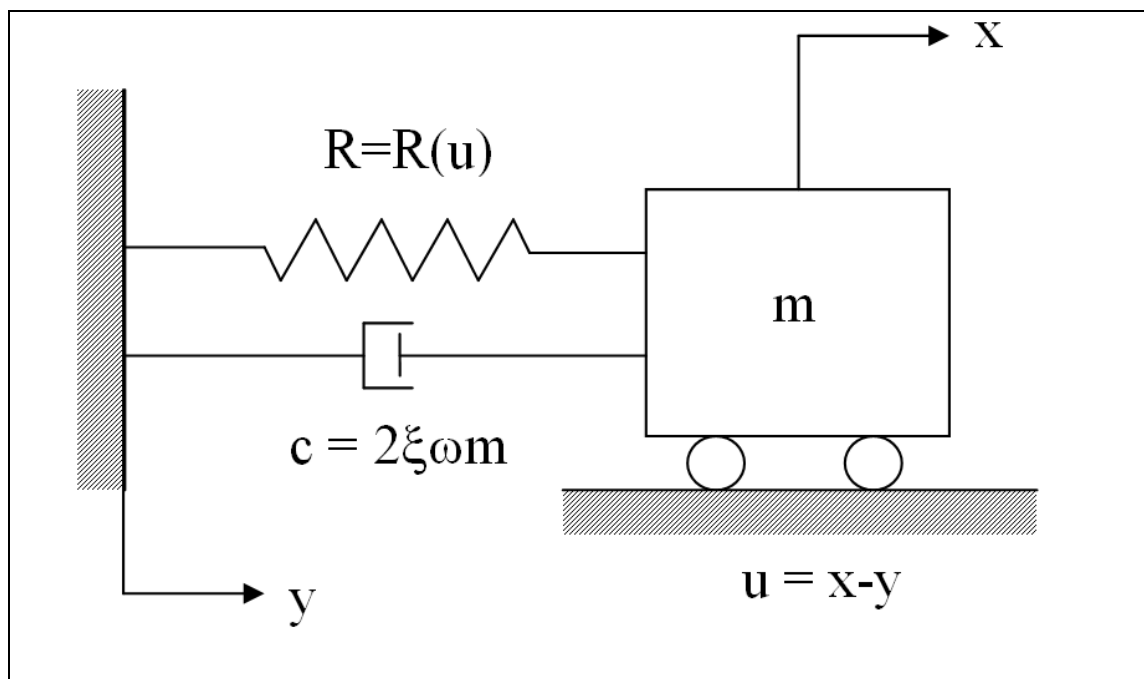


Figura 2.1 Modelo de un grado de libertad.

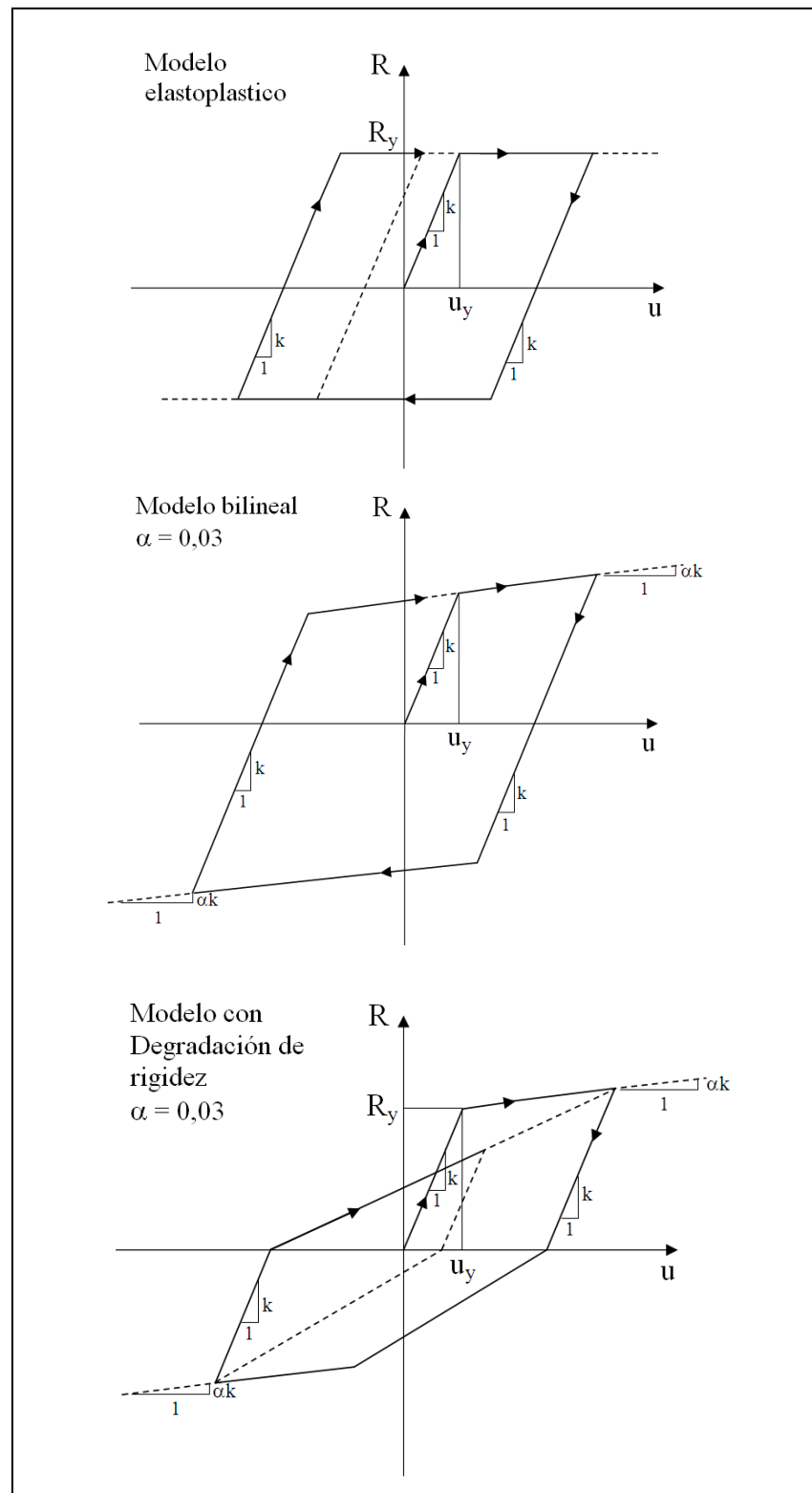


Figura 2.2 Modelos no lineales de fuerza-deformación utilizados.

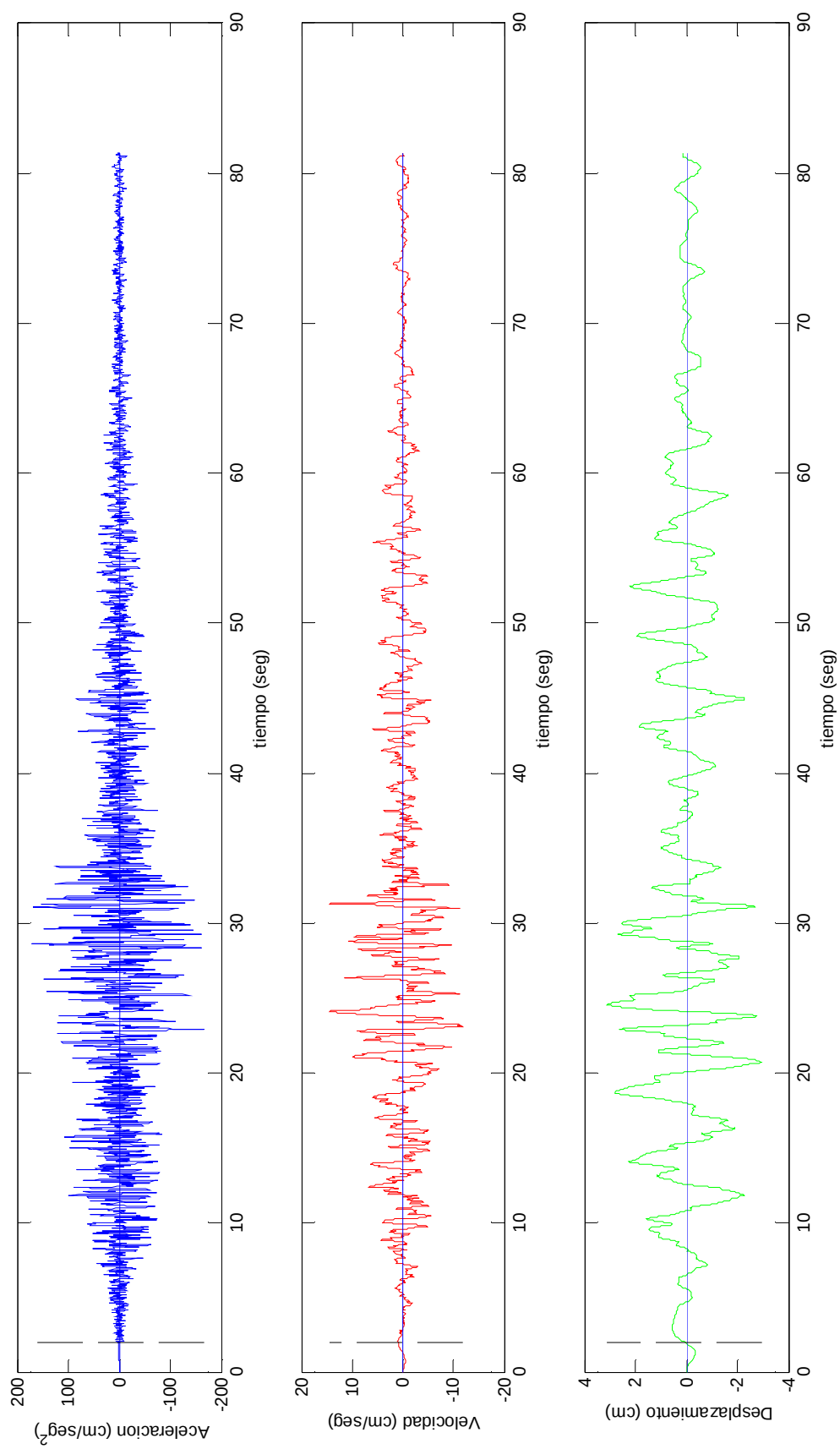


Figura 2.3

Registro Valparaíso, U.T.F.S.M., 03/03/1985, corregido.

3. CALCULO DE ESPECTROS DE RESPUESTA

En este Capítulo se presentan en primer lugar el procedimiento de integración para calcular la respuesta de cada sistema y el programa utilizado para este fin. Se explica además como se obtiene el espectro de respuesta para un rango de frecuencias, a partir del procedimiento anterior. También se describe el fin que tiene la normalización de los datos, previa al análisis estadístico. Y finalmente se describen algunas características propias de los espectros.

3.1 Procedimientos de integración y programas utilizados

Para calcular los espectros de respuesta se utilizó el programa SPEC-95 (Riddell y García, 1995), programa desarrollado en lenguaje Fortran, para el cálculo de sistemas elásticos e inelásticos de un grado de libertad sometidos a una excitación basal. Este programa se adaptó para trabajar en PC bajo ambiente MS-DOS.

Para cada registro la respuesta se calculó para un set de 250 frecuencias distribuidas uniformemente en escala logarítmica en el intervalo 0,02 – 50 cps. Además para la respuesta inelástica se consideraron seis valores prefijados de la ductilidad de desplazamiento ($\mu=1; 1,5; 2; 3; 5$ y 10) y siete valores de amortiguamiento ($\xi=0; 2; 5; 10; 20; 50$ y 100%), esto para los tres casos de relación fuerza-deformación, es decir, para cada registro se calculó la respuesta de 31.500 sistemas diferentes cuyos resultados se presentan en forma de espectros de respuesta, en gráficos logarítmicos tripartitos.

Para encontrar la solución de la ecuación del movimiento se integra numéricamente usando el método de Newmark con el parámetro $\beta=1/6$, que corresponde a suponer una variación lineal de la aceleración $\ddot{u}$ en el intervalo de integración (Newmark y Hall, 1982). La integración numérica consiste

básicamente en determinar las variables de estado del sistema (desplazamiento, velocidad y aceleración) al final de cada intervalo de tiempo, de modo que se satisfaga la ecuación diferencial del movimiento. El intervalo de tiempo Δt usado para la integración varía para cada sistema, tomando un intervalo igual a $T/30$ para sistemas bilineales y $T/20$ para sistemas elasto-plásticos y con degradación de rigidez, en que T es el período de vibración no amortiguado de la estructura. Lo anterior nos garantiza la convergencia del método de Newmark, pero además nos garantiza una buena representación de los puntos de la relación $R(u)$ en las zonas de las esquinas donde cambia la pendiente (ver Figura 3.1). De todas maneras cabe mencionar que el intervalo de integración real puede ser menor dado que la integración se realiza a lo menos en todos los puntos en que está definida la excitación basal, estos valores dependen de la forma en que fueron tomados los datos, en el Capítulo anterior (Tabla 2.1) podemos ver el intervalo con que fueron tomados los datos para cada registro, además de las condiciones iniciales del suelo, también necesarias para resolver la ecuación del movimiento del sistema.

3.2 Obtención de espectros de respuesta

Los resultados del análisis de la respuesta para los diferentes sistemas son presentados en forma de gráficos logarítmicos tripartitos (Figuras 3.2 y 3.3). En este caso la abscisa es la frecuencia ($f=\omega/2\pi$), pero el período ($T=1/f$) puede ser leída en forma simultánea tal como si el gráfico fuera un reflejo del gráfico original con T como abscisa. Este tipo de gráfico, llamado espectro inelástico de fluencia (también conocido como espectro inelástico de ductilidad constante, Chopra, 1995), muestra en el eje de desplazamiento la deformación de fluencia u_y necesaria para limitar la deformación máxima $|u|_{max}$ del sistema de modo que se obtenga la ductilidad escogida. El eje de la aceleración, que se encuentra al girar 90° desde el eje de desplazamientos en dirección de las agujas del reloj, muestra la cantidad $\omega^2 u_y$, que multiplicada por la masa del sistema entrega la resistencia de fluencia R_y . En el gráfico logarítmico tripartito las cantidades espectrales en los

ejes de desplazamiento, velocidad y aceleración están interrelacionados; en efecto, denotándolos como S_d , S_v y S_a , respectivamente, podemos establecer la siguiente relación

$$S_v = \omega S_d \quad (3.1)$$

$$S_a = \omega S_v = \omega^2 S_d \quad (3.2)$$

La ductilidad de la respuesta μ es definida como el cociente entre el desplazamiento máximo, $|u|_{max}$, sin considerar el signo, y el desplazamiento de fluencia, es decir

$$\mu = \frac{|u|_{max}}{u_y} \quad (3.3)$$

Los distintos niveles de ductilidad en una estructura son importantes ya que implican una reducción del espectro de diseño. Es por ello que se necesita evaluar razonablemente la ductilidad que se considerará en el análisis, con respecto a esto es importante tener en cuenta las diferencias entre las distintas ductilidades involucradas en la respuesta de una estructura frente a una carga dinámica. Debemos diferenciar el factor de ductilidad que puede desarrollar un miembro de la estructura, como puede ser la capacidad de deformación angular en una sección de un elemento flexural, el factor de ductilidad de un piso completo en un edificio y la ductilidad global del edificio, que será la que se use, por ejemplo, en el cálculo del corte basal mediante los valores de la respuesta espectral.

La ductilidad de un elemento, o un piso completo, y la ductilidad global de un edificio dependen todas de la relación fuerza-deformación considerada. Para la ductilidad de un elemento estructural, podemos por ejemplo considerar, la rotación y/o curvatura de una sección cualquiera de él. La ductilidad en un piso de un edificio puede definirse mediante una relación en que el desplazamiento

considerado es la deflexión relativa entre el piso superior y el piso inferior. La ductilidad global es un indicador general de las ductilidades de todos los pisos del edificio, y está definida considerando un patrón particular de desplazamientos correspondientes a un modo particular o una combinación de los modos de vibración de la estructura; por ejemplo podemos considerar la ductilidad asociada a la respuesta de un modelo de pushover del edificio completo.

De la discusión anterior se puede observar que la ductilidad local de un elemento individual puede llegar a ser mucho mayor que la ductilidad del piso al que pertenece dicho elemento, y la ductilidad del piso a su vez puede ser mayor que la ductilidad global. Por ejemplo, si pensamos en un factor de ductilidad global entre 3 y 5 en una estructura, el factor de ductilidad de algún entre-piso podría ser mayor que 5, y la ductilidad de un elemento particular podría estar en un rango de 5 a 15, o incluso ser mayor. Con respecto a este punto es importante recordar que el factor de ductilidad, como lo hemos definido acá, está dado por la razón entre la deformación máxima absoluta y la deformación de fluencia del modelo de 1gdl equivalente.

Considerando la propiedad de la Ecuación 2.6 antes mencionada, si μ es la ductilidad de la respuesta de un sistema con función de resistencia definida por R_y y u_y cuando está sometido a un movimiento del suelo $\ddot{y}(t)$, la respuesta de un nuevo sistema con $R'_y = \lambda R_y$ y $u'_y = \lambda u_y$ sometido a un movimiento del suelo $\ddot{y}'(t) = \lambda \ddot{y}(t)$, con $\lambda = \text{constante}$, será tal que $\mu' = \mu$. La importancia de esta propiedad es que permite escalar o normalizar los movimientos del suelo y el espectro de respuesta inelástico con el propósito de calcular las amplificaciones promedio para una familia de registros. Aplicando esta propiedad y debido a la forma en que es construido el espectro inelástico, este puede ser escalado o normalizado directamente por un factor λ , que es equivalente a un desplazamiento paralelo de las ordenadas espectrales en dirección vertical.

Si consideramos el eje de aceleración espectral para el caso del espectro elástico ($\mu=1$), el desplazamiento de fluencia es equivalente al máximo desplazamiento relativo $|u|_{max}$, en este caso si multiplicamos la pseudoaceleración S_a por la masa del sistema obtenemos la fuerza máxima del resorte

$$R_{\max} = k |u_y| = m \omega^2 S_d = m S_a \quad (3.4)$$

Para los sistemas elastoplásticos también se cumple esta relación, mientras que para los sistemas bilineales y con degradación de rigidez con factor de endurecimiento α_s la fuerza máxima en el resorte se obtiene con la siguiente expresión

$$R_{\max} = m \omega^2 u_y [1 + \alpha_s (\mu - 1)] \quad (3.5)$$

Otra forma de presentar la respuesta inelástica es por medio del espectro de desplazamiento o de deformación total, el que presenta el máximo desplazamiento relativo $|u|_{max}$ en el eje de desplazamientos. El espectro de deformación total se puede obtener directamente del espectro inelástico de fluencia multiplicando por el valor de la ductilidad.

3.3 Normalización de los datos y espectros promedio

Como trabajaremos con espectros de respuesta es conveniente tener en cuenta la siguiente notación, consideraremos que cada punto espectral S_i depende de cierto número de parámetros

$$S_i = S_i(f, \xi, \mu, R) \quad (3.6)$$

donde f , ξ , μ y R , corresponden a la frecuencia, factor de amortiguamiento, ductilidad y función de resistencia respectivamente, y el subíndice i denota los diferentes registros utilizados.

Por simplicidad, los parámetros ξ , μ y R se omitirán a continuación, pero se entiende que se debe realizar el mismo procedimiento para los siete valores de amortiguamiento considerados, para los seis valores de ductilidad y para los tres modelos de relación fuerza-deformación. De esta manera podemos reescribir la Ecuación 3.6 de la siguiente forma

$$S_i = S_i(f) \quad i = 1, 2, \dots, 51 \quad (3.7)$$

Dado que los movimientos del suelo para cada uno de los registros sísmicos difieren unos de otros, si hacemos una comparación entre dos espectros de respuesta cualquiera podemos observar que la intensidad influye notablemente, en la Figura 3.4 se observa un ejemplo de la diferencia entre dos espectros con distinta intensidad del movimiento del suelo. Debido a que cada uno de los espectros de respuesta está asociado a una intensidad específica del movimiento del suelo, no podemos comparar los datos directamente, con el objeto de hacer esta comparación de formas espectrales y particularmente de niveles de amplificación de la respuesta necesitamos escalar los espectros a algún parámetro predeterminado. Para este estudio realizaremos tres normalizaciones, estas serán con respecto a los valores absolutos máximos del movimiento del suelo, es decir, aceleración, velocidad y desplazamiento máximo (PGA, PGV y PGD del inglés peak ground acceleration, peak ground velocity y peak ground displacement, respectivamente) a lo largo de todo el rango de frecuencias. Debemos poner una especial consideración para la normalización a aceleraciones en el rango de altas frecuencias, para la normalización a velocidad en el rango de frecuencias intermedias y para normalización a desplazamiento en el rango de frecuencias más bajas.

La normalización tiene por objetivo medir la amplificación espectral relativa a la intensidad del movimiento del suelo basado en los trabajos clásicos de Veletsos, Newmark y Hall (1960, 1964, 1965, 1973 y 1982). Por otra parte se ha

demostrado que existe correlación entre la intensidad del movimiento del suelo (PGA, PGV y PGD) con las ordenadas espectrales, pero dependiendo de la zona espectral, ya que no existe un índice que se adapte de manera satisfactoria en todo el rango de frecuencias del espectro. Esto fue demostrado en el estudio de Riddell (2007), en que los índices relacionados con la aceleración del suelo tienen una mejor correlación en la región del espectro sensible a aceleración; los índices basados en la velocidad del suelo son mejores en la región sensible a la velocidad y, correspondientemente ocurre lo mismo en la región sensible al desplazamiento.

De acuerdo a la Ecuación 3.7, si denominamos $S_i(f)$ el espectro de respuesta para el i -ésimo registro las ordenadas de los espectros normalizados se definen como

$$\psi_{Q_i}(f) = \frac{S_i(f)}{Q_i} \quad i = 1, 2, \dots, 51 \quad (3.8)$$

donde Q_i puede ser A_i , V_i o D_i , el valor absoluto máximo de la aceleración, velocidad o desplazamiento del i -ésimo registro, respectivamente. Claramente ψ es el factor de amplificación de la respuesta con respecto a los valores máximos del movimiento del suelo.

Para calcular los espectros promedio se consideraron los espectros normalizados a aceleración, velocidad y desplazamiento, para cada registro. En las Figuras 3.5 a 3.7 podemos ver tres casos de espectros promedio, uno para sistema elastoplástico otro para un sistema bilineal y el tercero para un sistema con degradación de rigidez, en cada figura aparecen las tres normalizaciones, a aceleración (PGA), velocidad (PGV) y desplazamiento (PGD), además se muestra en cada caso el promedio más una desviación estándar. Los tres espectros corresponden al caso de ductilidad $\mu=3$ y amortiguamiento $\xi=5\%$. Es claro como la desviación estándar de los datos varía dependiendo de la normalización considerada y la región espectral que nos interesa estudiar. Algo importante de

notar es que para la normalización a aceleración en la región de aceleración (altas frecuencias) la dispersión de los datos es menor precisamente en esa zona, lo que se aprecia porque la curva del promedio mas una desviación estándar es bastante cercana al promedio, lo mismo ocurre para la normalización a desplazamiento con la zona de bajas frecuencias, mientras que para la normalización a velocidad podemos ver que la curva del promedio mas una desviación estándar esta a una distancia mas o menos regular en todo el rango de frecuencias. Esto es de suma importancia ya que justifica el hecho de considerar cada una de las normalizaciones para analizar la zona respectiva, separando el rango de frecuencias en las tres zonas ya conocidas, desplazamiento, velocidad y aceleración. Así en la normalización a desplazamiento pondremos especial atención a la zona de bajas frecuencias, en la normalización a velocidad a la zona de frecuencias intermedias, y en la normalización a aceleración a la zona de altas frecuencias.

3.4 Observaciones generales de los espectros de respuesta

En primer lugar cabe mencionar que las formas de los espectros pueden variar considerablemente entre los espectros obtenidos para los distintos registros sísmicos y además presentan una variación importante a medida que aumentamos el amortiguamiento considerado, en las Figuras 3.8 y 3.9 vemos una comparación de los espectros elásticos ($\mu=1$), normalizados, para los registros de Kushiro Kisyō-Dai ,23/04/1962 y La Ligua, 07/11/1981, considerando un 2% de amortiguamiento y un sistema elastoplástico, en las Figuras 3.10 y 3.11 vemos los mismos espectros anteriores pero esta vez consideramos un amortiguamiento de 20%. Para el caso del amortiguamiento, vemos que mientras menor es éste el espectro es mucho más irregular, con muchos saltos, mientras que al aumentarlo las curvas del espectro se hacen mucho más suaves pero manteniendo una forma más o menos similar.

Para el caso de la ductilidad sucede algo parecido, ya que a medida que la ductilidad aumenta, si dejamos el amortiguamiento constante, vemos que las curvas se van suavizando y decreciendo (ver Figuras 3.2 y 3.3).

Con respecto al tipo de relación fuerza deformación utilizada, podemos observar (Figuras 3.12 a 3.14) que los espectros de respuesta para un mismo registro son muy similares, independiente del amortiguamiento o la ductilidad considerada, esto es tremendamente favorable, ya que nos permite plantear que siempre la aproximación usando un sistema elastoplástico será una buena opción dada su simpleza y facilidad de implementar, para el análisis y diseño sísmico de una estructura.

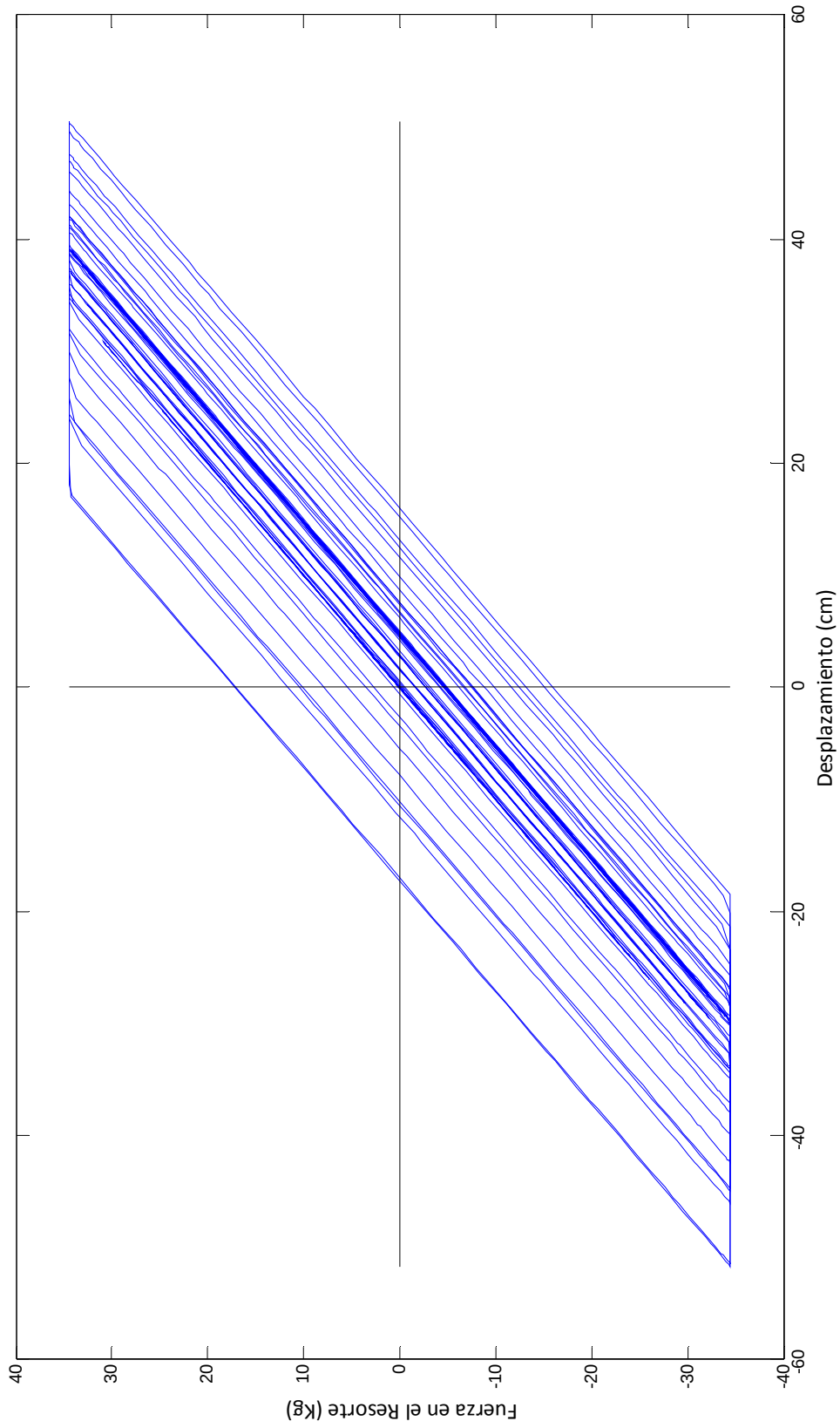


Figura 3.1 Curva desplazamiento v/s fuerza en el resorte, registro SCT, México (19/09/1985), ductilidad $\mu=1,5$, frecuencia $f=0,5$ Hz, amortiguamiento $\xi=0\%$, sistema elastoplástico.

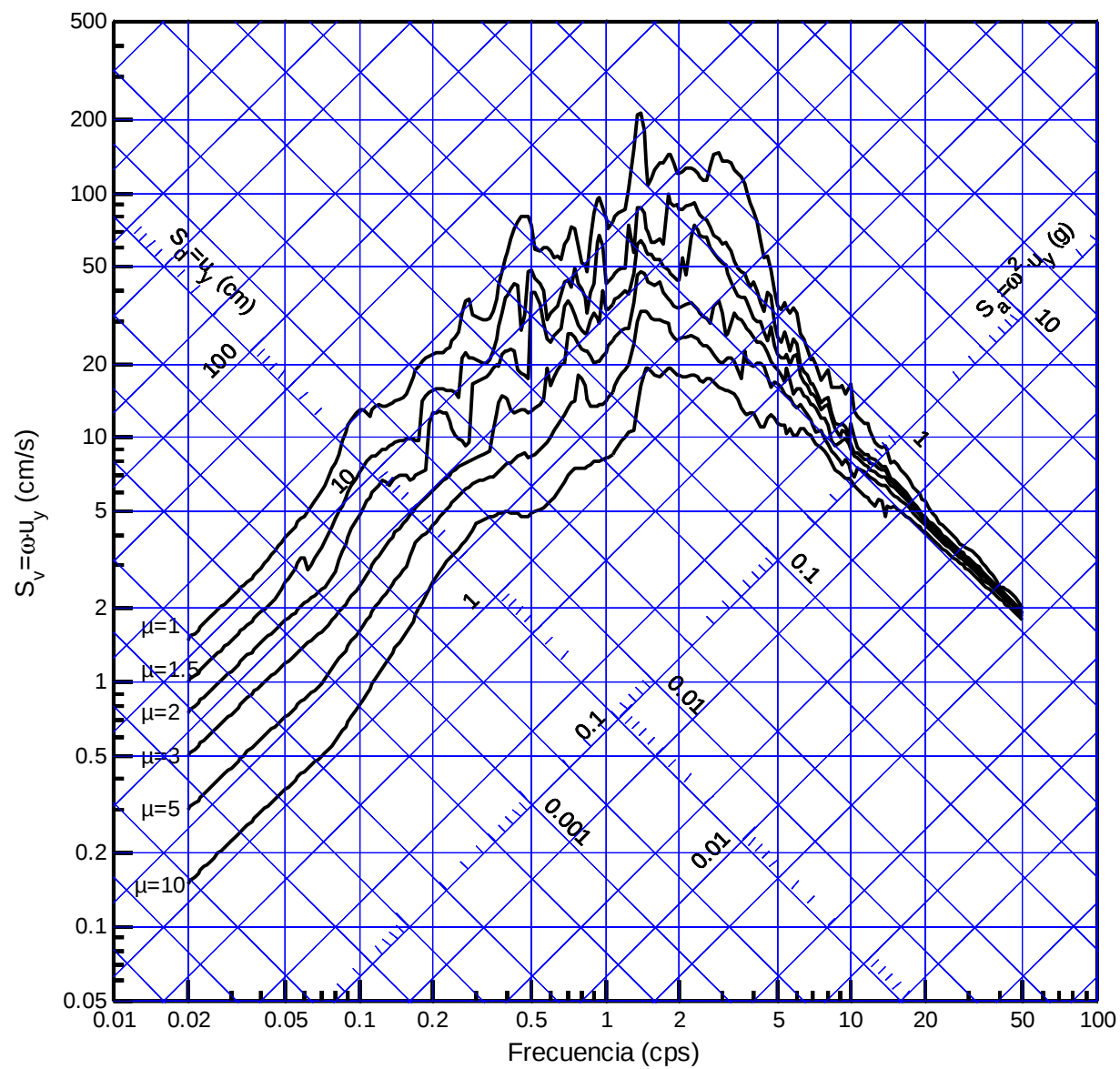


Figura 3.2 Espectros de respuesta para modelo elastoplástico, amortiguamiento $\xi=2\%$, registro Corralitos (18/10/1989).

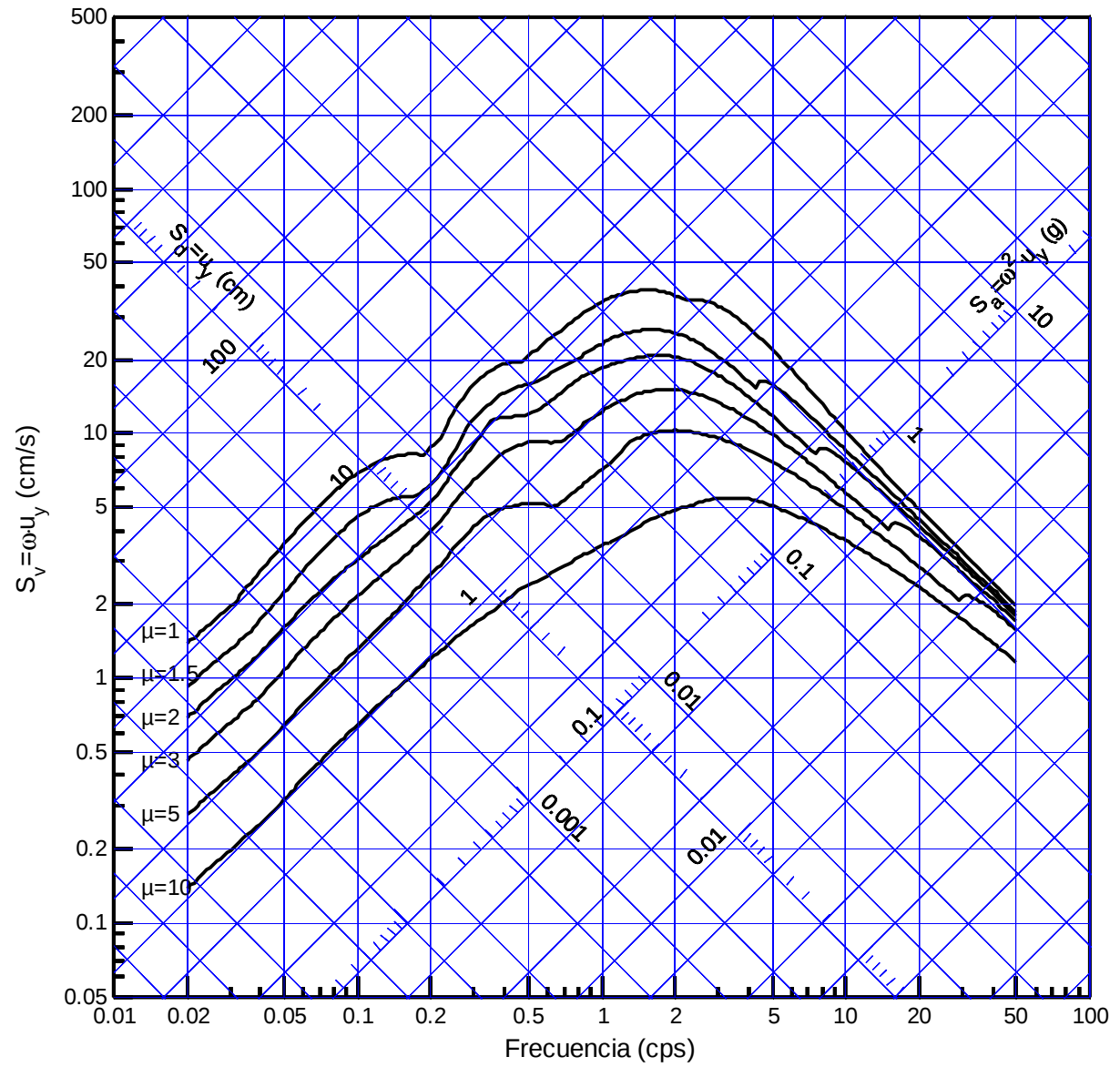


Figura 3.3 Espectros de respuesta para modelo elastoplástico, amortiguamiento $\xi=50\%$, registro Corralitos (18/10/1989).

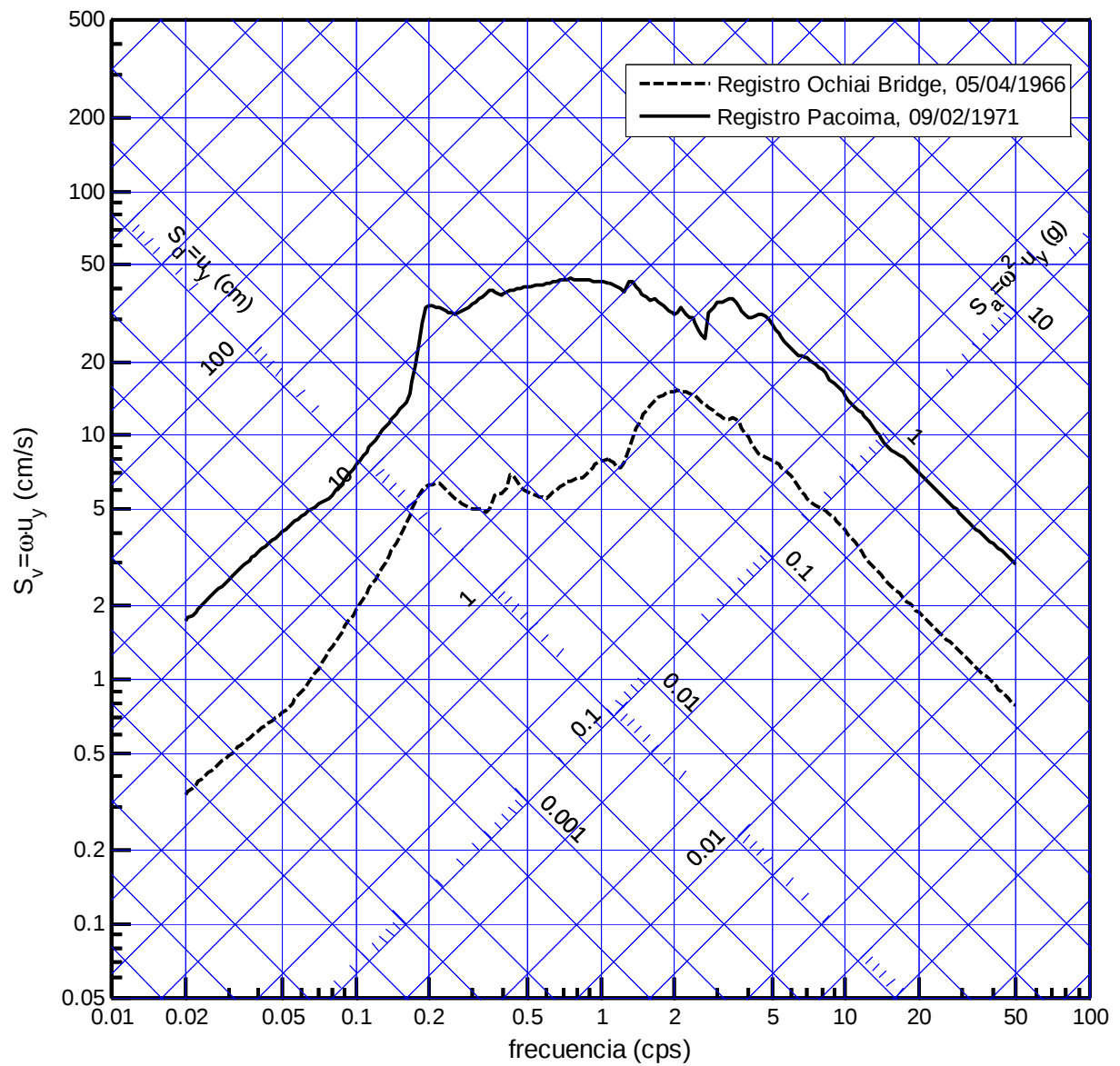


Figura 3.4 Comparación de espectros de respuesta, amortiguamiento $\xi=10\%$, ductilidad $\mu=3$, modelo bilineal, registros Ochiai Bridge y Pacoima.

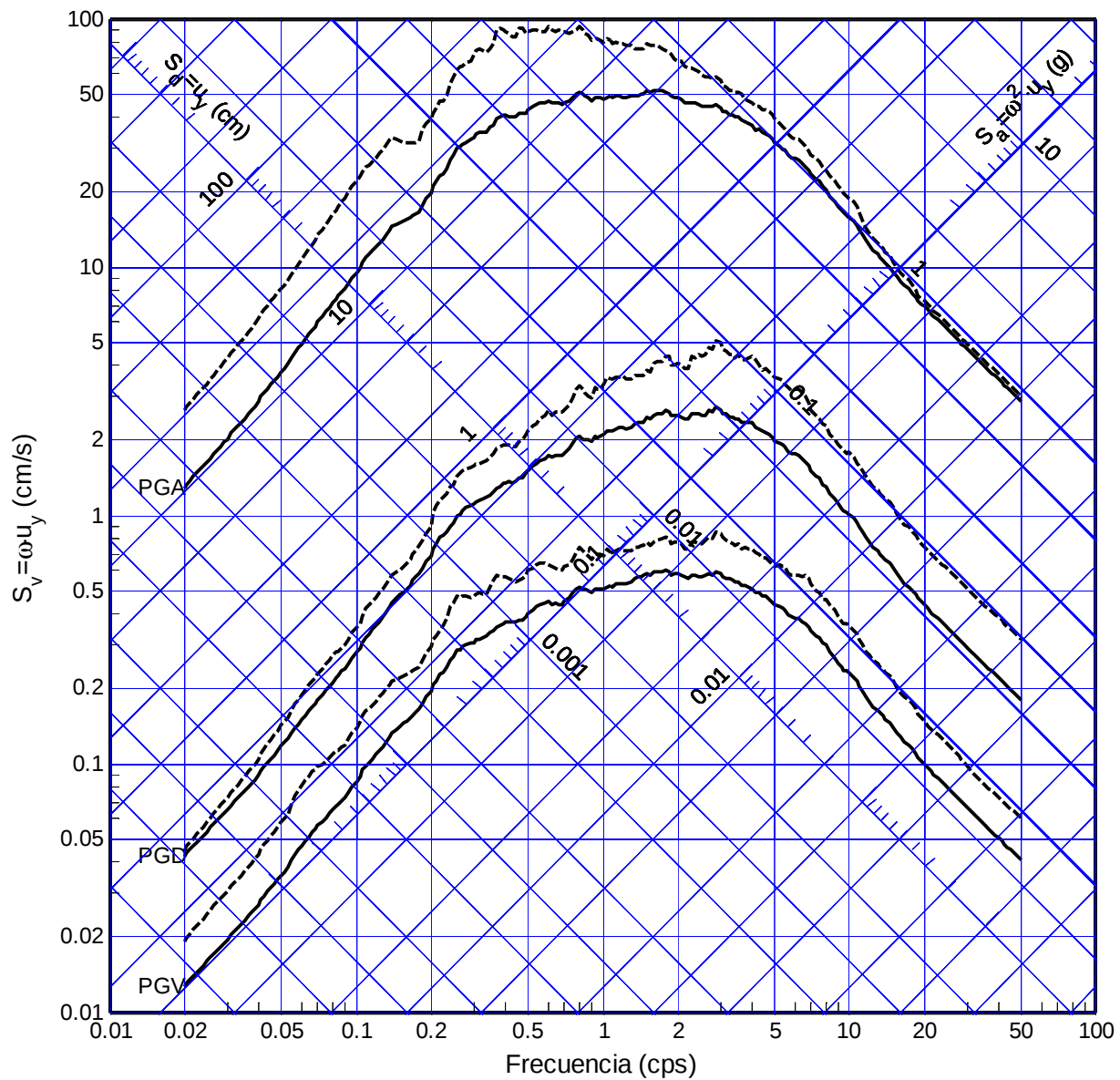


Figura 3.5 Espectros promedio y promedio + 1DE, normalizados a PGA, PGD y PGV respectivamente, modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$.

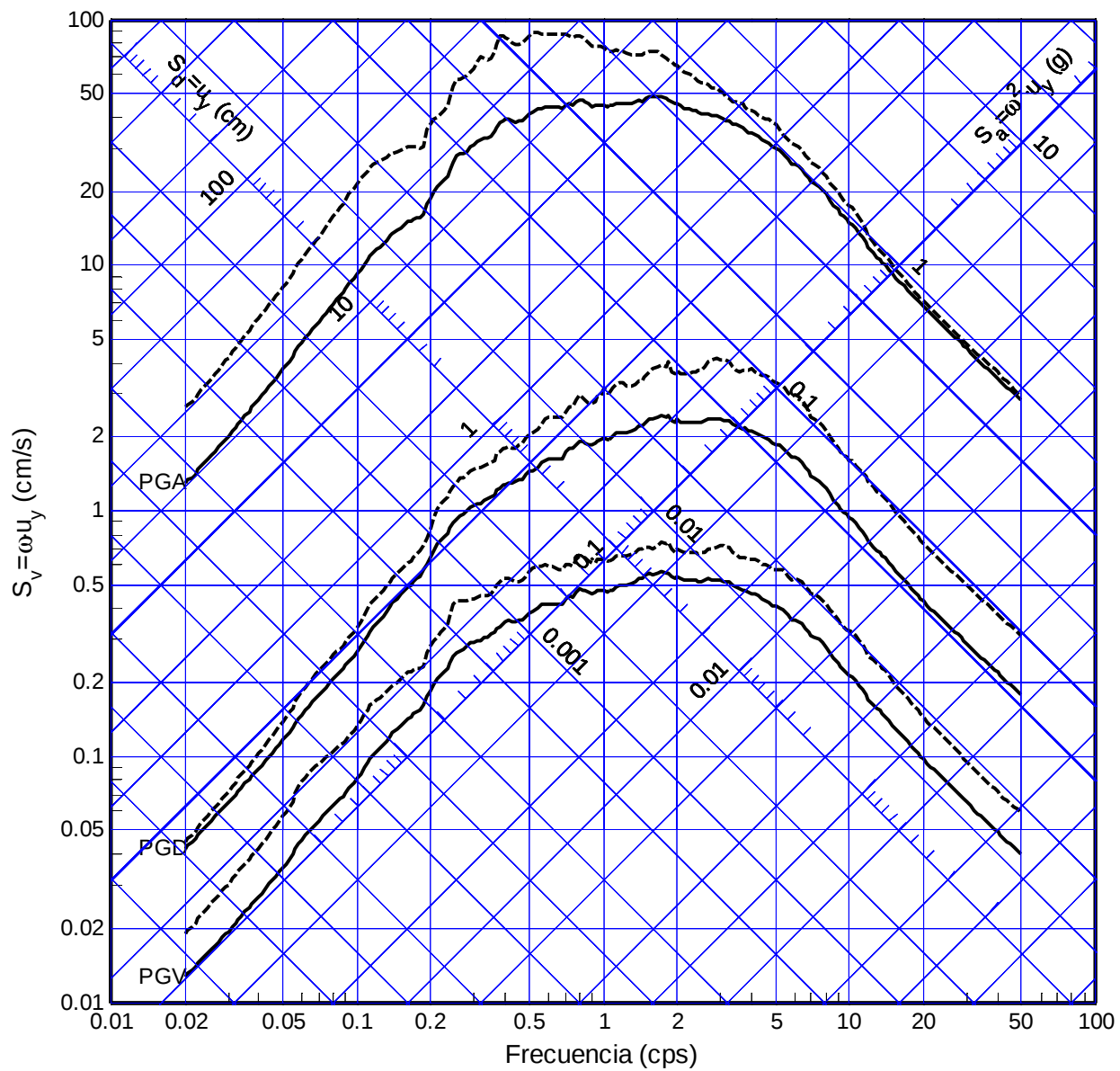


Figura 3.6 Espectros promedio y promedio + 1DE, normalizados a PGA, PGD y PGV respectivamente, modelo bilineal, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$.

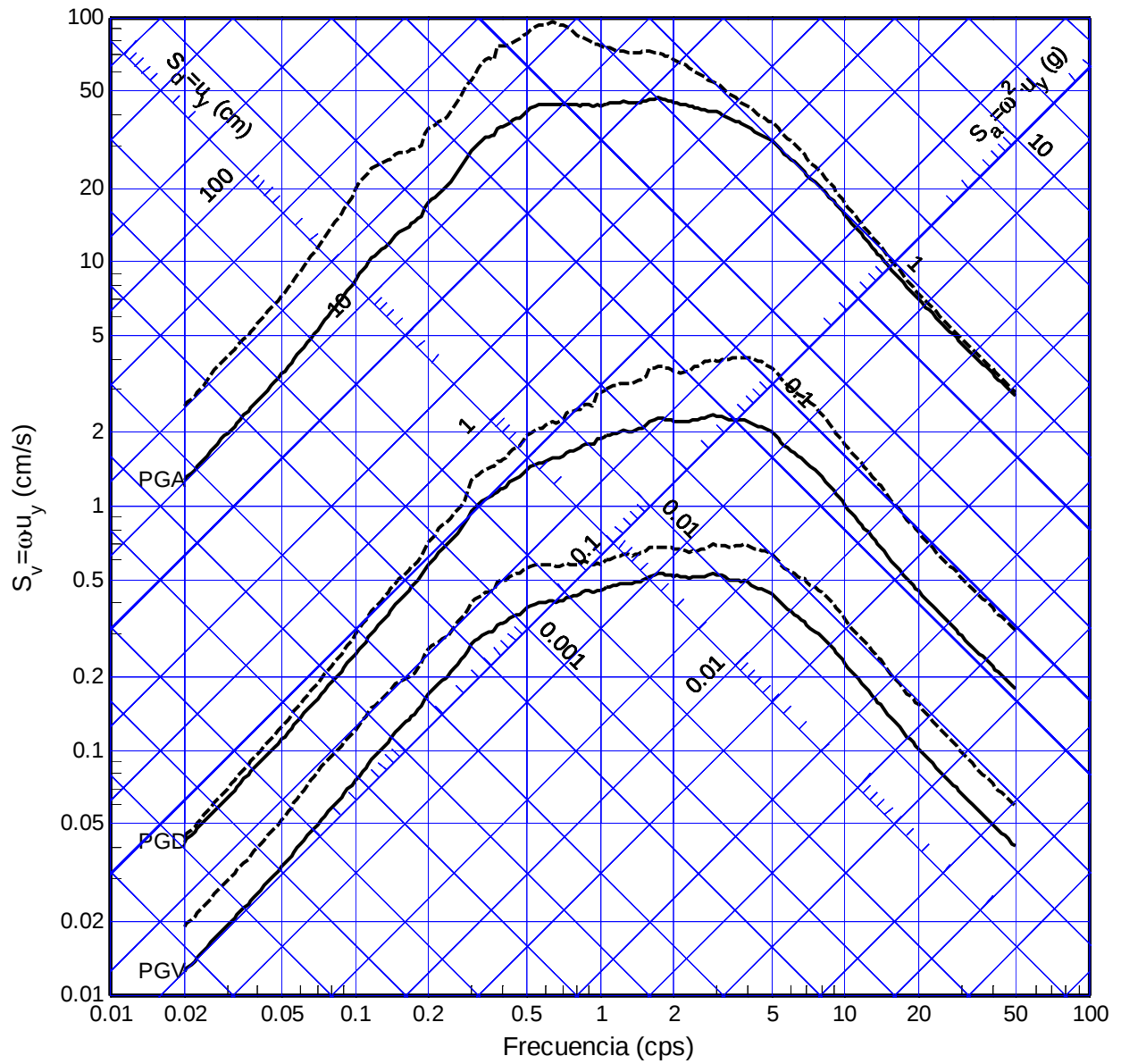


Figura 3.7 Espectros promedio y promedio + 1DE, normalizados a PGA, PGD y PGV respectivamente, modelo con degradación de rigidez, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$.

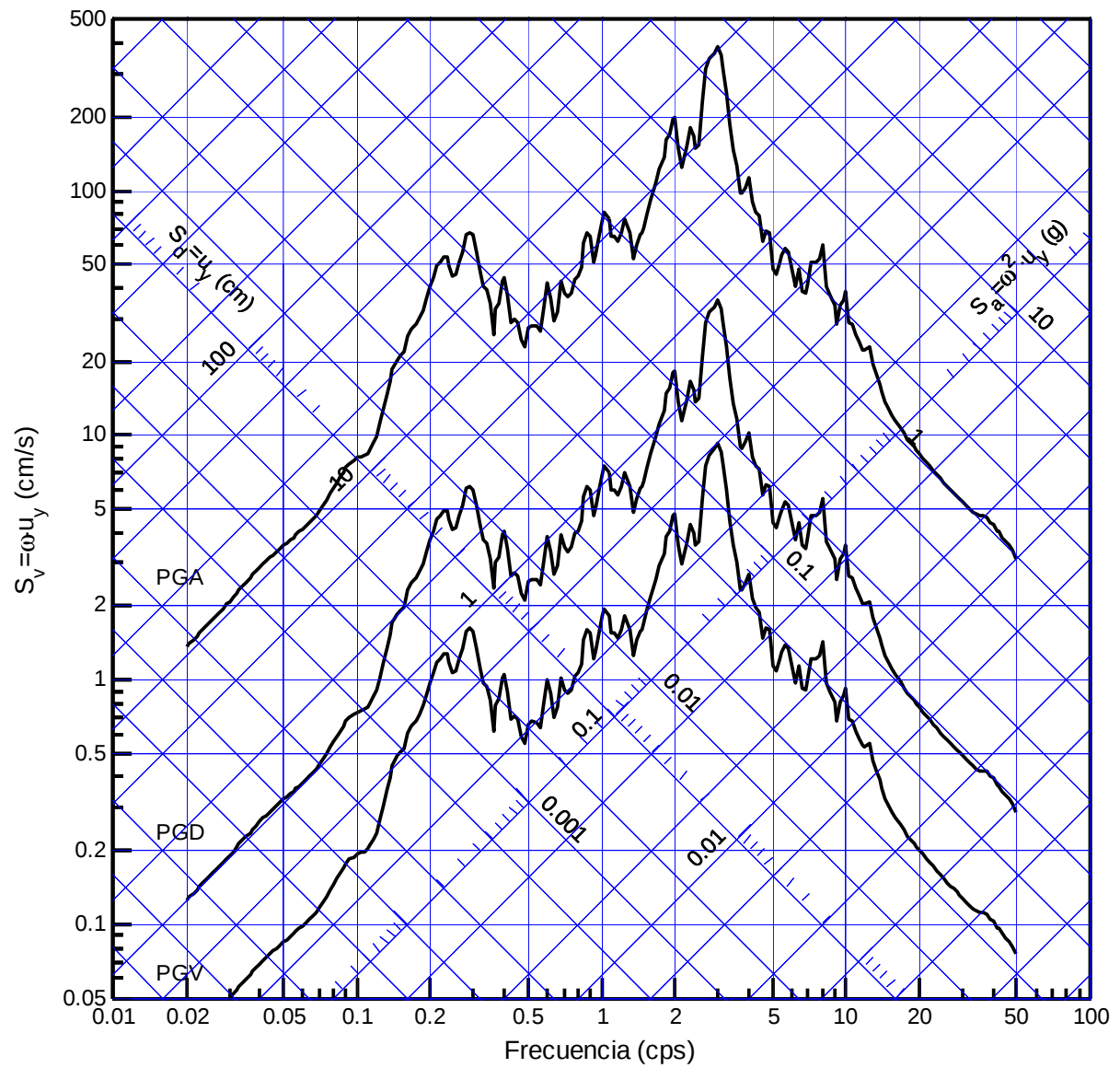


Figura 3.8 Espectros normalizados, registro Kushiro Kisyō-Dai (23/04/1962), modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=2\%$.

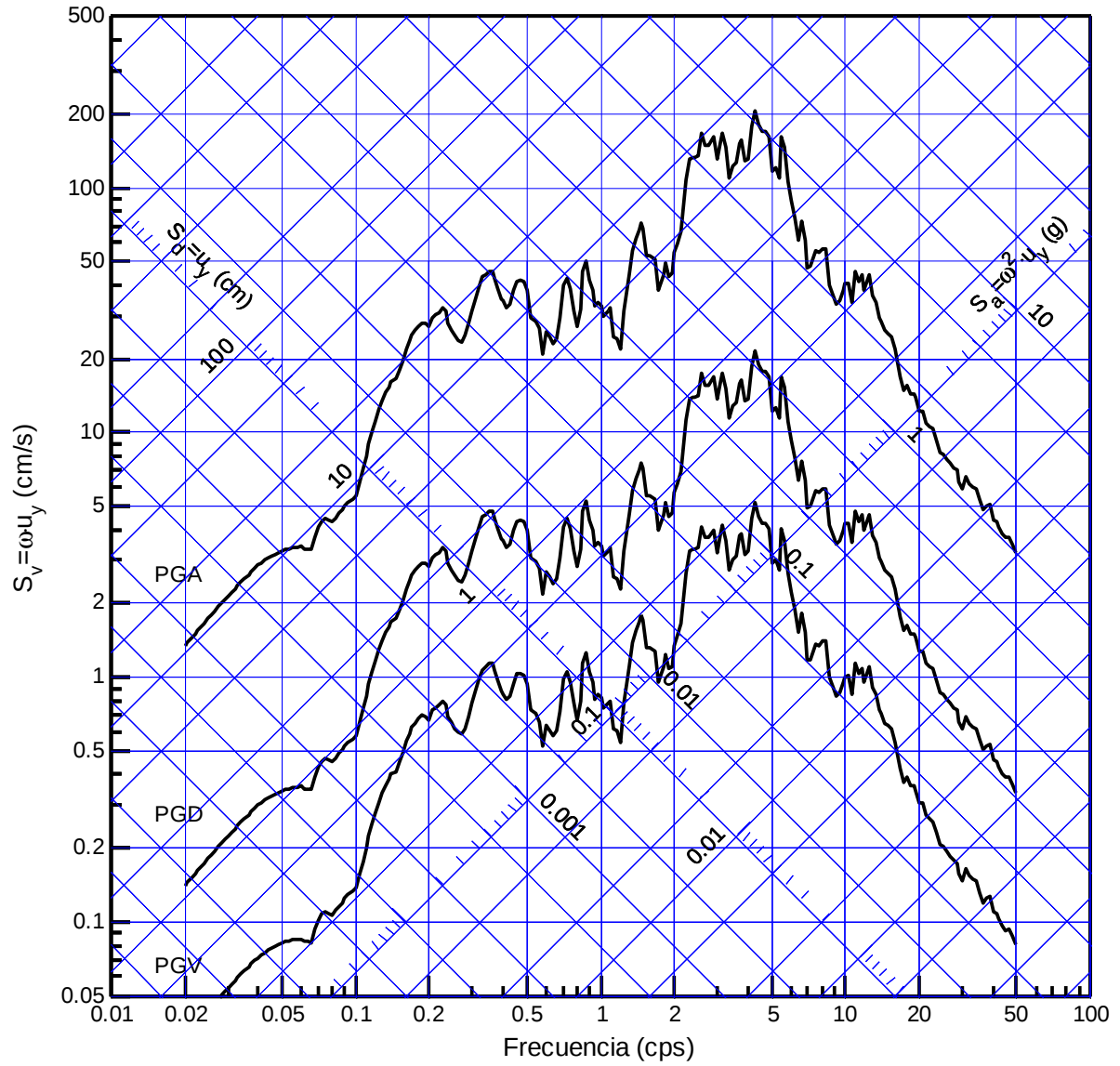


Figura 3.9 Espectros normalizados, registro La Ligua (07/11/1981), modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=2\%$.

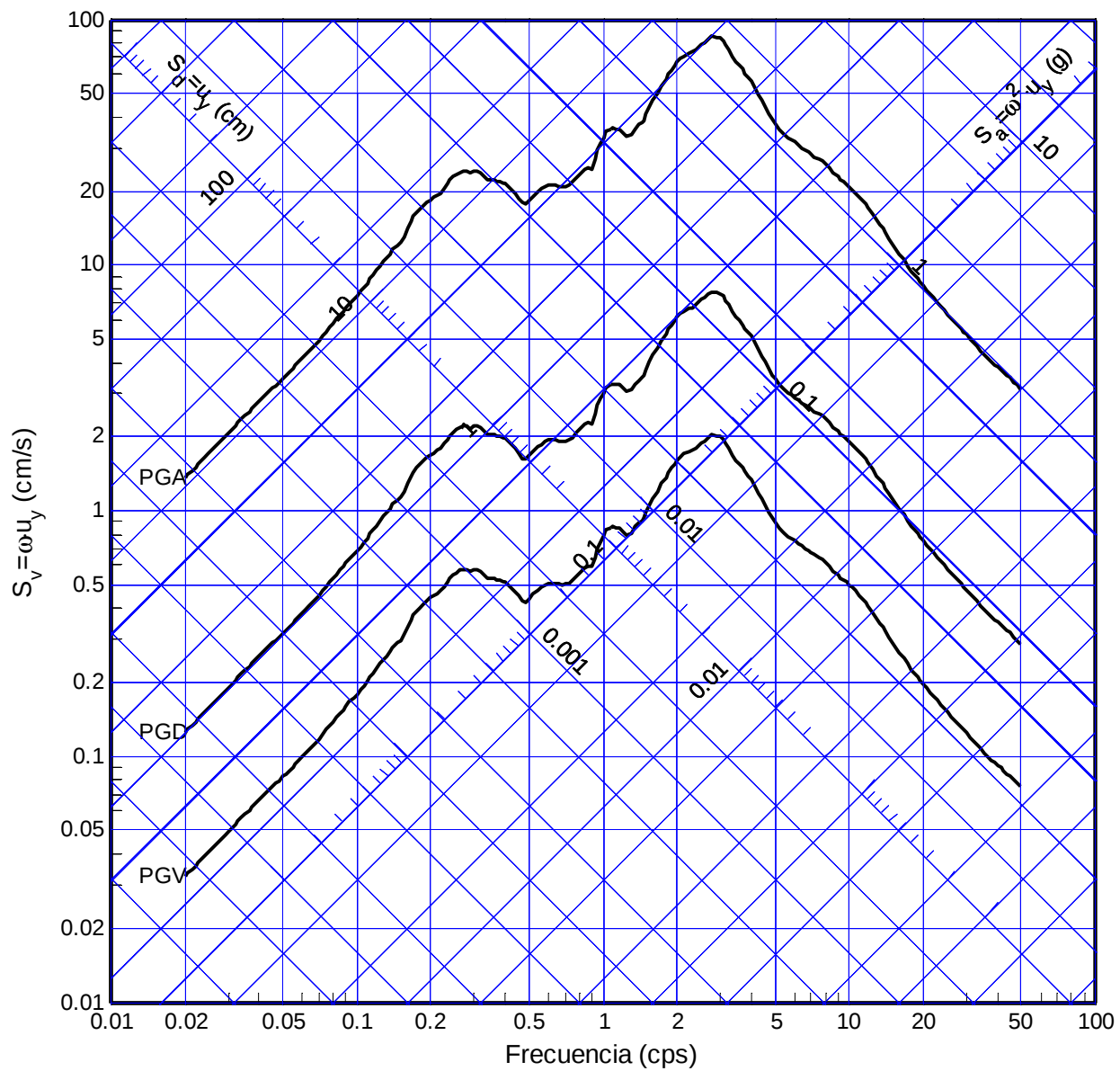


Figura 3.10 Espectros normalizados, registro Kushiro Kisyō-Dai (23/04/1962), modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=20\%$.

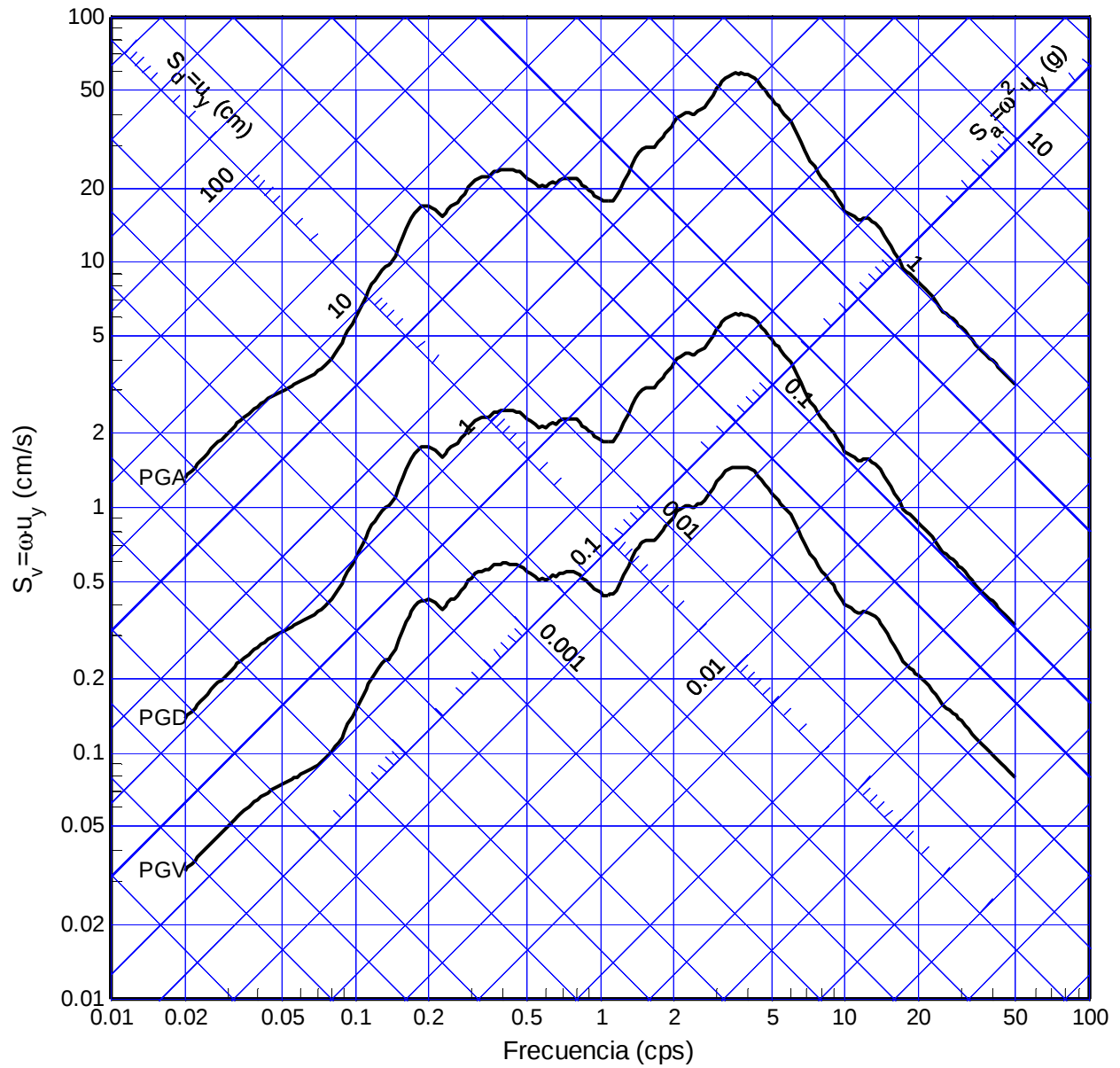


Figura 3.11 Espectros normalizados, registro La Ligua (07/11/1981), modelo elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=20\%$.

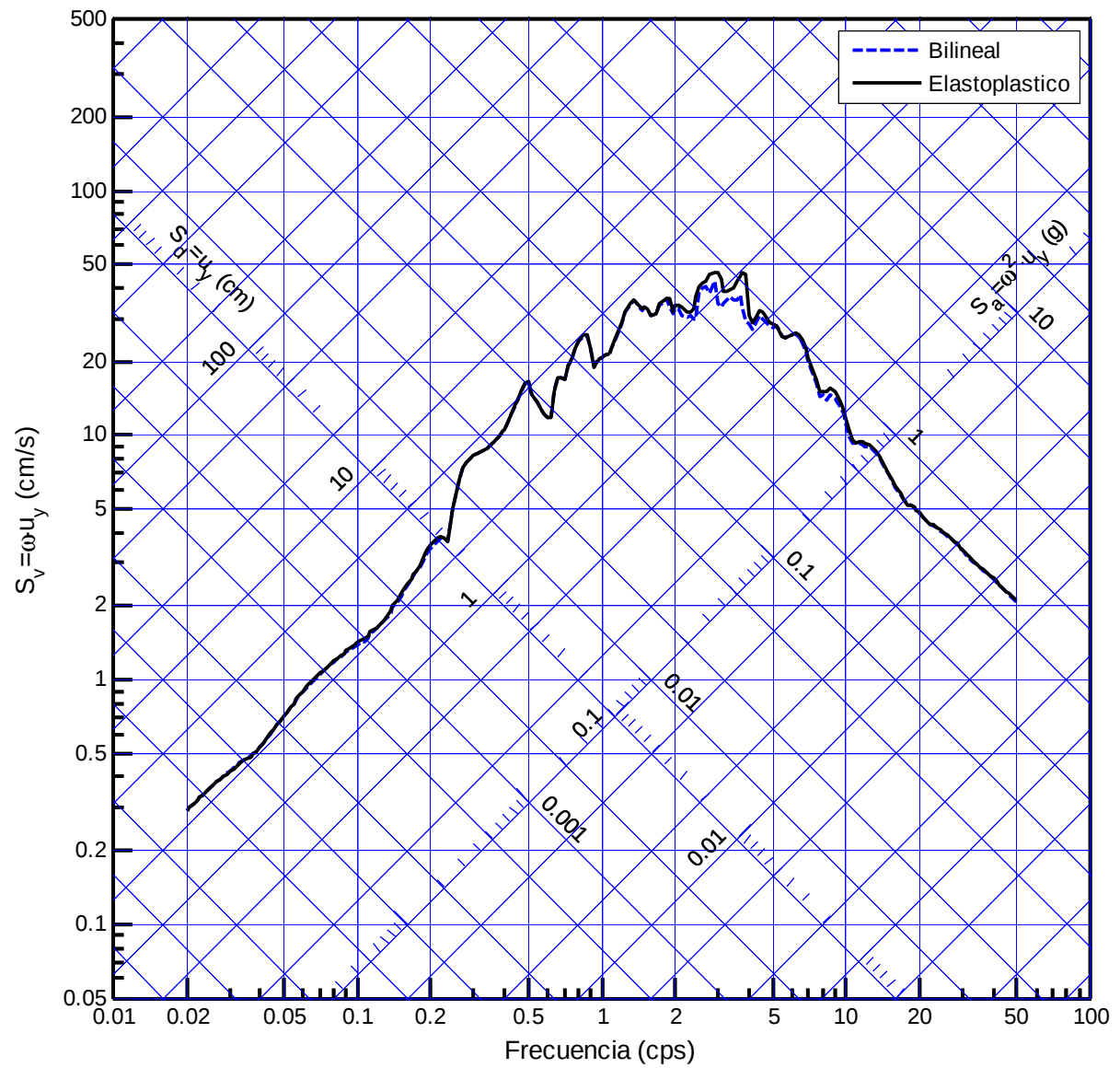


Figura 3.12 Espectros de respuesta, registro KSR Kushiro (15/01/1993), modelos elastoplástico y bilineal, ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=10\%$.

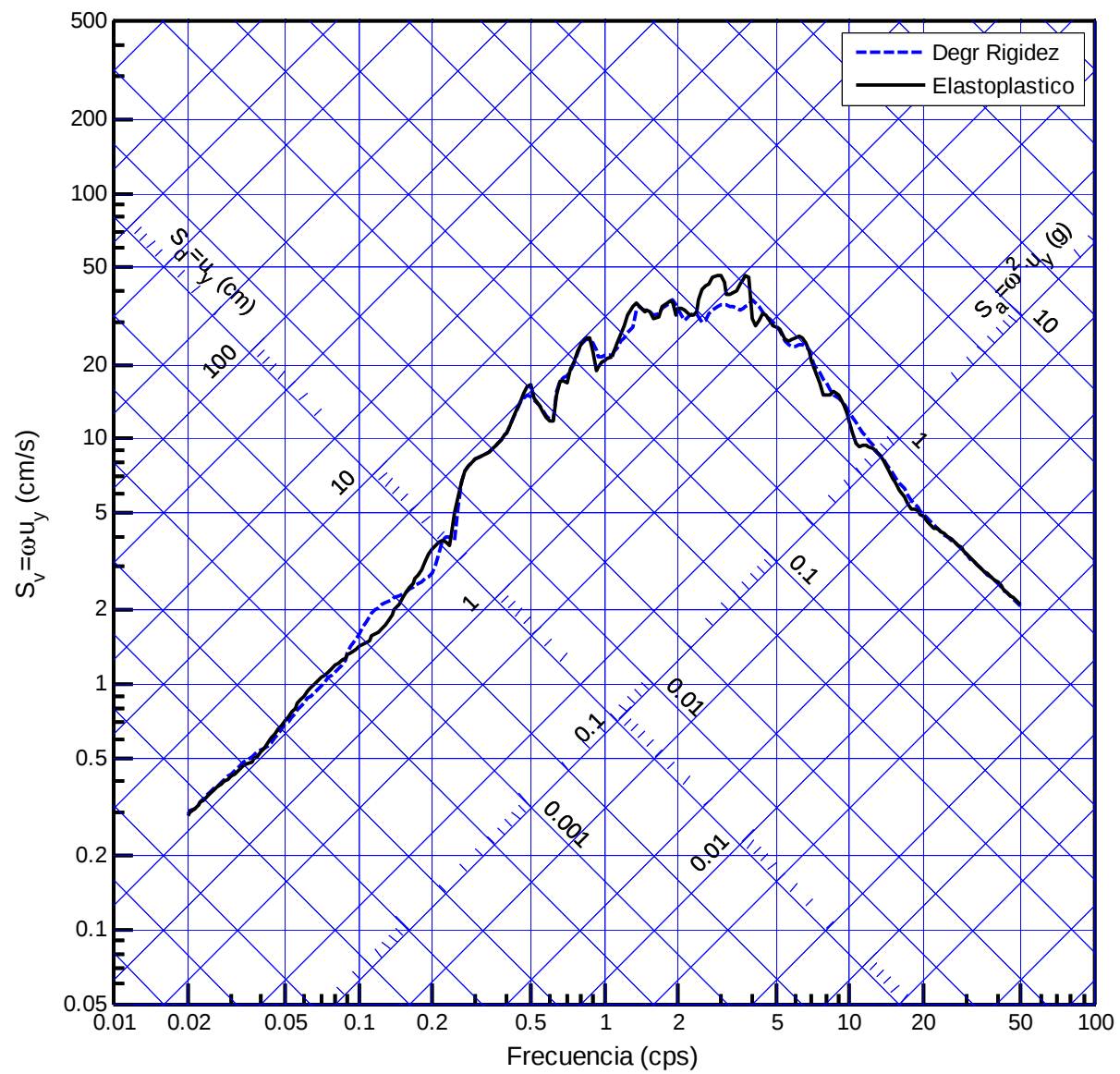


Figura 3.13 Espectros de respuesta, registro KSR Kushiro (15/01/1993), modelos elastoplástico y degradación de rigidez, ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=10\%$.

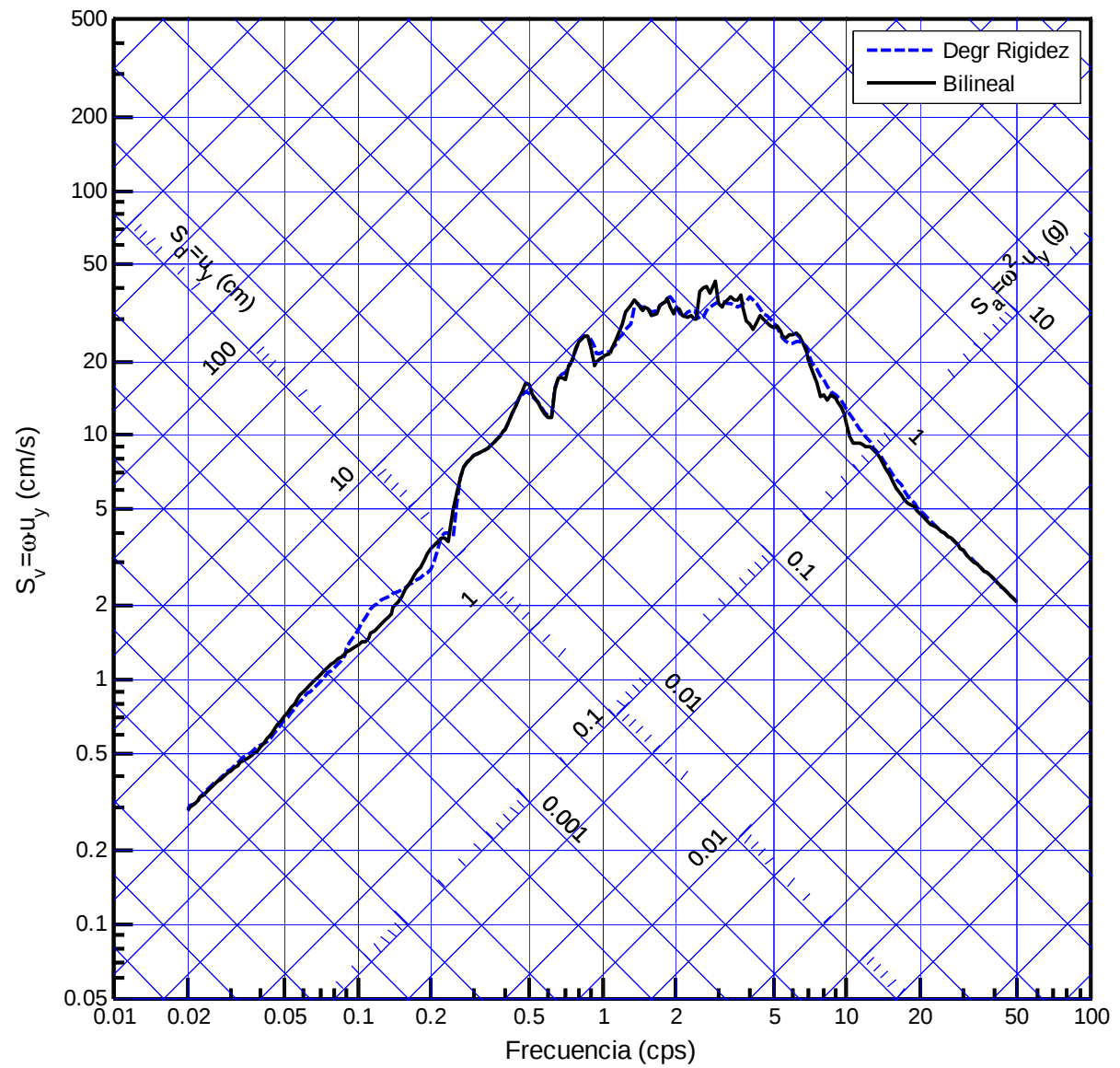


Figura 3.14 Espectros de respuesta, registro KSR Kushiro (15/01/1993), modelos bilineal y degradación de rigidez, ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=10\%$.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico es fundamental para la obtención de los resultados de este estudio. En primer lugar se describe el procedimiento estadístico y se presentan las ecuaciones utilizadas para obtener los valores promedio de los espectros normalizados. A continuación, sobre las regiones espectrales (determinadas por intervalos de frecuencias), se vuelve a hacer un análisis estadístico, y aplicando modelos de regresión se obtienen expresiones para calcular los factores de amplificación y de reducción que permiten construir espectros de diseño en función del amortiguamiento y la ductilidad. Por último en este capítulo se realiza un análisis y una comparación de los resultados para los diferentes modelos de fuerza-deformación considerados, los diferentes grados de amortiguamiento y con respecto a algunos de los factores presentados por otros autores.

4.1 Descripción del procedimiento para el análisis estadístico

El análisis estadístico tiene dos propósitos principales: 1) Determinar factores para poder construir el espectro de diseño, a partir de una estimación de los parámetros del movimiento máximo del suelo para futuros eventos sísmicos que pudiesen afectar un sitio en particular, y 2) poder realizar observaciones respecto del efecto del amortiguamiento combinado con los diferentes modelos de comportamiento inelástico, basándonos en los espectros de respuesta promedio.

Comenzando por el caso elástico (ductilidad $\mu=1$), el procedimiento estadístico consistirá en determinar factores ϕ_e que aplicados a la estimación del movimiento del suelo Y , nos puedan entregar las ordenadas espectrales S_e , para cada una de las tres regiones características del espectro

$$S_e = \phi_e Y \quad (4.1)$$

De manera similar podemos proceder con los espectros inelásticos. Podemos determinar factores ψ_μ que aplicados a Y , nos entreguen el espectro inelástico S_μ

$$S_\mu = \psi_\mu Y \quad (4.2)$$

Alternativamente es posible obtener el espectro inelástico S_μ mediante una reducción del espectro elástico S_e , de manera que tenemos

$$S_\mu = \phi_\mu S_e \quad (4.3)$$

Evidentemente los factores mencionados en las ecuaciones anteriores están relacionados de la siguiente manera

$$\psi_\mu = \phi_\mu \phi_e \quad (4.4)$$

en que el subíndice “e” denota las condiciones para el caso elástico, es decir, el caso particular cuando $\mu=1$, de manera que

$$(\psi_\mu)_{\mu=1} = \phi_e \quad (4.5a)$$

$$(S_\mu)_{\mu=1} = S_e \quad (4.5b)$$

$$(\phi_\mu)_{\mu=1} = 1 \quad (4.5c)$$

En la sección siguiente se determinarán estadísticamente los valores de ψ_μ . Y a continuación los factores ϕ_μ , que son los que se deben aplicar al espectro elástico y así obtener el espectro inelástico. El hecho de presentar los factores ϕ_μ es conveniente, ya que de esta manera podemos hacer una comparación con las ‘reglas clásicas’ de Newmark y Veletsos (1960) que aún siguen en uso. Estas se basan en las reglas de “igual-desplazamiento” e “igual-energía” usadas para

relacionar la respuesta elástica e inelástica, las que conducen a las razones de $1/\mu$ para las regiones espectrales de desplazamiento y velocidad, y $1/\sqrt{2\mu-1}$ para la región de aceleración. En un estudio mas reciente (Riddell et al. 2002) se presentan expresiones diferentes que se ajustan mejor a los datos presentados que las ‘reglas clásicas’, y muestran que las ‘reglas clásicas’ resultan ser no conservadoras, ya que subestiman los desplazamientos inelásticos en la región de velocidad y en la región de aceleración para sistemas con ductilidades mayores a 2 o 3, aspecto que se comentará también conforme a los resultados de este estudio.

A pesar de que el objetivo final es determinar estadísticas para la respuesta asociada a las bandas de frecuencia (zonas espectrales) también son importantes las estadísticas para las frecuencias individuales ya que sirven como base para luego llevar a cabo el procedimiento que define las regiones espectrales para las cuales estamos determinando las estadísticas finales. Y además de esto nos sirven para realizar comparaciones de los espectros promedios para varias de las condiciones consideradas en este estudio.

Para cada frecuencia f , calculamos el promedio de la muestra, la varianza, desviación estándar y el coeficiente de variación, según las expresiones a continuación

$$\bar{\psi}_Q(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \psi_{Qi}(f) \quad (4.6)$$

$$Var[\psi_Q(f)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\psi_{Qi}(f) - \bar{\psi}_Q(f) \right)^2 = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \psi_{Qi}^2(f) - n \bar{\psi}_Q^2(f) \right) \quad (4.7)$$

$$\sigma[\psi_Q(f)] = \sqrt{Var[\psi_Q(f)]} \quad (4.8)$$

$$\Omega[\psi_Q(f)] = \frac{\sigma[\psi_Q(f)]}{\bar{\psi}_Q(f)} \quad (4.9)$$

en que n es el número de registros, y el subíndice Q puede ser A , V o D , dependiendo de la normalización de los datos que se use. También vale la pena mencionar que la varianza corresponde a la llamada varianza poblacional, si deseamos obtener la varianza muestral, basta con dividir por $(n-1)$, sin embargo para el propósito de nuestro estudio esta diferencia es irrelevante.

En las Figuras 4.1 a 4.6 se muestran los espectros promedio y el promedio mas una desviación estándar para las tres normalizaciones (PGA, PGV y PGD), considerando sistema elastoplástico, y amortiguamiento $\xi=5\%$.

Como se ha mostrado en estudios anteriores (Riddell, 1979) es posible notar que en los espectros promedio existen bandas de frecuencias en que el espectro es aproximadamente paralelo a la línea horizontal y a las líneas inclinadas en 45° en el gráfico logarítmico. Para algunos casos ($\mu=1$) es posible mediante simple inspección visual determinar estas zonas de amplificación de la respuesta, pero esto no siempre es simple, sobre todo para los espectros inelásticos, en que es más difícil visualizar dichas zonas, en especial para las ductilidades mayores, aparte de ser subjetivo.

A continuación se describe un procedimiento objetivo para determinar los intervalos en cada una de las tres regiones espectrales, este procedimiento consiste en ajustar líneas trapezoidales al espectro promedio, mediante un proceso iterativo convergente.

4.2 Determinación de regiones espectrales y estadísticas en cada intervalo de frecuencias

Consideremos un espectro promedio, como el mostrado en la Figura 4.1. Deseamos ajustar una línea trapezoidal entre el límite de bajas frecuencias fijado en 0,15 cps y el límite de altas frecuencias fijado en 10 cps. La selección de estos límites es en base a simple inspección de los espectros elásticos e inelásticos ya

que comprenden la porción más importante del espectro, con respecto a la amplificación de la respuesta, y además porque así podemos comparar algunos de los resultados con los obtenidos en estudios previos (Riddell, et al. 2002), en que se fijaron estos mismos límites y se usó el mismo set de registros.

Además de la región de amplificación de la respuesta entre 0,15 cps y 10 cps, tenemos dos regiones de transición que corresponden a las zonas sobre los 10 cps y bajo los 0,15 cps.

La línea trapezoidal queda totalmente determinada si conocemos las tres ordenadas espectrales y las frecuencias esquina f_{dv} y f_{va} (ver Figura 4.7), estas frecuencias son los límites entre las regiones de desplazamiento y velocidad, y las regiones de velocidad y aceleración respectivamente.

El proceso de aproximación trapezoidal se realiza de manera iterativa, como se describe a continuación. En primer lugar se asumen valores para f_{dv} y f_{va} , y se procede a calcular los promedios en cada banda de frecuencias para las tres zonas espectrales, según las siguientes expresiones

$$\overline{\psi}_{Qd}^{(j)} = \frac{\int_{0.15}^{f_{dv}^{(j)}} \overline{\psi}_{Qd}(f) df}{f_{dv}^{(j)} - 0.15} \quad (4.10a)$$

$$\overline{\psi}_{Qv}^{(j)} = \frac{\int_{f_{dv}^{(j)}}^{f_{va}^{(j)}} \overline{\psi}_{Qv}(f) df}{f_{va}^{(j)} - f_{dv}^{(j)}} \quad (4.10b)$$

$$\overline{\psi}_{Qa}^{(j)} = \frac{\int_{f_{va}^{(j)}}^{10} \overline{\psi}_{Qa}(f) df}{10 - f_{va}^{(j)}} \quad (4.10c)$$

en que el superíndice j indica la j -ésima iteración y tal como se mencionó antes, el subíndice Q puede ser A , V o D , dependiendo de la normalización considerada.

Una vez calculados los promedios en la j-ésima iteración procedemos a calcular las nuevas frecuencias esquinas de la siguiente forma

$$f_{dv}^{(j+1)} = \frac{1}{2\pi} \frac{\overline{\psi}_{Qv}^{(j)}}{\overline{\psi}_{Qd}^{(j)}} \quad (4.11a)$$

$$f_{va}^{(j+1)} = \frac{1}{2\pi} \frac{\overline{\psi}_{Qa}^{(j)}}{\overline{\psi}_{Qv}^{(j)}} \quad (4.11b)$$

Finalmente se calculan los promedios para las nuevas regiones, hasta que los valores de las frecuencias esquina de la iteración j-ésima mas uno, coinciden con la iteración anterior, es decir, hasta que

$$f_{dv}^{(j+1)} = f_{dv}^{(j)} \quad (4.12a)$$

$$f_{va}^{(j+1)} = f_{va}^{(j)} \quad (4.12b)$$

El resultado de las líneas del ajuste trapezoidal y las frecuencias esquina correspondientes al caso elastoplástico con 10% de amortiguamiento, se muestra en las Figuras 4.8 a 4.13 (el set completo de figuras con el ajuste trapezoidal de todos los casos se presenta en el Anexo 2). Es claramente notorio que las frecuencias esquina varían dependiendo de la normalización considerada.

Dado que estamos trabajando con los espectros normalizados, las líneas del ajuste trapezoidal para cada caso, corresponden no sólo al promedio respectivo en cada una de las zonas del espectro, sino que también al valor del factor de amplificación de la respuesta ψ_μ para poder construir el espectro inelástico, a partir de los valores máximos del movimiento del suelo (Ecuación 4.2).

Para poder realizar una comparación significativa, se dividen los promedios ψ_μ , por el promedio para $\mu=1$, para las distintas ductilidades y amortiguamientos en cada una de las regiones espectrales

$$\phi_\mu = \frac{\psi_\mu}{\psi_{\mu=1}} \quad (4.13)$$

Los coeficientes ϕ_μ obtenidos, junto con los promedios ψ_μ y los valores de las frecuencias esquina para el caso elastoplástico se presentan en las Tablas 4.1 a 4.7. La importancia de obtener estos coeficientes (al dividir los promedios de los espectros inelásticos por el promedio del espectro elástico) es que estos valores reflejan atributos esenciales del espectro original y así no importan los coeficientes utilizados para escalar los datos.

Además es importante notar que estos coeficientes corresponden a los factores de reducción indicados en la Ecuación 4.3. Como se estableció anteriormente permiten derivar el espectro inelástico mediante una reducción del espectro elástico correspondiente, mediante los factores de reducción ϕ_μ asociados con los valores de la respuesta promedio.

4.3 Presentación de resultados, ajuste de los datos y funciones de interpolación

Los valores de los factores de amplificación ψ_μ (que nos permiten obtener el espectro inelástico directamente a partir del movimiento máximo del suelo, Ecuación 4.2) obtenidos para las distintas ductilidades, valores de amortiguamiento y modelos de comportamiento estructural se muestran en gráficos logarítmicos (Figuras 4.14 a 4.22). Para poder usar de una forma más práctica estos factores se han ajustado curvas que permiten facilitar los cálculos de dichos factores para valores de ductilidad y amortiguamiento diferentes a los

usados en este estudio. Con respecto a las funciones seleccionadas para explicar de mejor forma el comportamiento de estos valores, un estudio previo (Hanson y Soong, 2001) presentó funciones del tipo logarítmico considerando el amortiguamiento ξ y la ductilidad del sistema μ , pero las funciones presentadas en este estudio, solamente fueron calculadas para una frecuencia en particular (en vez de regiones espectrales) y considerando valores de amortiguamiento de: 10%, 20%, 30% y 50%.

En este estudio se usaron expresiones similares para ajustar cada una de las curvas, estas corresponden a funciones del tipo

$$\psi_{\mu}(\xi, \mu) = [a_1 \log(a_2 \xi + a_3) + \log(\mu)]^{a_4} \quad (4.14)$$

para la región de desplazamiento, y del tipo

$$\psi_{\mu}(\xi, \mu) = [a_1 \log(a_2 \xi + a_3) + \log((\mu - 1)a_4 + \mu)]^{a_5} \quad (4.15)$$

para las regiones de velocidad y aceleración.

Los parámetros a_i , son los que se deben determinar en cada caso, para definir la curva que mejor se ajusta a los valores calculados. Los valores de los coeficientes a_i y los valores de R^2 correspondientes al sistema elastoplástico, para las diferentes regiones espectrales, se muestran en la Tabla 4.8. El coeficiente de correlación R^2 se define como

$$R^2 = \frac{SCT - SErr}{SCT} \quad (4.16)$$

en que SCT es la suma de cuadrados totales para los valores que se desea aproximar y corresponde a la suma de las diferencias de los valores estadísticos con respecto al promedio, elevadas al cuadrado, y SErr es la suma de cuadrados

del error, es decir, la suma de las diferencias de los valores estadísticos con respecto a la función de aproximación, elevadas al cuadrado.

$$SCT = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4.17a)$$

$$SCErr = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.17b)$$

Los valores de y_i , representan los valores observados o valores obtenidos estadísticamente (en nuestro caso ψ_i ó ϕ_i), $\bar{y}$ corresponde al promedio de los valores observados ($\bar{\psi}$ ó $\bar{\phi}$), y los valores $\hat{y}_i$ corresponden a los valores obtenidos usando las funciones de aproximación.

Dado que la relación es de tipo logarítmica, este ajuste ha sido hecho usando el método de mínimos cuadrados, pero minimizando el error relativo de los valores obtenidos, es decir, para cada caso minimizamos la expresión siguiente

$$f = \sum \left[\frac{\psi(\mu, \xi) - \psi_i}{\psi_i} \right]^2 \quad (4.18)$$

en que ψ_i corresponde a cada uno de los puntos obtenidos del análisis estadístico, y la expresión $\psi(\mu, \xi)$ corresponde a la función que deseamos ajustar a la familia de puntos, y como está indicado, depende de la ductilidad y amortiguamiento del sistema. Esto entrega una correlación mejor que la obtenida al minimizar el error absoluto, así encontramos los parámetros que definen las diferentes curvas de aproximación.

Además cabe destacar que el uso de estos valores ψ_μ es, en cierta forma, más directa que usar los factores de reducción ϕ_μ , ya que para este último caso debemos construir previamente el espectro elástico de diseño, y luego reducirlo

mediante ϕ_μ , en cambio para el caso de los factores de amplificación ψ_μ , basta con conocer los valores máximos del suelo de diseño (A , V o D) para obtener el espectro inelástico deseado.

Para el caso de los factores de reducción ϕ_μ , el procedimiento es similar, usando el método de mínimos cuadrados, pero minimizando el error relativo entre los puntos obtenidos del análisis estadístico y la curva que los aproxima. En las Figuras 4.23 a 4.49 se muestran en gráficos logarítmicos, los valores obtenidos del análisis estadístico para los factores de reducción de la respuesta ϕ_μ , además de las curvas que mejor se ajustan a estos valores. En los gráficos presentados en las Figuras 4.23 a 4.49, también podemos observar que el ajuste de las ‘reglas clásicas’ de Veletsos y Newmark (1960) sigue siendo razonable, para el caso de amortiguamiento $\xi=5\%$, pero no es extensible a otros valores del amortiguamiento.

Las expresiones usadas para ajustar cada una de las curvas corresponden a funciones del tipo

$$\phi_\mu(\xi, \mu) = a_1 (\xi + a_2)^{a_3} \mu^{a_4} \quad (4.19)$$

para la región de desplazamiento, y del tipo

$$\phi_\mu(\xi, \mu) = [a_1 (\xi + a_2)^{a_3} (\mu - 1) + \mu]^{a_4 (\xi + a_2)^{a_5}} \quad (4.20)$$

para las regiones de velocidad y aceleración. Funciones de este tipo han sido propuestas en estudios anteriores (Riddell y Newmark, 1979 y Riddell et al. 2002), y corresponden a un perfeccionamiento de las reglas clásicas propuestas por Newmark y Veletsos. Las principales ventajas de estas reglas que han sido propuestas anteriormente son la simplicidad que poseen, ya que no dependen del amortiguamiento, por lo que son simples de utilizar y además presentan una buena correlación con los índices de intensidad del movimiento (A , V y D) para las tres regiones espectrales. De todas maneras dentro de estas dos la reglas de Riddell et

al. presentan un ajuste mucho mejor, siendo en general conservadoras. Por otra parte la principal desventaja de ambos estudios es que se limitan a un valor del amortiguamiento del 5% solamente, no siendo aplicables en sistemas estructurales que presentan un grado de amortiguamiento mayor.

Nuevamente los parámetros a_i , son los que se deben determinar en cada caso, para definir la curva que mejor se ajusta a los puntos. Los valores de los coeficientes a_i y los valores de R^2 correspondientes al sistema elastoplástico, para las diferentes regiones espectrales, se muestran en la Tabla 4.9.

En ambos casos, tanto para los factores de amplificación ψ_{μ} , como para los factores de reducción ϕ_{μ} , se incluye el amortiguamiento ξ como variable, que además va acompañado de un parámetro a_i , para así evitar la indeterminación de la función para amortiguamiento igual a 0%, o bien, para evitar que obtengamos siempre un factor igual a la unidad. El resumen estadístico para los casos bilineal y con degradación de rigidez se muestra en las Tablas 4.10 a 4.27.

Una consideración importante es que para cada una de las relaciones fuerza-deformación consideradas se ha hecho una subdivisión para el rango de amortiguamiento, tanto para los factores de reducción ϕ_{μ} , como para los factores de amplificación ψ_{μ} , ya que así se logra obtener funciones que se ajustan mucho mejor a los datos, pasando de valores de R^2 de 0,908 para el caso en que se consideran los valores de 0% a 100% de amortiguamiento para el ajuste, a valores de R^2 de 0,997 si consideramos tres ajustes, uno para 0% de amortiguamiento, otro para el rango de 2% a 20% y otro para 50% a 100% (los valores de R^2 antes señalados corresponden particularmente al ajuste de los factores de amplificación de la respuesta para la región de aceleración, caso elastoplástico). Es importante mencionar, que en general los valores de R^2 , son bastante altos (Tablas 4.8 y 4.9), aunque el ajuste sea considerando solo una función para todos los datos (de 0% a 100% de amortiguamiento), esto se debe a que el tipo de funciones usadas para el

ajuste representan de manera muy buena el comportamiento de los datos, pero al revisar la dispersión de los puntos que determinan los gráficos, podemos notar que es mejor realizar la consideración de tres intervalos para el ajuste, siendo los tres intervalos seleccionados; 0%, 2% a 20% y 50% a 100%; los que entregan mejores valores de R^2 .

Otra justificación de porque tomar estos tres intervalos para el ajuste de las curvas, es que por un lado, el cero es un caso ideal ya que sería imposible obtener una estructura con 0% de amortiguamiento en la realidad, lo que hace que el análisis de una estructura con esta característica sea solo posible a nivel teórico. Y por otra parte para los factores de reducción ϕ_μ se aprecia un comportamiento particular a medida que el amortiguamiento sobrepasa los valores de 20%, ya que para un mismo valor de la ductilidad (valores de ductilidad mayores a 3) los factores comienzan a decaer, lo que hace que el ajuste pierda exactitud si usamos solo una función para todo el rango de amortiguamientos.

Dado que se tienen estos tres intervalos para el cálculo de los factores de amplificación ψ_μ (y reducción ϕ_μ), para las zonas que no están consideradas en estos intervalos, es decir entre 0% y 2% de amortiguamiento y entre 20% y 50% de amortiguamiento, se aconseja usar una interpolación con los datos entregados por las expresiones presentadas.

4.4 Análisis y comparación de resultados

En esta sección presentaremos comparaciones entre las reglas obtenidas, los resultados estadísticos y resultados de estudios anteriores. Además es importante revisar si efectivamente es posible considerar el comportamiento elastoplástico de manera más general, en el caso de que las diferencias que se observan al considerar los otros dos modelos de comportamiento sean poco relevantes.

En primer lugar la diferencia al considerar el efecto del amortiguamiento es evidente, ya que a medida que el amortiguamiento crece sobre un 5% o disminuye bajo este mismo valor, los valores de los factores de amplificación de la respuesta ψ_{μ} son muy diferentes. Si tomamos como referencia los valores de los factores de amplificación para amortiguamiento igual a 5%, por ejemplo, para el caso elastoplástico, cuando tenemos un 20% de amortiguamiento los factores tienen una diferencia de más del 25% para las 3 regiones espectrales en consideración y para todas las ductilidades, siendo las mayores diferencias para la zona de velocidad, del orden de un 44% para ductilidad igual a 1. Esta diferencia crece considerablemente, llegando a valores mayores a un 79% cuando tenemos un amortiguamiento de 100% (zona de velocidad, ductilidad igual a 1). Como ya dijimos si el amortiguamiento ahora es muy bajo, tomando un extremo de 0% de amortiguamiento, la misma situación ocurre, llegando a diferencias de más de un 190%, en el caso del factor de amplificación para la zona de aceleración y ductilidad igual a 1.

Si hacemos la misma comparación para los factores de reducción, en el caso elastoplástico, las diferencias son menores, pero pueden ser significativas para algunos casos, por ejemplo si comparamos los valores para 50% de amortiguamiento en la zona de velocidad obtenemos diferencias superiores a un 25% para ductilidades de 3 y 5. Ahora si comparamos los valores para 0% de amortiguamiento, nuevamente la diferencia es más exagerada superando el 50% para las ductilidades mayores a 1.5, en la zona de aceleración.

Si consideramos los modelos Bilineal y con Degradación de Rigidez, se mantienen las diferencias expuestas anteriormente, cuando tenemos un 20% de amortiguamiento los factores tienen una diferencia de más del 21,5% para las 3 regiones espectrales en consideración y para todas las ductilidades, siendo las mayores diferencias para la zona de velocidad, llegando a un 42% para ductilidad igual a 1. Cuando tenemos amortiguamiento de 100% las diferencias también

llegan a un 79%, y si consideramos amortiguamiento de 0% nuevamente llegamos a diferencias de más de un 190%.

Para el caso de los factores de reducción (casos Bilineal y con Degradación de Rigidez) para 50% de amortiguamiento en la zona de velocidad obtenemos diferencias superiores a un 25%, llegando a diferencias mayores a un 30% para ductilidades de 3 y 5 en el caso Bilineal. Ahora si comparamos los valores para 0% de amortiguamiento, también la diferencia es más exagerada superando nuevamente el 50% para las ductilidades mayores a 1,5 en la zona de aceleración. En las Tablas 4.28 a 4.30, podemos ver las diferencias en porcentaje de los factores de amplificación y reducción con respecto a los valores obtenidos para 5% de amortiguamiento.

Obviamente esta tendencia se mantiene si consideramos valores de amortiguamiento diferentes a los del análisis estadístico, ocupando las expresiones propuestas en la Sección 4.3, por ejemplo si consideramos un 15% de amortiguamiento, ductilidad igual a 5, zona de aceleración y comportamiento elastoplástico obtenemos un factor de amplificación igual a: $\psi_5 = 0,6782$; mientras que para las mismas condiciones, pero con un 5% de amortiguamiento obtenemos un factor de amplificación $\psi_5 = 0,8187$; la diferencia es de un 17,1%. Ahora si consideramos un 60% de amortiguamiento y nuevamente las mismas condiciones anteriores el factor de amplificación es $\psi_5 = 0,4004$ y la diferencia con respecto al factor de amplificación para un 5% de amortiguamiento es superior a un 50%. En síntesis, los factores reflejan que la estructura se ve mucho menos exigida a medida que aumentamos el porcentaje de amortiguamiento, porque los valores de los factores de amplificación son menores, esto es evidente, a mayor amortiguamiento menos esfuerzo es inducido a la estructura.

Por otra parte, si comparamos los valores de los factores de amplificación y reducción obtenidos para las 3 relaciones constitutivas de fuerza-deformación, es

importante verificar si realmente se puede seguir tomando el caso elastoplástico de manera más general. En las Tablas 4.31 y 4.32 se pueden observar las diferencias en porcentaje de los factores de amplificación y reducción para los casos bilineal y con degradación de rigidez con respecto a los valores obtenidos para caso elastoplástico. La mayoría de las diferencias son positivas lo que indica que es conservador usar los factores obtenidos para el caso elastoplástico (amplificación y reducción). De las diferencias que arrojan valores negativos (que serian no conservadores), la mayoría son del orden de un 1% a un 5% (apenas 6 ó 7 valores en cada caso son mayores a un 2%), lo que significa que no es una diferencia importante, es decir, los valores de los factores son prácticamente iguales a los obtenidos para el caso elastoplástico. Las diferencias mayores alcanzan un 6,7% para los factores de amplificación y reducción (caso Bilineal, para la zona de desplazamiento, considerando un 100% de amortiguamiento y ductilidad igual a 10), para el caso elastoplástico se obtuvieron los factores: $\psi_{10} = 0,0501$ y $\phi_{10} = 0,0802$; y para el caso bilineal los factores: $\psi_{10} = 0,0534$ y $\phi_{10} = 0,0856$. Como ya se mencionó, en general es conservador considerar los factores obtenidos para el caso elastoplástico, pero es necesario analizar que tan conservador se puede ser. Para algunos valores, si bien en porcentaje la diferencia es importante (del orden de un 20%), si consideramos los valores de manera absoluta la diferencia es poco significativa, simplemente como son valores más pequeños la diferencia en porcentaje es mayor, por ejemplo, si comparamos los factores en el caso con degradación de rigidez, para la zona de desplazamiento, considerando un 2% de amortiguamiento y ductilidad igual a 10, que es donde tenemos la mayor diferencia en porcentaje (27,5%), los factores obtenidos son: $\psi_{10} = 0,1224$ y $\phi_{10} = 0,0585$; mientras que para el caso elastoplástico se obtuvieron los factores: $\psi_{10} = 0,1689$ y $\phi_{10} = 0,0808$.

Ahora bien, si consideramos los factores que se obtienen con las expresiones propuestas en la sección anterior, también podemos observar que se

mantiene esta tendencia, si tomamos uno de los casos donde los valores al considerar un sistema elastoplástico no eran conservadores (caso Bilineal, para la zona de Desplazamiento, considerando un 100% de amortiguamiento y ductilidad igual a 10) obtenemos valores para los factores de amplificación y reducción de: $\psi_{10} = 0,0616$ y $\phi_{10} = 0,0838$; mientras que los obtenidos para el caso elastoplástico son: $\psi_{10} = 0,0591$ y $\phi_{10} = 0,0797$; la diferencias son de un 4,3% y un 5,1% respectivamente. Ahora si hacemos el mismo ejercicio, pero comparando los factores que se obtienen con las expresiones propuestas en la sección anterior, para el caso donde tenemos la mayor diferencia en porcentaje entre los valores estadísticos (degradación de rigidez, zona de desplazamiento, 2% de amortiguamiento y ductilidad igual a 10) obtenemos valores para los factores de amplificación y reducción de: $\psi_{10} = 0,1312$ y $\phi_{10} = 0,0581$; mientras que los obtenidos para el caso elastoplástico son: $\psi_{10} = 0,1678$ y $\phi_{10} = 0,0783$; la diferencias son de un 21,8% y un 25,8% respectivamente. Por lo tanto podemos decir que el efecto de la relación fuerza-deformación considerada no es significativo y se puede obtener la respuesta de manera conservadora usando un modelo elastoplástico.

Si comparamos los valores obtenidos del análisis estadístico para 5% de amortiguamiento y comportamiento Elastoplástico, con los valores obtenidos en estudios anteriores (Riddell et al. 2002) podemos observar que son prácticamente iguales (Tabla 4.33), todas las diferencias con respecto a los valores estadísticos obtenidos en dicho estudio son menores a un 1%, salvo el caso de ductilidad igual a 10, para la zona de desplazamiento, en que la diferencia es de un 3,2%, pero si comparamos los valores esto es muy poco significativo ($\phi_{10} = 0,0878$ v/s $\phi_{10} = 0,0850$). Por otra parte si comparamos los valores estadísticos con los valores que se obtienen usando las fórmulas propuestas en el estudio del año 2002 para el mismo caso anterior (Elastoplástico, 5% amortiguamiento) vemos que si bien las diferencias porcentuales no son tan exageradas, ya que llegan solo a un 8,39% en

el caso más desfavorable, las nuevas expresiones permiten encontrar valores mucho más acertados, con diferencias que no superan el 5,4% en el peor de los casos (zona de Desplazamiento, ductilidad igual a 10), y siendo la mayoría del orden de un 1% o menor. Ahora si comparamos los valores estadísticos con las reglas clásicas, vemos que la aproximación empeora bastante, además de ser no conservadora cuando tenemos valores de ductilidad mayores a 3 para la zona de aceleración y velocidad, llegando a diferencias del orden de un 25%.

Una última comparación de los factores obtenidos, es respecto de los valores que presentan otros autores (Newmark y Hall, Wu y Hanson, Ashour, Ramirez et al., Lin y Chang) y que se muestran en un estudio hecho por Lin, et al., (2005), en este estudio se comparan los factores de reducción por amortiguamiento para estimar el espectro de respuesta elástico ($\mu=1$). A diferencia del factor de amplificación ψ , en códigos de diseño actuales este factor se denomina ' B ' y se presenta normalizado con respecto al espectro de respuesta con un 5% de amortiguamiento, por lo tanto para hacer la comparación correspondiente, se debe calcular

$$B = \frac{\psi(\xi)}{\psi(\xi = 5\%)} \quad (4.21)$$

Los valores obtenidos por la ecuación anterior (caso elastoplástico), se presentan en la Tablas 4.34. Además en la Tabla 4.35 se hace una comparación de estos valores con los factores presentados en los códigos de diseño norteamericanos FEMA-273 (1997) y FEMA-368 (2000), los que se basan en las reglas presentadas por los autores mencionados en el estudio de Lin et al., (2005).

Tabla 4.1 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 0% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	1.20	3.45	2.6772	1.9017	0.7103	1.0000
	1.5	0.80	3.89	1.3836	0.7094	0.5127	0.5168
	2	0.80	4.00	0.9341	0.4521	0.4840	0.3489
	3	0.80	4.56	0.5920	0.2867	0.4844	0.2211
	5	0.88	5.17	0.3494	0.1712	0.4901	0.1305
	10	1.03	6.60	0.1790	0.0889	0.4964	0.0669
Velocidad	1	0.85	3.67	4.1435	3.4791	0.8396	1.0000
	1.5	0.62	3.89	1.5493	0.7508	0.4846	0.3739
	2	0.62	4.00	1.0394	0.4591	0.4417	0.2509
	3	0.64	4.56	0.6717	0.2811	0.4185	0.1621
	5	0.70	5.17	0.4364	0.1688	0.3868	0.1053
	10	0.83	6.60	0.2641	0.0956	0.3622	0.0637
Aceleracion	1	0.52	3.08	6.2097	4.3695	0.7037	1.0000
	1.5	0.46	3.16	2.5782	1.2136	0.4707	0.4152
	2	0.46	3.25	1.8138	0.7085	0.3906	0.2921
	3	0.47	3.67	1.3291	0.4465	0.3359	0.2140
	5	0.52	4.28	1.0074	0.2964	0.2943	0.1622
	10	0.64	5.50	0.7814	0.2088	0.2672	0.1258

Tabla 4.2 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 2% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.78	2.89	2.0917	1.0960	0.5240	1.0000
	1.5	0.75	3.25	1.2106	0.5596	0.4623	0.5788
	2	0.78	3.56	0.8473	0.3871	0.4568	0.4051
	3	0.80	4.28	0.5467	0.2556	0.4675	0.2613
	5	0.88	5.17	0.3281	0.1579	0.4813	0.1569
	10	1.07	6.60	0.1689	0.0829	0.4907	0.0808
Velocidad	1	0.58	2.89	2.2149	1.1409	0.5151	1.0000
	1.5	0.58	3.25	1.2676	0.5398	0.4259	0.5723
	2	0.60	3.56	0.9127	0.3667	0.4018	0.4121
	3	0.62	4.28	0.6118	0.2427	0.3967	0.2762
	5	0.68	5.17	0.4036	0.1526	0.3780	0.1822
	10	0.85	6.60	0.2464	0.0884	0.3589	0.1113
Aceleracion	1	0.41	2.30	2.7656	1.1750	0.4249	1.0000
	1.5	0.43	2.60	1.7752	0.5613	0.3162	0.6419
	2	0.44	2.89	1.4366	0.3998	0.2783	0.5194
	3	0.46	3.45	1.1469	0.2935	0.2559	0.4147
	5	0.52	4.14	0.9212	0.2221	0.2411	0.3331
	10	0.64	5.50	0.7297	0.1788	0.2450	0.2639

Tabla 4.3 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 5% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.70	2.89	1.7411	0.7754	0.4454	1.0000
	1.5	0.70	3.16	1.0646	0.4480	0.4208	0.6115
	2	0.75	3.45	0.7599	0.3245	0.4271	0.4364
	3	0.78	4.14	0.5007	0.2268	0.4531	0.2875
	5	0.85	5.17	0.3024	0.1416	0.4684	0.1737
	10	1.07	6.60	0.1529	0.0736	0.4813	0.0878
Velocidad	1	0.52	2.89	1.6898	0.7551	0.4469	1.0000
	1.5	0.56	3.16	1.0590	0.4130	0.3900	0.6267
	2	0.58	3.56	0.7943	0.3087	0.3886	0.4700
	3	0.60	4.14	0.5486	0.2103	0.3834	0.3246
	5	0.68	5.17	0.3657	0.1339	0.3660	0.2164
	10	0.85	6.60	0.2245	0.0799	0.3561	0.1328
Aceleración	1	0.40	2.30	2.1164	0.7069	0.3340	1.0000
	1.5	0.41	2.52	1.4712	0.3806	0.2587	0.6952
	2	0.43	2.89	1.2394	0.2880	0.2323	0.5856
	3	0.44	3.45	1.0200	0.2222	0.2179	0.4819
	5	0.52	4.28	0.8408	0.1819	0.2164	0.3973
	10	0.66	5.50	0.6691	0.1600	0.2391	0.3162

Tabla 4.4 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 10% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.64	3.00	1.4524	0.5512	0.3795	1.0000
	1.5	0.66	3.35	0.9217	0.3518	0.3817	0.6346
	2	0.70	3.67	0.6723	0.2705	0.4024	0.4629
	3	0.75	4.28	0.4434	0.1944	0.4383	0.3053
	5	0.83	5.34	0.2689	0.1194	0.4442	0.1851
	10	1.10	6.80	0.1263	0.0586	0.4642	0.0870
Velocidad	1	0.50	3.00	1.3151	0.5224	0.3973	1.0000
	1.5	0.52	3.25	0.8593	0.3092	0.3598	0.6534
	2	0.54	3.67	0.6608	0.2444	0.3699	0.5024
	3	0.58	4.28	0.4695	0.1731	0.3686	0.3570
	5	0.66	5.34	0.3167	0.1134	0.3580	0.2408
	10	0.85	6.60	0.1948	0.0686	0.3521	0.1481
Aceleracion	1	0.40	2.30	1.7019	0.4373	0.2569	1.0000
	1.5	0.40	2.60	1.2366	0.2575	0.2082	0.7266
	2	0.41	2.89	1.0653	0.2069	0.1943	0.6260
	3	0.43	3.56	0.9003	0.1742	0.1935	0.5290
	5	0.50	4.42	0.7526	0.1522	0.2022	0.4422
	10	0.66	5.67	0.5949	0.1450	0.2437	0.3496

Tabla 4.5 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 20% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.60	3.25	1.1421	0.3863	0.3382	1.0000
	1.5	0.62	3.56	0.7417	0.2594	0.3497	0.6494
	2	0.64	3.89	0.5526	0.2114	0.3826	0.4838
	3	0.70	4.56	0.3663	0.1507	0.4113	0.3208
	5	0.80	5.67	0.2177	0.0927	0.4258	0.1906
	10	1.10	7.25	0.0963	0.0413	0.4286	0.0843
Velocidad	1	0.46	3.16	0.9457	0.3349	0.3541	1.0000
	1.5	0.47	3.56	0.6329	0.2182	0.3448	0.6692
	2	0.50	3.89	0.4982	0.1759	0.3530	0.5268
	3	0.56	4.56	0.3646	0.1300	0.3566	0.3855
	5	0.64	5.50	0.2475	0.0873	0.3530	0.2617
	10	0.88	7.00	0.1496	0.0534	0.3573	0.1582
Aceleracion	1	0.36	2.52	1.3204	0.2454	0.1858	1.0000
	1.5	0.37	2.78	0.9906	0.1669	0.1685	0.7502
	2	0.38	3.16	0.8686	0.1462	0.1683	0.6579
	3	0.43	3.78	0.7445	0.1354	0.1819	0.5639
	5	0.50	4.56	0.6219	0.1319	0.2121	0.4710
	10	0.66	6.20	0.4933	0.1297	0.2629	0.3736

Tabla 4.6 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 50% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.49	3.89	0.8330	0.2577	0.3093	1.0000
	1.5	0.50	4.42	0.5499	0.1809	0.3289	0.6602
	2	0.54	4.85	0.4096	0.1422	0.3472	0.4918
	3	0.62	5.34	0.2620	0.0971	0.3705	0.3146
	5	0.75	6.40	0.1469	0.0569	0.3873	0.1763
	10	0.93	8.33	0.0667	0.0265	0.3977	0.0801
Velocidad	1	0.38	3.89	0.5681	0.1669	0.2938	1.0000
	1.5	0.40	4.28	0.3883	0.1133	0.2917	0.6834
	2	0.43	4.70	0.3090	0.0942	0.3048	0.5438
	3	0.50	5.17	0.2313	0.0741	0.3205	0.4071
	5	0.62	6.20	0.1564	0.0531	0.3393	0.2753
	10	0.75	8.33	0.0880	0.0306	0.3472	0.1550
Aceleracion	1	0.31	3.00	0.9714	0.1262	0.1299	1.0000
	1.5	0.32	3.45	0.7486	0.1146	0.1531	0.7707
	2	0.34	3.89	0.6584	0.1159	0.1761	0.6778
	3	0.38	4.42	0.5575	0.1232	0.2209	0.5739
	5	0.47	5.50	0.4615	0.1199	0.2598	0.4751
	10	0.56	7.25	0.3461	0.1058	0.3056	0.3563

Tabla 4.7 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema elastoplástico con 100% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.40	4.85	0.6243	0.2158	0.3457	1.0000
	1.5	0.40	5.34	0.4183	0.1467	0.3508	0.6701
	2	0.44	5.67	0.3064	0.1117	0.3645	0.4908
	3	0.54	6.20	0.1881	0.0733	0.3894	0.3013
	5	0.62	7.50	0.1071	0.0436	0.4069	0.1716
	10	0.70	9.75	0.0501	0.0213	0.4250	0.0802
Velocidad	1	0.33	4.70	0.3477	0.0881	0.2534	1.0000
	1.5	0.34	5.17	0.2384	0.0604	0.2532	0.6857
	2	0.36	5.67	0.1890	0.0513	0.2716	0.5436
	3	0.44	6.20	0.1413	0.0422	0.2989	0.4065
	5	0.52	7.50	0.0932	0.0308	0.3300	0.2681
	10	0.60	9.25	0.0501	0.0151	0.3008	0.1440
Aceleracion	1	0.26	3.78	0.7509	0.1483	0.1975	1.0000
	1.5	0.26	4.28	0.5731	0.1356	0.2365	0.7632
	2	0.28	4.85	0.5025	0.1317	0.2621	0.6692
	3	0.34	5.50	0.4224	0.1233	0.2920	0.5625
	5	0.40	6.40	0.3305	0.1066	0.3225	0.4401
	10	0.47	8.00	0.2233	0.0867	0.3883	0.2973

Tabla 4.8 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de amplificación ψ_{μ} , sistema elastoplástico.

Region Espectral	Coeficiente	Amortiguamiento considerado para el ajuste			
		0-100%	0%	2% - 20%	50% - 100%
Desplazamiento	a1	0.4875	0.4832	0.4979	0.4415
	a2	2.5050	2.5050	2.5066	2.7237
	a3	31.3032	31.3032	29.4284	53.6808
	a4	-3.3441	-3.0858	-3.1400	-3.7903
	R ²	0.9647	0.9993	0.9792	0.9831
Velocidad	a1	1.0640	0.7918	1.1163	0.9365
	a2	0.2006	0.2006	0.2015	0.2017
	a3	4.9414	4.7905	4.3547	6.9223
	a4	-0.3008	0.7927	-0.1332	-0.4860
	a5	-3.1428	-2.2878	-2.6844	-3.9257
	R ²	0.8858	0.9997	0.9976	0.9991
Aceleracion	a1	0.8817	0.9223	1.1647	0.9198
	a2	0.3424	0.1579	0.1579	0.1615
	a3	2.4125	1.4836	1.7699	4.4439
	a4	-0.0895	0.4255	0.1196	-0.4243
	a5	-1.3647	-0.9910	-1.0316	-2.0099
	R ²	0.9080	0.9999	0.9975	0.9976

Tabla 4.9 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de reducción ϕ_μ , sistema elastoplástico.

Region Espectral	Coeficiente	Amortiguamiento considerado para el ajuste			
		0-100%	0%	2% - 20%	50% - 100%
Desplazamiento	a1	0.8663	0.8631	0.8212	1.1294
	a2	0.0500	0.0483	0.0000	0.0000
	a3	0.0401	0.0483	0.0645	-0.0160
	a4	-1.0695	-1.0655	-1.0400	-1.1192
	R ²	0.9799	0.8881	0.9862	0.9945
Velocidad	a1	3.6051	2.7632	1.9588	2.7479
	a2	0.4701	0.1107	-0.4986	0.1108
	a3	-0.8384	-0.3515	-0.4155	-0.7020
	a4	-0.6624	-0.6628	-0.6900	-0.5579
	a5	0.0398	-0.0019	-0.0068	0.0776
	R ²	0.9991	0.9999	0.9998	0.9986
Aceleracion	a1	7.6106	4.2462	5.0574	7.9071
	a2	0.2820	0.0145	-0.9523	-1.3090
	a3	-1.1538	-0.3014	-0.2477	-0.6011
	a4	-0.3799	-0.3697	-0.3377	-0.1322
	a5	0.0521	-0.0336	-0.0628	0.2619
	R ²	0.9870	0.9984	0.9996	0.9971

Tabla 4.10 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 0% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	1.20	3.35	2.6798	1.9048	0.7108	1.0000
	1.5	0.75	3.78	1.3605	0.6593	0.4846	0.5077
	2	0.75	3.89	0.9004	0.4090	0.4542	0.3360
	3	0.75	4.42	0.5496	0.2440	0.4440	0.2051
	5	0.85	5.34	0.3036	0.1292	0.4254	0.1133
	10	1.07	7.00	0.1417	0.0528	0.3724	0.0529
Velocidad	1	0.85	3.56	4.1508	3.4531	0.8319	1.0000
	1.5	0.60	3.78	1.4526	0.6484	0.4464	0.3499
	2	0.58	3.89	0.9467	0.3771	0.3983	0.2281
	3	0.60	4.42	0.5906	0.2140	0.3623	0.1423
	5	0.68	5.17	0.3689	0.1215	0.3293	0.0889
	10	0.83	6.80	0.2103	0.0598	0.2844	0.0507
Aceleracion	1	0.52	3.08	6.2117	4.4234	0.7121	1.0000
	1.5	0.44	3.00	2.3361	0.9316	0.3988	0.3761
	2	0.44	3.08	1.5994	0.4947	0.3093	0.2575
	3	0.46	3.45	1.1409	0.2816	0.2468	0.1837
	5	0.52	4.14	0.8548	0.1726	0.2019	0.1376
	10	0.68	5.34	0.6410	0.1350	0.2106	0.1032

Tabla 4.11 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 2% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.78	2.89	2.0345	1.0837	0.5327	1.0000
	1.5	0.73	3.25	1.1684	0.5293	0.4530	0.5743
	2	0.73	3.67	0.8081	0.3537	0.4377	0.3972
	3	0.75	4.28	0.5037	0.2235	0.4438	0.2476
	5	0.83	5.34	0.2825	0.1205	0.4266	0.1389
	10	1.07	7.00	0.1299	0.0483	0.3720	0.0638
Velocidad	1	0.58	2.89	2.1702	1.1397	0.5252	1.0000
	1.5	0.58	3.25	1.2107	0.5047	0.4169	0.5579
	2	0.58	3.67	0.8418	0.3253	0.3864	0.3879
	3	0.58	4.28	0.5413	0.1951	0.3604	0.2494
	5	0.66	5.17	0.3403	0.1125	0.3307	0.1568
	10	0.83	6.80	0.1927	0.0551	0.2862	0.0888
Aceleracion	1	0.41	2.30	2.6988	1.1626	0.4308	1.0000
	1.5	0.43	2.60	1.6984	0.5211	0.3068	0.6293
	2	0.44	2.89	1.3465	0.3565	0.2647	0.4989
	3	0.46	3.45	1.0361	0.2369	0.2286	0.3839
	5	0.52	4.28	0.8010	0.1623	0.2026	0.2968
	10	0.68	5.50	0.5996	0.1267	0.2113	0.2222

Tabla 4.12 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 5% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.70	2.89	1.7411	0.7755	0.4454	1.0000
	1.5	0.70	3.25	1.0568	0.4436	0.4198	0.6070
	2	0.73	3.56	0.7487	0.3114	0.4160	0.4300
	3	0.75	4.28	0.4765	0.2050	0.4303	0.2737
	5	0.80	5.50	0.2734	0.1122	0.4104	0.1570
	10	1.03	7.25	0.1201	0.0431	0.3591	0.0690
Velocidad	1	0.52	2.89	1.6906	0.7559	0.4471	1.0000
	1.5	0.54	3.16	1.0424	0.3960	0.3799	0.6166
	2	0.56	3.56	0.7639	0.2815	0.3686	0.4518
	3	0.58	4.28	0.5025	0.1731	0.3446	0.2972
	5	0.64	5.34	0.3159	0.1011	0.3202	0.1869
	10	0.80	6.80	0.1782	0.0495	0.2776	0.1054
Aceleracion	1	0.40	2.30	2.1155	0.7064	0.3339	1.0000
	1.5	0.41	2.52	1.4536	0.3693	0.2541	0.6871
	2	0.43	2.89	1.2028	0.2649	0.2203	0.5686
	3	0.44	3.45	0.9612	0.1984	0.2064	0.4543
	5	0.52	4.28	0.7582	0.1539	0.2029	0.3584
	10	0.66	5.50	0.5613	0.1281	0.2282	0.2653

Tabla 4.13 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 10% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.64	3.00	1.4524	0.5512	0.3795	1.0000
	1.5	0.66	3.35	0.9174	0.3500	0.3815	0.6316
	2	0.70	3.67	0.6599	0.2626	0.3979	0.4544
	3	0.73	4.42	0.4261	0.1777	0.4171	0.2934
	5	0.78	5.67	0.2477	0.0956	0.3860	0.1705
	10	1.00	7.25	0.1077	0.0374	0.3472	0.0741
Velocidad	1	0.50	3.00	1.3153	0.5226	0.3973	1.0000
	1.5	0.50	3.25	0.8517	0.3036	0.3564	0.6475
	2	0.54	3.67	0.6428	0.2287	0.3557	0.4887
	3	0.56	4.42	0.4367	0.1475	0.3377	0.3320
	5	0.62	5.50	0.2771	0.0861	0.3107	0.2107
	10	0.78	7.00	0.1544	0.0423	0.2738	0.1174
Aceleracion	1	0.40	2.30	1.7012	0.4369	0.2568	1.0000
	1.5	0.40	2.60	1.2269	0.2529	0.2061	0.7212
	2	0.41	2.89	1.0430	0.1962	0.1881	0.6131
	3	0.43	3.56	0.8602	0.1633	0.1899	0.5056
	5	0.50	4.42	0.6881	0.1379	0.2005	0.4045
	10	0.64	5.84	0.5044	0.1240	0.2458	0.2965

Tabla 4.14 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 20% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.60	3.25	1.1596	0.3878	0.3344	1.0000
	1.5	0.62	3.56	0.7502	0.2590	0.3453	0.6469
	2	0.64	4.00	0.5545	0.2079	0.3749	0.4782
	3	0.68	4.70	0.3608	0.1401	0.3883	0.3112
	5	0.75	6.00	0.2092	0.0773	0.3694	0.1804
	10	0.93	7.50	0.0915	0.0310	0.3389	0.0789
Velocidad	1	0.46	3.16	0.9658	0.3360	0.3478	1.0000
	1.5	0.47	3.56	0.6423	0.2147	0.3342	0.6650
	2	0.49	3.89	0.4980	0.1670	0.3354	0.5156
	3	0.54	4.70	0.3490	0.1131	0.3240	0.3613
	5	0.60	5.84	0.2220	0.0671	0.3022	0.2299
	10	0.75	7.25	0.1215	0.0316	0.2600	0.1258
Aceleracion	1	0.36	2.52	1.3467	0.2455	0.1823	1.0000
	1.5	0.37	2.78	1.0048	0.1646	0.1638	0.7461
	2	0.38	3.16	0.8716	0.1405	0.1612	0.6472
	3	0.41	3.78	0.7330	0.1294	0.1765	0.5443
	5	0.49	4.70	0.5897	0.1237	0.2097	0.4379
	10	0.60	6.00	0.4164	0.1177	0.2826	0.3092

Tabla 4.15 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 50% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.49	3.89	0.8329	0.2577	0.3095	1.0000
	1.5	0.50	4.42	0.5490	0.1805	0.3287	0.6591
	2	0.52	4.85	0.4109	0.1399	0.3406	0.4933
	3	0.60	5.50	0.2598	0.0934	0.3596	0.3119
	5	0.66	6.80	0.1478	0.0539	0.3646	0.1775
	10	0.73	8.33	0.0688	0.0239	0.3477	0.0825
Velocidad	1	0.38	3.89	0.5681	0.1669	0.2938	1.0000
	1.5	0.40	4.28	0.3868	0.1122	0.2900	0.6809
	2	0.41	4.70	0.3047	0.0913	0.2996	0.5363
	3	0.49	5.34	0.2203	0.0670	0.3040	0.3877
	5	0.54	6.40	0.1394	0.0395	0.2835	0.2454
	10	0.60	8.00	0.0722	0.0163	0.2262	0.1272
Aceleracion	1	0.31	3.00	0.9711	0.1261	0.1298	1.0000
	1.5	0.32	3.45	0.7442	0.1137	0.1528	0.7664
	2	0.34	3.78	0.6482	0.1166	0.1799	0.6675
	3	0.38	4.42	0.5410	0.1208	0.2232	0.5571
	5	0.43	5.50	0.4278	0.1146	0.2679	0.4406
	10	0.50	6.80	0.2811	0.0995	0.3540	0.2894

Tabla 4.16 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema bilineal con 100% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.40	4.85	0.6242	0.2159	0.3459	1.0000
	1.5	0.40	5.34	0.4192	0.1466	0.3497	0.6715
	2	0.43	5.67	0.3082	0.1113	0.3610	0.4937
	3	0.50	6.40	0.1916	0.0730	0.3809	0.3070
	5	0.54	7.75	0.1105	0.0433	0.3916	0.1771
	10	0.56	8.67	0.0534	0.0211	0.3956	0.0856
Velocidad	1	0.33	4.70	0.3476	0.0880	0.2533	1.0000
	1.5	0.33	5.17	0.2376	0.0602	0.2536	0.6835
	2	0.36	5.50	0.1881	0.0503	0.2673	0.5410
	3	0.41	6.20	0.1360	0.0383	0.2817	0.3914
	5	0.46	7.25	0.0844	0.0213	0.2519	0.2429
	10	0.49	8.33	0.0429	0.0079	0.1845	0.1235
Aceleracion	1	0.26	3.78	0.7507	0.1484	0.1976	1.0000
	1.5	0.26	4.28	0.5704	0.1342	0.2353	0.7598
	2	0.28	4.70	0.4939	0.1310	0.2652	0.6579
	3	0.33	5.50	0.4088	0.1205	0.2947	0.5445
	5	0.37	6.40	0.3035	0.1054	0.3471	0.4043
	10	0.40	7.50	0.1832	0.0801	0.4371	0.2440

Tabla 4.17 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de amplificación ψ_{μ} , sistema bilineal.

Region Espectral	Coeficiente	Amortiguamiento considerado para el ajuste			
		0-100%	0%	2% - 20%	50% - 100%
Desplazamiento	a1	0.4414	0.4393	0.4564	0.4317
	a2	3.6568	3.1304	3.1320	3.1289
	a3	50.1705	48.0536	46.6253	61.7719
	a4	-3.4737	-3.4072	-3.3647	-3.7292
	R ²	0.9703	0.9959	0.9736	0.9847
Velocidad	a1	0.9220	0.6835	0.9441	0.8242
	a2	0.2622	0.2619	0.2629	0.2618
	a3	6.9371	7.0100	6.5218	10.6757
	a4	-0.3420	0.7832	-0.2475	-0.5562
	a5	-3.5511	-2.5822	-3.1725	-4.4636
	R ²	0.8666	0.9997	0.9958	0.9993
Aceleracion	a1	0.7534	0.4327	0.9621	0.7610
	a2	0.4533	0.2123	0.2123	0.2182
	a3	4.3317	3.1777	2.7744	10.5661
	a4	-0.2147	0.8348	0.0055	-0.6415
	a5	-1.7300	-1.1977	-1.3248	-2.7811
	R ²	0.8153	0.9999	0.9970	0.9972

Tabla 4.18 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de reducción ϕ_μ , sistema bilineal.

Region Espectral	Coeficiente	Amortiguamiento considerado para el ajuste			
		0-100%	0%	2% - 20%	50% - 100%
Desplazamiento	a1	0.8582	0.8500	0.8511	0.9949
	a2	0.0531	0.0615	-0.7040	-0.7036
	a3	0.0575	0.0319	0.0751	0.0104
	a4	-1.1268	-1.1821	-1.1287	-1.0951
	R ²	0.9717	0.9177	0.9890	0.9971
Velocidad	a1	3.2603	3.2673	5.9075	5.7630
	a2	0.5783	0.5441	2.0644	2.0836
	a3	-0.8634	-0.8758	-1.0737	-4.6772
	a4	-0.7557	-0.7461	-0.7569	-0.8455
	a5	0.0303	0.0347	0.0318	0.0121
	R ²	0.9996	1.0000	0.9998	0.9991
Aceleracion	a1	8.0519	8.0450	4.1930	4.1795
	a2	0.3909	0.5662	-0.6945	-0.6884
	a3	-1.2997	-1.2523	-0.4643	-1.1239
	a4	-0.4292	-0.4670	-0.4039	-0.2704
	a5	0.0580	0.0295	-0.0178	0.1689
	R ²	0.9935	0.9987	0.9992	0.9948

Tabla 4.19 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 0% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	1.20	3.35	2.6796	1.9048	0.7108	1.0000
	1.5	0.73	3.35	1.2949	0.5924	0.4575	0.4832
	2	0.75	3.89	0.8426	0.3535	0.4196	0.3144
	3	0.85	4.56	0.4930	0.1894	0.3842	0.1840
	5	1.00	5.84	0.2762	0.0992	0.3592	0.1031
	10	1.30	7.50	0.1300	0.0440	0.3386	0.0485
Velocidad	1	0.85	3.56	4.1479	3.4480	0.8313	1.0000
	1.5	0.58	3.35	1.3417	0.5820	0.4338	0.3235
	2	0.58	3.78	0.8989	0.3523	0.3919	0.2167
	3	0.64	4.56	0.5945	0.2171	0.3652	0.1433
	5	0.75	5.67	0.3913	0.1314	0.3357	0.0943
	10	1.00	7.25	0.2406	0.0725	0.3015	0.0580
Aceleracion	1	0.52	3.08	6.2122	4.3701	0.7035	1.0000
	1.5	0.44	2.60	1.9239	0.6009	0.3123	0.3097
	2	0.46	3.00	1.4778	0.3646	0.2467	0.2379
	3	0.52	3.56	1.1763	0.2401	0.2041	0.1894
	5	0.60	4.42	0.9706	0.1782	0.1836	0.1562
	10	0.78	5.84	0.7748	0.1452	0.1874	0.1247

Tabla 4.20 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 2% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.78	2.89	2.0917	1.0959	0.5240	1.0000
	1.5	0.70	3.35	1.1701	0.5076	0.4338	0.5594
	2	0.75	3.78	0.7778	0.3143	0.4041	0.3719
	3	0.85	4.70	0.4630	0.1748	0.3775	0.2214
	5	0.98	5.84	0.2618	0.0921	0.3516	0.1252
	10	1.25	7.50	0.1224	0.0406	0.3317	0.0585
Velocidad	1	0.58	2.89	2.2149	1.1409	0.5151	1.0000
	1.5	0.54	3.25	1.1710	0.4783	0.4084	0.5287
	2	0.58	3.78	0.8177	0.3090	0.3779	0.3692
	3	0.64	4.56	0.5486	0.1958	0.3569	0.2477
	5	0.73	5.67	0.3623	0.1183	0.3266	0.1636
	10	0.98	7.25	0.2204	0.0645	0.2925	0.0995
Aceleracion	1	0.41	2.30	2.7656	1.1750	0.4249	1.0000
	1.5	0.43	2.60	1.6556	0.4720	0.2851	0.5987
	2	0.46	2.89	1.3306	0.3030	0.2277	0.4811
	3	0.50	3.56	1.0902	0.2088	0.1916	0.3942
	5	0.58	4.42	0.9044	0.1606	0.1775	0.3270
	10	0.78	5.84	0.7185	0.1367	0.1902	0.2598

Tabla 4.21 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 5% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.70	2.89	1.7411	0.7754	0.4454	1.0000
	1.5	0.68	3.35	1.0377	0.4169	0.4018	0.5960
	2	0.73	3.78	0.7107	0.2689	0.3784	0.4082
	3	0.80	4.70	0.4339	0.1558	0.3591	0.2492
	5	0.95	5.84	0.2436	0.0842	0.3458	0.1399
	10	1.20	7.75	0.1131	0.0370	0.3270	0.0650
Velocidad	1	0.52	2.89	1.6898	0.7551	0.4469	1.0000
	1.5	0.54	3.25	1.0075	0.3930	0.3901	0.5962
	2	0.56	3.78	0.7271	0.2658	0.3655	0.4303
	3	0.60	4.56	0.4930	0.1698	0.3444	0.2918
	5	0.73	5.67	0.3276	0.1027	0.3135	0.1939
	10	0.95	7.25	0.1961	0.0553	0.2821	0.1160
Aceleracion	1	0.40	2.30	2.1164	0.7069	0.3340	1.0000
	1.5	0.41	2.60	1.4354	0.3535	0.2462	0.6782
	2	0.44	2.89	1.1943	0.2435	0.2039	0.5643
	3	0.49	3.67	0.9994	0.1748	0.1749	0.4722
	5	0.58	4.56	0.8314	0.1411	0.1697	0.3928
	10	0.75	6.00	0.6535	0.1280	0.1958	0.3088

Tabla 4.22 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 10% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.64	3.00	1.4524	0.5512	0.3795	1.0000
	1.5	0.66	3.45	0.8949	0.3289	0.3675	0.6161
	2	0.70	3.89	0.6293	0.2246	0.3568	0.4333
	3	0.78	4.85	0.3910	0.1365	0.3490	0.2692
	5	0.90	6.00	0.2208	0.0748	0.3387	0.1520
	10	1.13	8.00	0.1016	0.0328	0.3229	0.0700
Velocidad	1	0.50	3.00	1.3151	0.5224	0.3973	1.0000
	1.5	0.50	3.35	0.8317	0.3045	0.3661	0.6325
	2	0.52	3.89	0.6170	0.2152	0.3487	0.4692
	3	0.60	4.70	0.4258	0.1392	0.3269	0.3238
	5	0.70	5.84	0.2820	0.0843	0.2989	0.2144
	10	0.88	7.50	0.1652	0.0453	0.2741	0.1256
Aceleracion	1	0.40	2.30	1.7019	0.4373	0.2569	1.0000
	1.5	0.40	2.60	1.2267	0.2495	0.2034	0.7208
	2	0.43	3.00	1.0508	0.1848	0.1759	0.6175
	3	0.47	3.78	0.8908	0.1436	0.1612	0.5234
	5	0.56	4.70	0.7397	0.1266	0.1711	0.4346
	10	0.70	6.20	0.5692	0.1218	0.2140	0.3344

Tabla 4.23 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 20% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.60	3.25	1.1597	0.3878	0.3344	1.0000
	1.5	0.62	3.67	0.7380	0.2469	0.3345	0.6364
	2	0.64	4.14	0.5339	0.1797	0.3365	0.4604
	3	0.70	5.17	0.3390	0.1141	0.3365	0.2923
	5	0.80	6.40	0.1908	0.0628	0.3291	0.1645
	10	1.00	8.00	0.0878	0.0281	0.3202	0.0757
Velocidad	1	0.46	3.16	0.9657	0.3359	0.3478	1.0000
	1.5	0.47	3.67	0.6343	0.2138	0.3371	0.6568
	2	0.50	4.14	0.4821	0.1547	0.3209	0.4993
	3	0.54	5.00	0.3362	0.1015	0.3019	0.3482
	5	0.64	6.20	0.2198	0.0623	0.2833	0.2276
	10	0.80	7.75	0.1256	0.0326	0.2595	0.1301
Aceleracion	1	0.36	2.52	1.3474	0.2458	0.1824	1.0000
	1.5	0.38	2.78	1.0110	0.1600	0.1583	0.7503
	2	0.40	3.25	0.8843	0.1321	0.1494	0.6563
	3	0.44	4.00	0.7525	0.1208	0.1605	0.5585
	5	0.52	5.00	0.6157	0.1192	0.1936	0.4569
	10	0.64	6.40	0.4522	0.1174	0.2597	0.3356

Tabla 4.24 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 50% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.49	3.89	0.8330	0.2577	0.3093	1.0000
	1.5	0.50	4.42	0.5446	0.1748	0.3210	0.6538
	2	0.52	5.00	0.3998	0.1306	0.3267	0.4799
	3	0.58	5.84	0.2531	0.0849	0.3354	0.3038
	5	0.64	7.00	0.1450	0.0489	0.3374	0.1740
	10	0.75	8.33	0.0675	0.0234	0.3469	0.0811
Velocidad	1	0.38	3.89	0.5681	0.1669	0.2938	1.0000
	1.5	0.40	4.42	0.3827	0.1084	0.2833	0.6736
	2	0.41	4.85	0.2953	0.0814	0.2756	0.5198
	3	0.47	5.67	0.2078	0.0560	0.2694	0.3657
	5	0.54	6.80	0.1338	0.0337	0.2518	0.2356
	10	0.62	8.00	0.0731	0.0160	0.2187	0.1287
Aceleracion	1	0.31	3.00	0.9714	0.1262	0.1299	1.0000
	1.5	0.32	3.45	0.7501	0.1145	0.1526	0.7722
	2	0.34	4.00	0.6569	0.1179	0.1794	0.6763
	3	0.37	4.70	0.5466	0.1228	0.2247	0.5627
	5	0.43	5.67	0.4290	0.1210	0.2820	0.4417
	10	0.50	7.00	0.2906	0.1037	0.3568	0.2992

Tabla 4.25 Resumen de estadísticas para cada región espectral para sistema con degradación de rigidez con 100% de amortiguamiento.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	f_{dv} (cps)	f_{va} (cps)	Promedio (Ψ_μ)	Desv. Estandar (σ_μ)	Covarianza (Ω_μ)	Coef. de Reducción (ϕ_μ)
Desplazamiento	1	0.40	4.85	0.6243	0.2158	0.3457	1.0000
	1.5	0.40	5.50	0.4151	0.1444	0.3478	0.6650
	2	0.41	6.00	0.3052	0.1087	0.3562	0.4890
	3	0.46	6.80	0.1948	0.0715	0.3669	0.3121
	5	0.50	7.75	0.1122	0.0426	0.3794	0.1798
	10	0.56	8.67	0.0534	0.0210	0.3935	0.0856
Velocidad	1	0.33	4.70	0.3477	0.0881	0.2534	1.0000
	1.5	0.33	5.34	0.2350	0.0586	0.2495	0.6757
	2	0.36	5.67	0.1829	0.0446	0.2441	0.5259
	3	0.40	6.40	0.1284	0.0302	0.2354	0.3694
	5	0.43	7.50	0.0810	0.0175	0.2167	0.2329
	10	0.49	8.67	0.0428	0.0077	0.1807	0.1232
Aceleracion	1	0.26	3.78	0.7509	0.1483	0.1975	1.0000
	1.5	0.27	4.28	0.5748	0.1351	0.2351	0.7655
	2	0.28	4.85	0.4945	0.1322	0.2674	0.6585
	3	0.32	5.67	0.4038	0.1255	0.3109	0.5377
	5	0.35	6.60	0.3018	0.1112	0.3684	0.4019
	10	0.40	7.50	0.1856	0.0838	0.4512	0.2472

Tabla 4.26 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de amplificación ψ_{μ} , sistema con degradación de rigidez.

Region Espectral	Coeficiente	Amortiguamiento considerado para el ajuste			
		0-100%	0%	2% - 20%	50% - 100%
Desplazamiento	a1	0.4148	0.4064	0.4204	0.4006
	a2	4.9938	4.9920	4.9966	4.9933
	a3	68.9289	71.2487	66.8760	88.3367
	a4	-3.5598	-3.5546	-3.4789	-3.7387
	R ²	0.9796	0.9990	0.9806	0.9862
Velocidad	a1	1.0892	0.7675	1.0866	0.9064
	a2	0.1714	0.1871	0.1998	0.1995
	a3	4.9551	4.9008	4.7370	8.0999
	a4	-0.2443	1.3184	-0.0746	-0.4514
	a5	-3.3077	-2.2292	-2.8515	-4.1740
	R ²	0.8709	0.9997	0.9960	0.9994
Aceleracion	a1	1.1538	0.4589	1.3467	0.9185
	a2	0.1349	0.0997	0.1078	0.1105
	a3	2.6024	1.4903	1.7345	7.0444
	a4	-0.2265	1.1761	0.2137	-0.6219
	a5	-1.5745	-0.7212	-1.0543	-2.6946
	R ²	0.7480	1.0000	0.9942	0.9973

Tabla 4.27 Coeficientes para las funciones de interpolación, para obtener factores de reducción ϕ_μ , sistema con degradación de rigidez.

Region Espectral	Coeficiente	Amortiguamiento considerado para el ajuste			
		0-100%	0%	2% - 20%	50% - 100%
Desplazamiento	a1	0.7841	0.8332	0.7928	0.8569
	a2	0.1592	0.0426	-0.4976	-0.4973
	a3	0.0794	0.0414	0.0905	0.0426
	a4	-1.1404	-1.1996	-1.1510	-1.0921
	R ²	0.9575	0.8815	0.9811	0.9983
Velocidad	a1	4.2021	5.2140	4.1331	5.2116
	a2	0.3245	0.5038	0.1421	0.5039
	a3	-0.7801	-0.8366	-0.7133	-0.8949
	a4	-0.6570	-0.6618	-0.6422	-0.6683
	a5	0.0589	0.0722	0.0576	0.0588
	R ²	0.9998	1.0000	0.9998	0.9998
Aceleracion	a1	15.8553	15.9285	7.8712	7.8677
	a2	0.1720	0.2996	-1.3053	-1.2959
	a3	-1.4665	-1.4430	-0.5477	-1.1468
	a4	-0.3308	-0.3517	-0.2988	-0.2263
	a5	0.1158	0.0958	0.0331	0.2056
	R ²	0.9919	0.9997	0.9990	0.9967

Tabla 4.28 Diferencia de los factores de amplificación y reducción con respecto al valor obtenido para 5% de amortiguamiento, caso elastoplástico.

		AMORTIGUAMIENTO											
Region Espectral	Ductilidad (μ)	$\beta=0\%$		$\beta=2\%$		$\beta=10\%$		$\beta=20\%$		$\beta=50\%$		$\beta=100\%$	
		Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)
Desplazamiento	1	53.76%	0.00%	20.14%	0.00%	16.58%	0.00%	34.40%	0.00%	52.16%	0.00%	64.15%	0.00%
	1.5	29.96%	15.48%	13.72%	5.34%	13.42%	3.79%	30.33%	6.20%	48.34%	7.97%	60.71%	9.58%
	2	22.93%	20.05%	11.51%	7.18%	11.52%	6.07%	27.28%	10.86%	46.09%	12.69%	59.68%	12.46%
	3	18.24%	23.10%	9.19%	9.11%	11.44%	6.16%	26.83%	11.55%	47.66%	9.40%	62.43%	4.80%
	5	15.55%	24.85%	8.53%	9.66%	11.07%	6.60%	28.01%	9.74%	51.42%	1.54%	64.56%	1.16%
	10	17.10%	23.84%	10.51%	8.02%	17.37%	0.94%	36.99%	3.95%	56.35%	8.77%	67.24%	8.63%
Velocidad	1	145.20%	0.00%	31.07%	0.00%	22.18%	0.00%	44.03%	0.00%	66.38%	0.00%	79.42%	0.00%
	1.5	46.30%	40.34%	19.70%	8.68%	18.85%	4.27%	40.23%	6.79%	63.33%	9.06%	77.49%	9.42%
	2	30.87%	46.63%	14.91%	12.33%	16.81%	6.90%	37.27%	12.09%	61.10%	15.70%	76.20%	15.66%
	3	22.44%	50.07%	11.53%	14.91%	14.42%	9.96%	33.54%	18.75%	57.84%	25.39%	74.24%	25.21%
	5	19.32%	51.34%	10.36%	15.80%	13.40%	11.28%	32.34%	20.89%	57.23%	27.22%	74.51%	23.87%
	10	17.64%	52.02%	9.77%	16.25%	13.21%	11.52%	33.37%	19.06%	60.78%	16.65%	77.70%	8.38%
Aceleracion	1	193.41%	0.00%	30.68%	0.00%	19.59%	0.00%	37.61%	0.00%	54.10%	0.00%	64.52%	0.00%
	1.5	75.24%	40.27%	20.66%	7.66%	15.95%	4.52%	32.67%	7.91%	49.12%	10.86%	61.05%	9.79%
	2	46.34%	50.13%	15.91%	11.30%	14.05%	6.89%	29.92%	12.33%	46.88%	15.74%	59.45%	14.27%
	3	30.30%	55.59%	12.44%	13.95%	11.73%	9.76%	27.01%	16.99%	45.34%	19.09%	58.59%	16.71%
	5	19.81%	59.17%	9.56%	16.16%	10.48%	11.32%	26.03%	18.56%	45.11%	19.58%	60.70%	10.77%
	10	16.78%	60.20%	9.05%	16.55%	11.10%	10.56%	26.27%	18.17%	48.28%	12.68%	66.64%	5.96%

Tabla 4.29 Diferencia de los factores de amplificación y reducción con respecto al valor obtenido para 5% de amortiguamiento, caso bilineal.

		AMORTIGUAMIENTO																	
Region Espectral	Ductilidad (μ)	β=0%		β=2%		β=10%		β=20%		β=50%		β=100%							
		Coef de Amplif. (ψ _μ)	Coef. de Reducción (φ _μ)	Coef de Amplif. (ψ _μ)	Coef. de Reducción (φ _μ)	Coef de Amplif. (ψ _μ)	Coef. de Reducción (φ _μ)	Coef de Amplif. (ψ _μ)	Coef. de Reducción (φ _μ)	Coef de Amplif. (ψ _μ)	Coef. de Reducción (φ _μ)	Coef de Amplif. (ψ _μ)	Coef. de Reducción (φ _μ)						
Desplazamiento	1	53.91%	0.00%	16.85%	0.00%	16.58%	0.00%	33.40%	0.00%	52.16%	0.00%	64.15%	0.00%						
	1.5	28.74%	16.36%	10.55%	5.39%	13.19%	4.06%	29.02%	6.58%	48.06%	8.58%	60.34%	10.63%						
	2	20.25%	21.87%	7.93%	7.63%	11.86%	5.66%	25.94%	11.19%	45.12%	14.72%	58.84%	14.82%						
	3	15.34%	25.06%	5.71%	9.53%	10.58%	7.19%	24.27%	13.70%	45.49%	13.95%	59.79%	12.17%						
	5	11.06%	27.84%	3.36%	11.55%	9.40%	8.61%	23.47%	14.90%	45.92%	13.06%	59.57%	12.78%						
	10	17.93%	23.38%	8.10%	7.49%	10.37%	7.45%	23.85%	14.34%	42.77%	19.64%	55.52%	24.07%						
Velocidad	1	145.52%	0.00%	28.37%	0.00%	22.20%	0.00%	42.87%	0.00%	66.40%	0.00%	79.44%	0.00%						
	1.5	39.34%	43.25%	16.14%	9.53%	18.29%	5.02%	38.38%	7.85%	62.89%	10.43%	77.21%	10.86%						
	2	23.94%	49.52%	10.20%	14.16%	15.85%	8.16%	34.81%	14.11%	60.12%	18.69%	75.38%	19.73%						
	3	17.53%	52.13%	7.72%	16.09%	13.09%	11.70%	30.56%	21.55%	56.16%	30.45%	72.93%	31.66%						
	5	16.76%	52.44%	7.72%	16.09%	12.28%	12.74%	29.72%	23.02%	55.87%	31.33%	73.27%	29.98%						
	10	18.00%	51.94%	8.10%	15.79%	13.34%	11.39%	31.80%	19.37%	59.47%	20.62%	75.92%	17.12%						
Aceleracion	1	193.62%	0.00%	27.57%	0.00%	19.59%	0.00%	36.34%	0.00%	54.10%	0.00%	64.51%	0.00%						
	1.5	60.71%	45.27%	16.84%	8.41%	15.59%	4.97%	30.87%	8.59%	48.80%	11.54%	60.76%	10.58%						
	2	32.98%	54.71%	11.95%	12.25%	13.28%	7.84%	27.54%	13.83%	46.11%	17.41%	58.94%	15.72%						
	3	18.70%	59.57%	7.80%	15.50%	10.51%	11.29%	23.74%	19.80%	43.71%	22.62%	57.47%	19.85%						
	5	12.75%	61.60%	5.65%	17.18%	9.25%	12.86%	22.22%	22.19%	43.57%	22.93%	59.97%	12.82%						
	10	14.21%	61.10%	6.83%	16.26%	10.14%	11.75%	25.81%	16.54%	49.92%	9.09%	67.37%	8.04%						

Tabla 4.30 Diferencia de los factores de amplificación y reducción con respecto al valor obtenido para 5% de amortiguamiento, caso con degradación de rigidez.

		AMORTIGUAMIENTO											
Region Espectral	Ductilidad (μ)	$\beta=0\%$		$\beta=2\%$		$\beta=10\%$		$\beta=20\%$		$\beta=50\%$		$\beta=100\%$	
		Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef de Reducción (ϕ_u)
Desplazamiento	1	53.90%	0.00%	20.14%	0.00%	16.58%	0.00%	33.39%	0.00%	52.16%	0.00%	64.15%	0.00%
	1.5	24.79%	18.92%	12.76%	6.14%	13.76%	3.38%	28.88%	6.78%	47.51%	9.70%	59.99%	11.58%
	2	18.57%	22.96%	9.45%	8.89%	11.44%	6.16%	24.87%	12.80%	43.74%	17.59%	57.05%	19.80%
	3	13.63%	26.17%	6.71%	11.17%	9.88%	8.04%	21.87%	17.30%	41.68%	21.91%	55.10%	25.23%
	5	13.35%	26.35%	7.46%	10.55%	9.36%	8.66%	21.68%	17.58%	40.49%	24.38%	53.94%	28.47%
	10	14.92%	25.33%	8.25%	9.89%	10.16%	7.70%	22.40%	16.51%	40.30%	24.80%	52.77%	31.73%
Velocidad	1	145.46%	0.00%	31.07%	0.00%	22.18%	0.00%	42.85%	0.00%	66.38%	0.00%	79.42%	0.00%
	1.5	33.17%	45.75%	16.23%	11.32%	17.44%	6.08%	37.04%	10.16%	62.01%	12.99%	76.68%	13.33%
	2	23.63%	49.64%	12.45%	14.20%	15.14%	9.04%	33.70%	16.02%	59.38%	20.81%	74.85%	22.21%
	3	20.58%	50.88%	11.27%	15.11%	13.63%	10.98%	31.80%	19.34%	57.86%	25.34%	73.95%	26.61%
	5	19.44%	51.34%	10.57%	15.64%	13.93%	10.60%	32.92%	17.38%	59.15%	21.51%	75.29%	20.11%
	10	22.70%	50.01%	12.39%	14.25%	15.78%	8.22%	35.93%	12.11%	62.72%	10.88%	78.16%	6.13%
Aceleración	1	193.53%	0.00%	30.67%	0.00%	19.59%	0.00%	36.34%	0.00%	54.10%	0.00%	64.52%	0.00%
	1.5	34.03%	54.34%	15.34%	11.73%	14.54%	6.28%	29.57%	10.63%	47.74%	13.86%	59.95%	12.87%
	2	23.73%	57.85%	11.41%	14.74%	12.02%	9.41%	25.96%	16.30%	45.00%	19.84%	58.60%	16.69%
	3	17.69%	59.90%	9.08%	16.53%	10.87%	10.83%	24.71%	18.26%	45.31%	19.15%	59.60%	13.87%
	5	16.75%	60.23%	8.78%	16.76%	11.03%	10.64%	25.94%	16.32%	48.40%	12.43%	63.70%	2.32%
	10	18.57%	59.61%	9.95%	15.86%	12.91%	8.31%	30.80%	8.69%	55.53%	3.12%	71.60%	19.95%

Tabla 4.31 Diferencia de los factores de amplificación y reducción para el caso bilineal con respecto al valor obtenido para el caso elastoplástico.

Region Espectral		AMORTIGUAMIENTO													
		$\beta=0\%$		$\beta=2\%$		$\beta=5\%$		$\beta=10\%$		$\beta=20\%$		$\beta=50\%$		$\beta=100\%$	
		Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)
Desplazamiento	Ductilidad (μ)														
	1	-0.10%	0.00%	2.74%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	-1.53%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%
	1.5	1.67%	1.76%	3.49%	0.78%	0.73%	0.73%	0.47%	0.47%	-1.15%	0.38%	0.18%	0.17%	-0.21%	-0.22%
	2	3.61%	3.71%	4.63%	1.94%	1.47%	1.46%	1.85%	1.84%	-0.35%	1.17%	-0.31%	-0.32%	-0.58%	-0.59%
	3	7.16%	7.25%	7.86%	5.26%	4.82%	4.82%	3.90%	3.90%	1.50%	2.99%	0.88%	0.87%	-1.86%	-1.87%
	5	13.11%	13.19%	13.90%	11.48%	9.59%	9.59%	7.89%	7.88%	3.89%	5.34%	-0.66%	-0.67%	-3.16%	-3.17%
Velocidad	10	20.87%	20.95%	23.14%	20.98%	21.42%	21.42%	14.77%	14.76%	5.03%	6.46%	-3.03%	-3.04%	-6.68%	-6.69%
	1	-0.18%	0.00%	2.02%	0.00%	-0.05%	0.00%	-0.02%	0.00%	-2.13%	0.00%	0.01%	0.00%	0.03%	0.00%
	1.5	6.24%	6.41%	4.48%	2.52%	1.56%	1.61%	0.88%	0.90%	-1.48%	0.63%	0.38%	0.37%	0.34%	0.31%
	2	8.92%	9.08%	7.77%	5.87%	3.82%	3.87%	2.71%	2.73%	0.06%	2.14%	1.39%	1.38%	0.51%	0.48%
	3	12.07%	12.23%	11.53%	9.71%	8.40%	8.44%	6.98%	7.00%	4.29%	6.28%	4.75%	4.75%	3.75%	3.72%
Aceleracion	5	15.47%	15.62%	15.69%	13.95%	13.62%	13.66%	12.51%	12.53%	10.27%	12.14%	10.87%	10.86%	9.43%	9.40%
	10	20.36%	20.50%	21.81%	20.20%	20.60%	20.64%	20.72%	20.73%	18.74%	20.44%	17.94%	17.94%	14.27%	14.24%
	1	-0.03%	0.00%	2.42%	0.00%	0.04%	0.00%	0.04%	0.00%	-1.99%	0.00%	0.03%	0.00%	0.02%	0.00%
	1.5	9.39%	9.42%	4.33%	1.96%	1.20%	1.16%	0.78%	0.74%	-1.44%	0.54%	0.59%	0.56%	0.47%	0.45%
	2	11.82%	11.84%	6.27%	3.95%	2.96%	2.92%	2.09%	2.05%	-0.34%	1.62%	1.55%	1.52%	1.71%	1.69%
Aceleracion	3	14.16%	14.18%	9.66%	7.42%	5.76%	5.73%	4.46%	4.42%	1.55%	3.47%	2.96%	2.93%	3.22%	3.19%
	5	15.14%	15.17%	13.04%	10.89%	9.83%	9.79%	8.58%	8.54%	5.18%	7.03%	7.30%	7.27%	8.15%	8.12%
	10	17.97%	17.99%	17.83%	15.79%	16.12%	16.08%	15.21%	15.18%	15.59%	17.24%	18.78%	18.75%	17.95%	17.93%

Tabla 4.32 Diferencia de los factores de amplificación y reducción para el caso con degradación de rigidez con respecto al valor obtenido para el caso elastoplástico.

Region Espectral	Ductilidad (μ)	AMORTIGUAMIENTO											
		$\beta=0\%$		$\beta=2\%$		$\beta=5\%$		$\beta=10\%$		$\beta=20\%$		$\beta=50\%$	
		Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)	Coef de Amplif. (ψ_u)	Coef. de Reducción (ϕ_u)
Desplazamiento	1	-0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	-1.54%	0.00%	0.00%	0.00%
	1.5	6.42%	6.50%	3.35%	3.35%	2.53%	2.53%	2.91%	2.91%	0.49%	2.00%	0.97%	0.76%
	2	9.80%	9.88%	8.20%	8.20%	6.48%	6.48%	6.40%	6.39%	3.38%	4.84%	2.41%	0.38%
	3	16.72%	16.79%	15.30%	15.30%	13.34%	13.34%	11.81%	11.81%	7.47%	8.87%	3.43%	-3.56%
	5	20.96%	21.03%	20.22%	20.22%	19.42%	19.42%	17.87%	17.87%	12.34%	13.66%	1.29%	-4.74%
	10	27.40%	27.46%	27.53%	27.53%	26.02%	26.02%	19.56%	19.56%	8.88%	10.26%	-1.20%	-6.66%
Velocidad	1	-0.10%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	-2.11%	0.00%	0.00%	0.00%
	1.5	13.40%	13.49%	7.61%	7.61%	4.86%	4.86%	3.21%	3.21%	-0.21%	1.86%	1.44%	1.46%
	2	13.52%	13.61%	10.40%	10.40%	8.45%	8.45%	6.62%	6.62%	3.24%	5.24%	4.41%	3.27%
	3	11.50%	11.59%	10.34%	10.34%	10.13%	10.13%	9.30%	9.30%	7.78%	9.68%	10.17%	9.13%
	5	10.33%	10.42%	10.25%	10.25%	10.42%	10.42%	10.97%	10.97%	11.19%	13.03%	14.44%	13.14%
	10	8.88%	8.98%	10.56%	10.56%	12.64%	12.64%	15.22%	15.22%	16.01%	17.74%	16.96%	14.46%
Aceleración	1	-0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	-2.04%	0.00%	0.00%	0.00%
	1.5	25.38%	25.41%	6.74%	6.74%	2.44%	2.44%	0.80%	0.80%	-2.06%	-0.02%	-0.20%	-0.30%
	2	18.52%	18.56%	7.37%	7.37%	3.64%	3.64%	1.36%	1.36%	-1.80%	0.23%	0.22%	1.60%
	3	11.50%	11.53%	4.95%	4.95%	2.01%	2.01%	1.06%	1.06%	-1.07%	0.95%	1.96%	4.40%
	5	3.65%	3.69%	1.83%	1.83%	1.12%	1.12%	1.72%	1.72%	1.00%	2.99%	7.04%	8.67%
	10	0.84%	0.88%	1.53%	1.53%	2.33%	2.33%	4.32%	4.32%	8.33%	10.17%	16.03%	16.86%

Tabla 4.33 Comparación de los factores de reducción con respecto a reglas clásicas e investigaciones anteriores.

		Coeficientes de Reducción (ϕ_μ)					Diferencias resp a valores estadísticos					
	Region Espectral	Ductilidad (μ)	Valores estadísticos	Fórmulas propuestas	Valores Riddell - Garces	Fórmulas Riddell - Garces	Reglas clásicas	Fórmulas propuestas	Valores Riddell - Garces	Fórmulas Riddell - Garces	Reglas clásicas	
Desplazamiento		1.5	0.6115	0.5976	0.6080	0.6454	0.6667	-2.27%	-0.57%	5.55%	9.03%	
		2	0.4364	0.4430	0.4340	0.4730	0.5000	1.52%	-0.56%	8.39%	14.57%	
		3	0.2875	0.2906	0.2860	0.3053	0.3333	1.07%	-0.54%	6.17%	15.92%	
		5	0.1737	0.1708	0.1730	0.1758	0.2000	-1.62%	-0.38%	1.26%	15.17%	
		10	0.0878	0.0831	0.0850	0.0832	0.1000	-5.38%	-3.20%	-5.27%	13.89%	
Velocidad												
		1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
		1.5	0.6267	0.6178	0.6240	0.6266	0.6667	-1.42%	-0.43%	-0.02%	6.38%	
		2	0.4700	0.4671	0.4680	0.4746	0.5000	-0.63%	-0.43%	0.97%	6.38%	
		3	0.3246	0.3288	0.3220	0.3335	0.3333	1.28%	-0.82%	2.73%	2.68%	
		5	0.2164	0.2198	0.2160	0.2217	0.2000	1.54%	-0.20%	2.45%	-7.59%	
		10	0.1328	0.1318	0.1320	0.1317	0.1000	-0.78%	-0.63%	-0.85%	-24.72%	
	Aceleracion		1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
			1.5	0.6952	0.6920	0.6990	0.6858	0.7071	-0.45%	0.55%	-1.34%	1.72%
		2	0.5856	0.5877	0.5890	0.5772	0.5774	0.36%	0.57%	-1.44%	-1.42%	
		3	0.4819	0.4883	0.4860	0.4738	0.4472	1.32%	0.84%	-1.68%	-7.21%	
		5	0.3973	0.4003	0.4000	0.3830	0.3333	0.76%	0.68%	-3.60%	-16.10%	
	10	0.3162	0.3143	0.3190	0.2954	0.2294	-0.58%	0.89%	-6.57%	-27.44%		

Tabla 4.34 Comparación de los factores de reducción por amortiguamiento (B) propuestos por otros estudios.

ξ	Newmark y Hall (1982)			Ashour (1987)	Wu y Hanson (1989)				Lin y Chang (2003)				Ramírez et al. (2000)		Riddell y Antequera (2010)			
	Region Acel.	Región Veloc.	Región Despl.		T=0.1s	T=0.5s	Región Veloc.	T=3s	T=10s	T=0.1s	T=0.5s	T=2s	T=3s	$1/B_s^*$	$1/B_1^+$	Region Acel.	Región Veloc.	Región Despl.
0.05	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.10	0.77	0.83	0.86	0.84	0.87	0.82	0.81	0.81	0.89	0.86	0.81	0.82	0.83	0.83	0.83	0.77	0.77	0.81
0.20	0.55	0.66	0.73	0.64	0.74	0.64	0.62	0.63	0.77	0.72	0.62	0.64	0.66	0.67	0.67	0.58	0.53	0.61
0.30	--	--	--	0.53	0.66	0.54	0.51	0.52	0.70	0.63	0.51	0.53	0.56	0.59	0.59	0.54	0.46	0.57
0.40	--	--	--	0.46	0.61	0.46	0.43	0.44	0.66	0.57	0.44	0.46	0.49	0.53	0.53	0.50	0.40	0.54
0.50	--	--	--	0.41	0.57	0.41	0.37	0.38	0.62	0.53	0.38	0.40	0.43	0.45	0.45	0.46	0.33	0.50
0.60	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.43	0.38	0.41	0.28	0.46
0.70	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.43	0.34	0.38	0.25	0.42
0.80	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.42	0.30	0.36	0.22	0.39
0.90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.41	0.27	0.34	0.20	0.37
1.00	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.40	0.25	0.32	0.18	0.35

* Válido para $T=0.2T_s$. Para $0.2T_s < T < T_s$, B se determina usando interpolación lineal entre los valores B_s y B_1 . Para $T < 0.2T_s$,

B se determina usando interpolación lineal entre los valores 1.0 ($T=0$) y B_s .

† Para $T \geq T_s$, T_s es la intersección entre las regiones de aceleración y de velocidad del espectro de respuesta.

Tabla 4.35 Comparación de los factores de reducción por amortiguamiento (B) usados en códigos.

ξ	Riddell y Antequera (2010)			FEMA-273		FEMA-368
	Region Acel.	Región Veloc.	Región Despl.	$1/B_s$	$1/B_1$	$1/B$
0.02	1.29	1.22	1.19	1.25	1.25	1.25
0.05	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.10	0.77	0.77	0.81	0.77	0.83	0.83
0.20	0.58	0.53	0.61	0.56	0.67	0.67
0.30	0.54	0.46	0.57	0.43	0.59	0.56
0.40	0.50	0.40	0.54	0.37	0.53	0.48
0.50	0.46	0.33	0.50	0.33	0.50	0.42
0.60	0.41	0.28	0.46	0.33	0.50	0.37
0.70	0.38	0.25	0.42	0.33	0.50	0.33
0.80	0.36	0.22	0.39	0.33	0.50	0.30
0.90	0.34	0.20	0.37	0.33	0.50	0.28
1.00	0.32	0.18	0.35	0.33	0.50	0.25

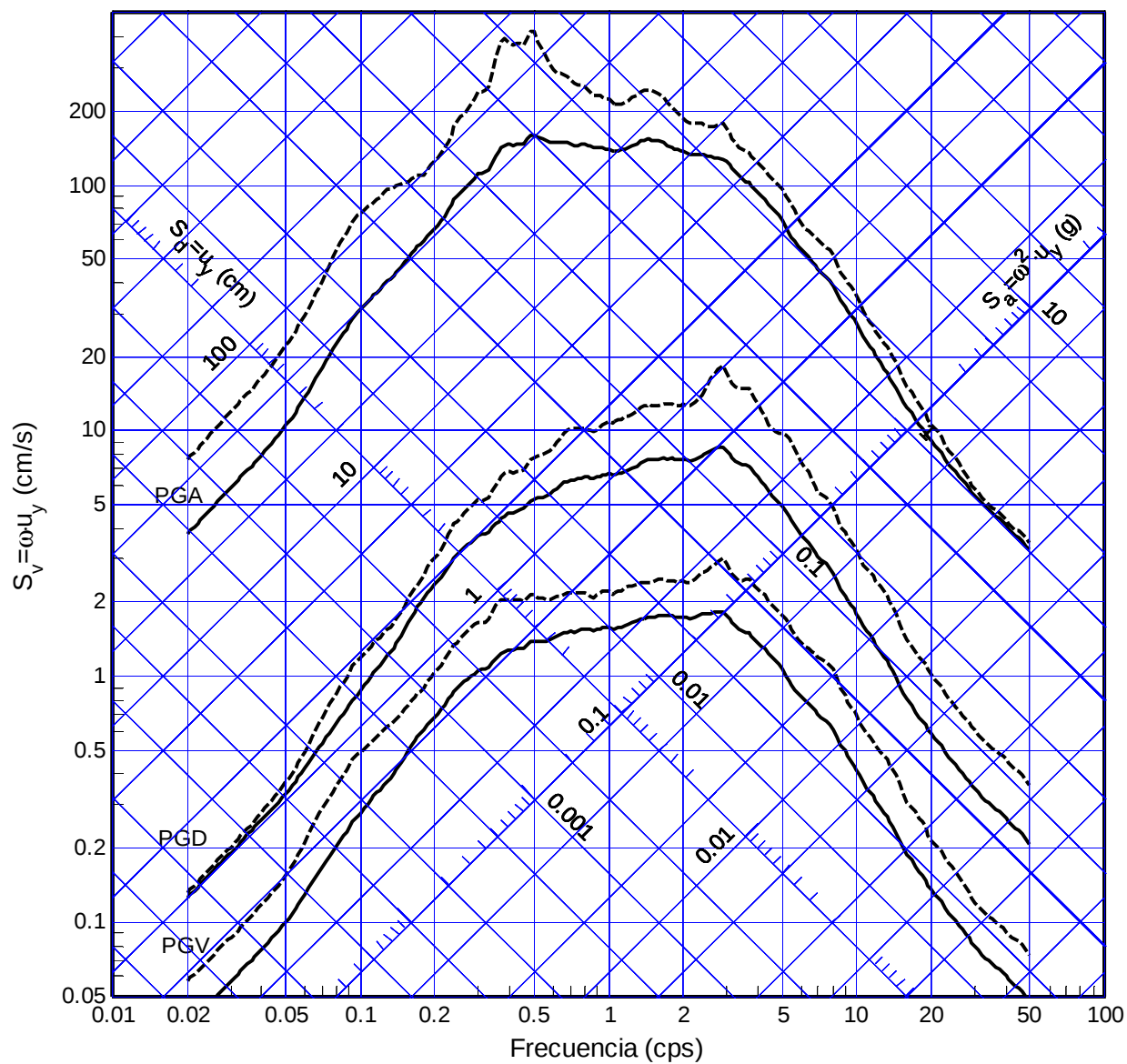


Figura 4.1 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=5\%$.

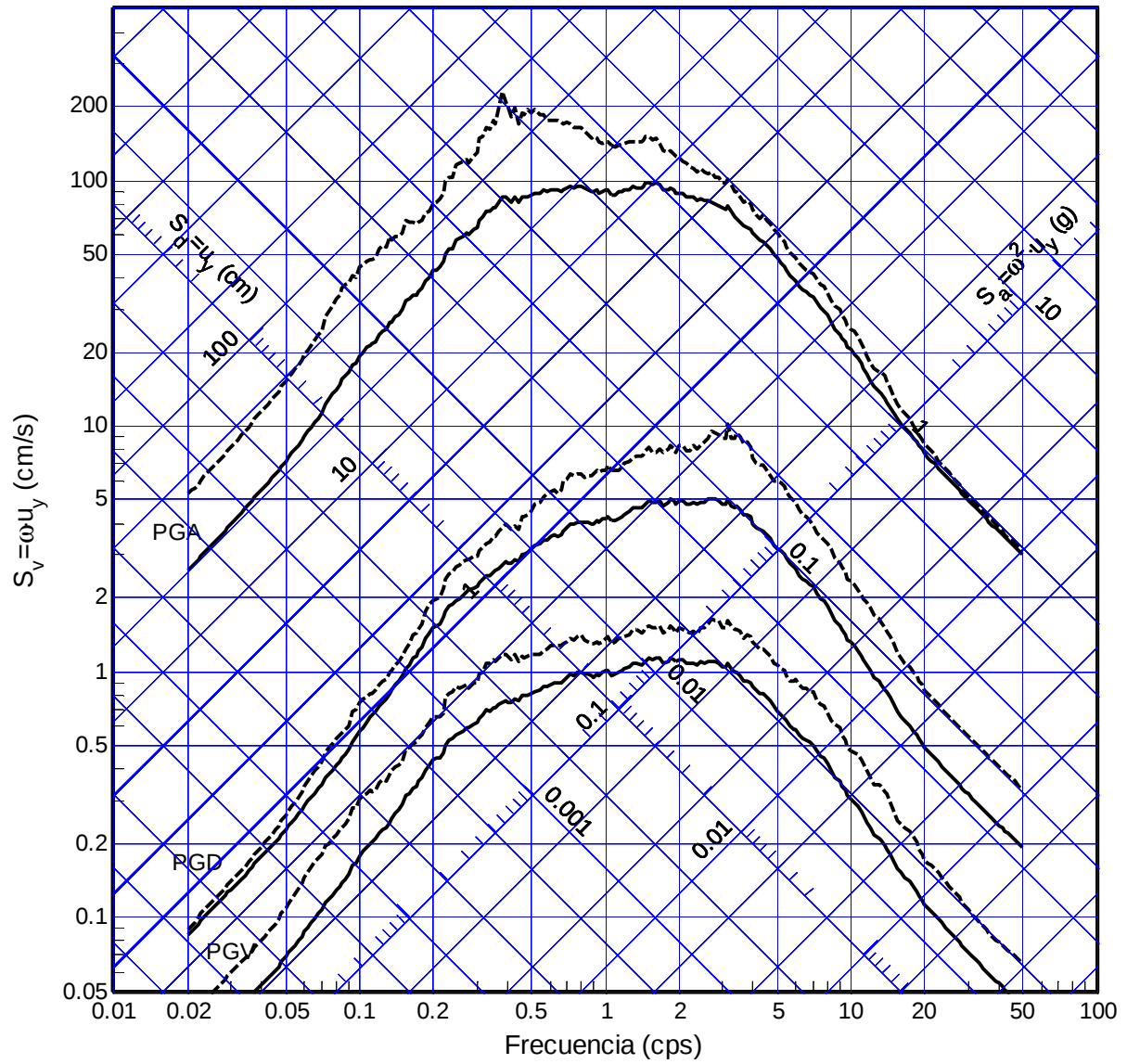


Figura 4.2 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=1,5$; amortiguamiento $\xi=5\%$.

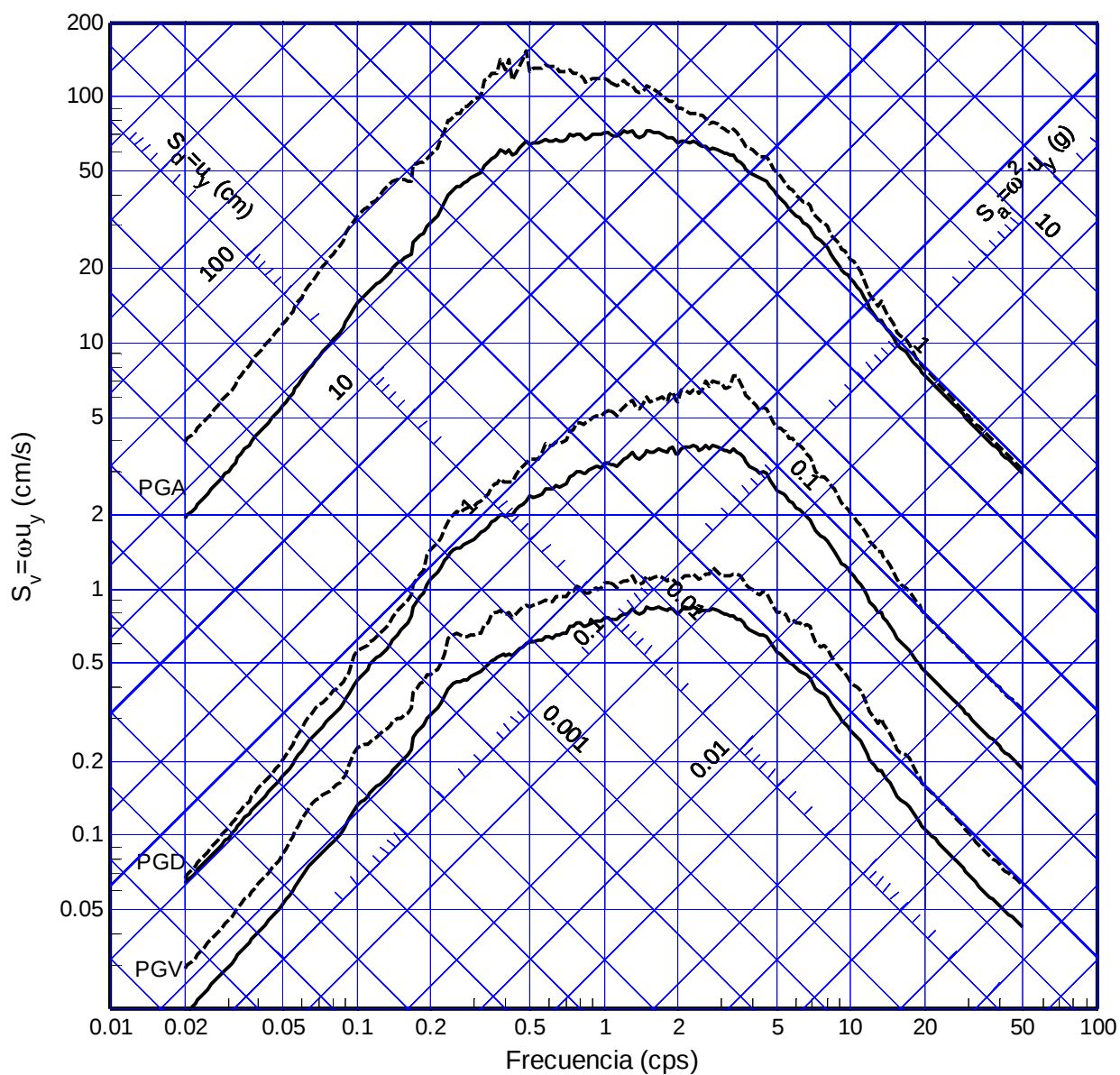


Figura 4.3 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=5\%$.

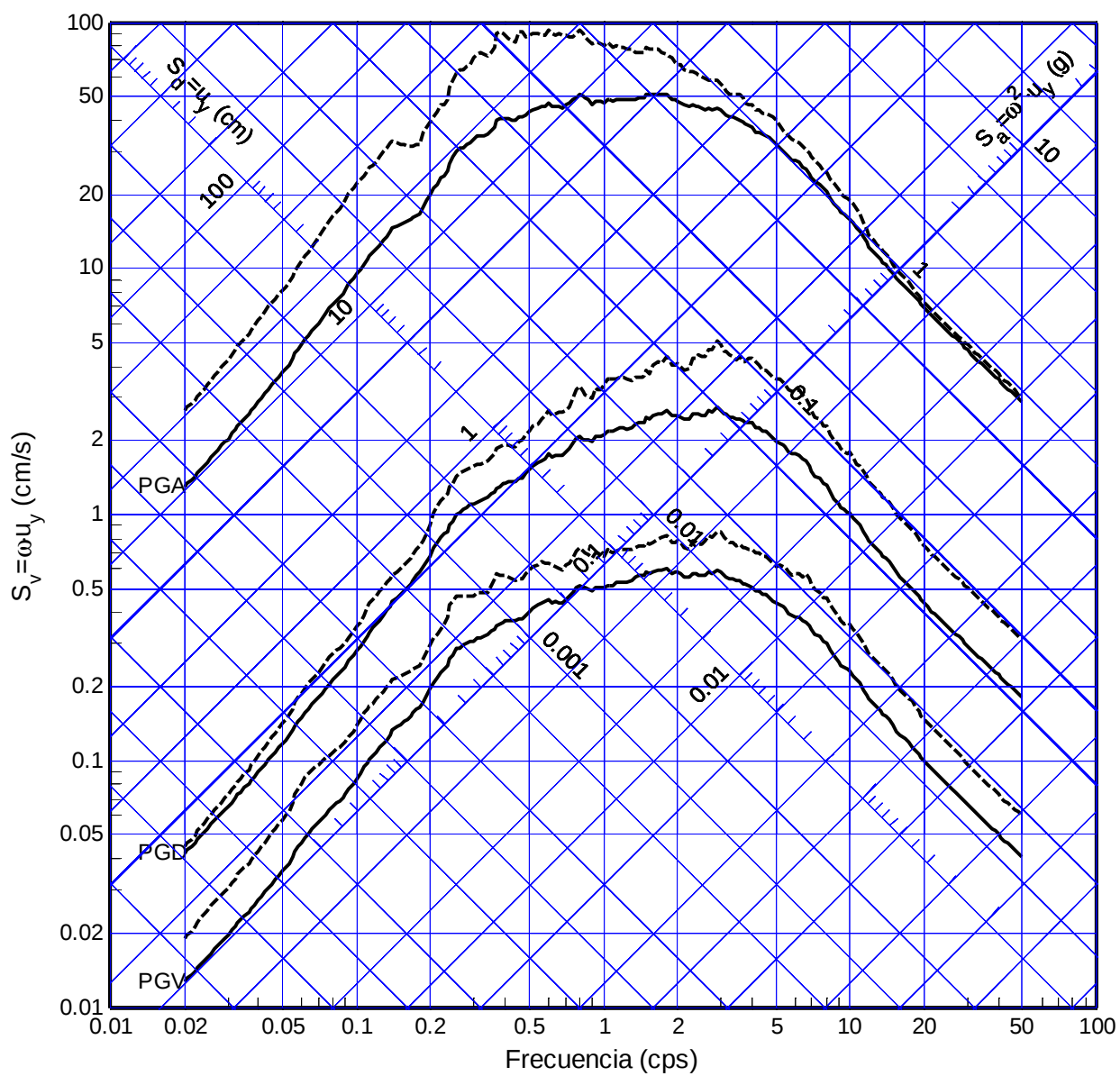


Figura 4.4 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$.

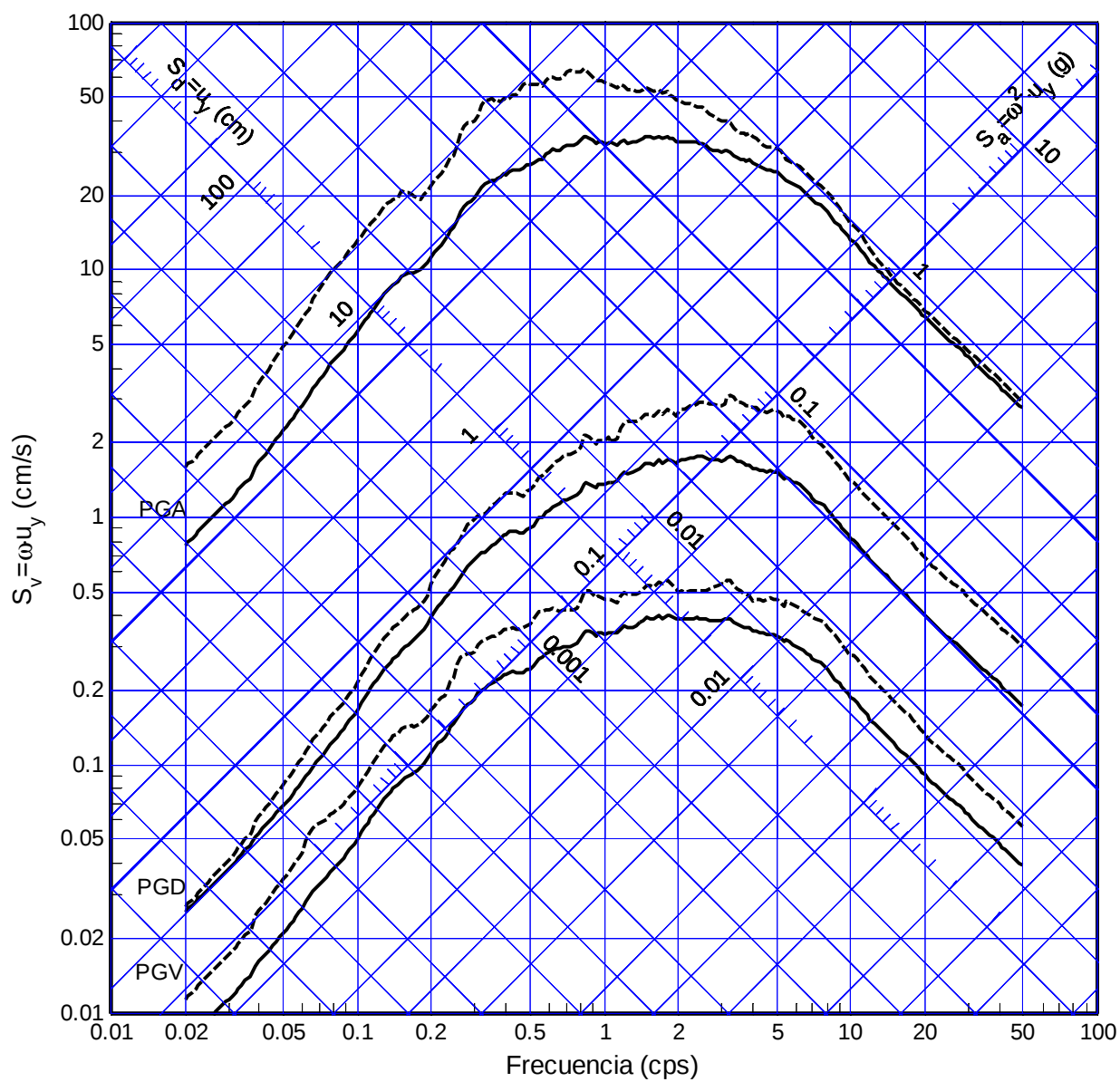


Figura 4.5 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=5\%$.

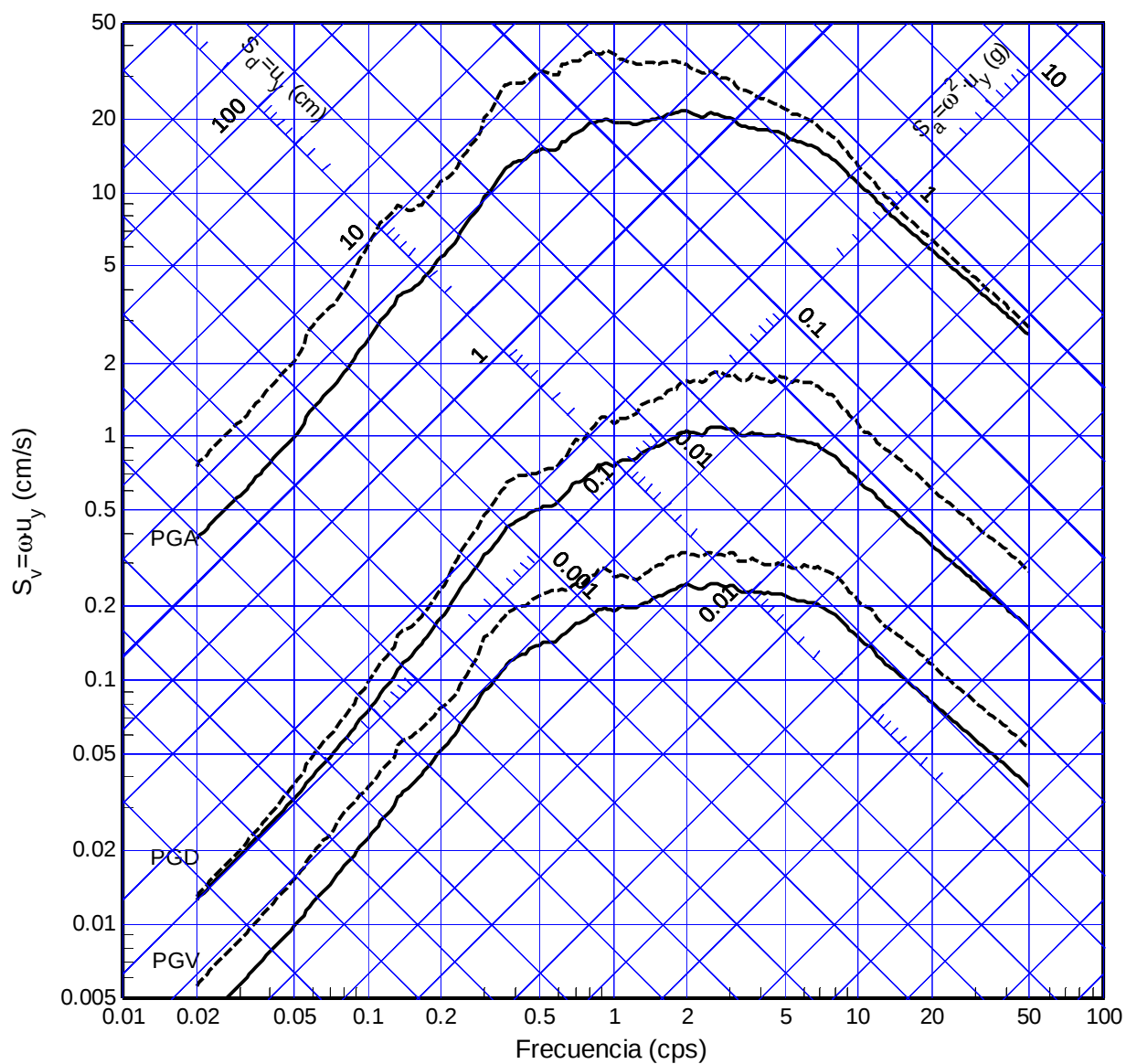


Figura 4.6 Espectro promedio y promedio + 1 desviación estándar, sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=5\%$.

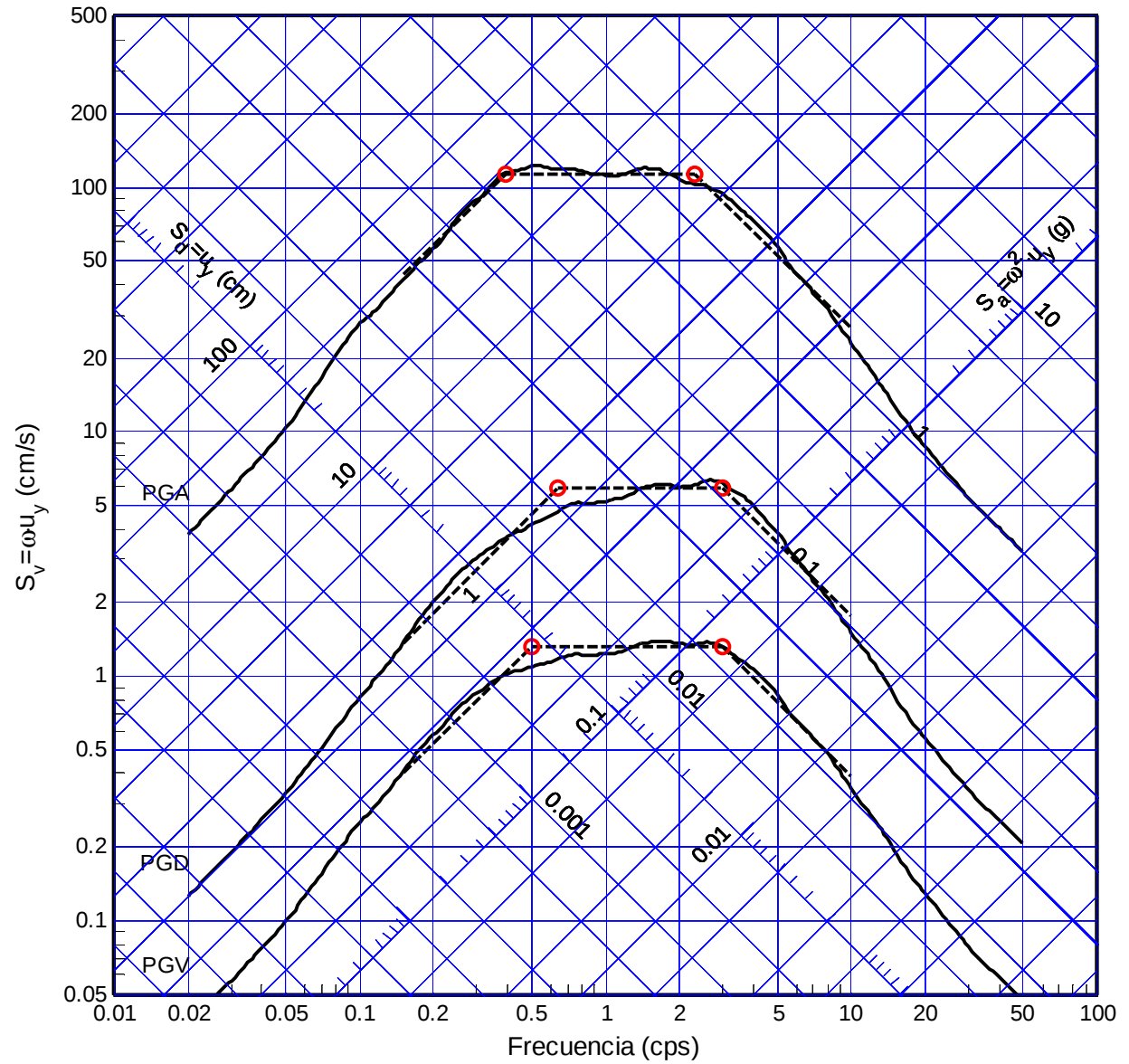


Figura 4.8 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=10\%$.

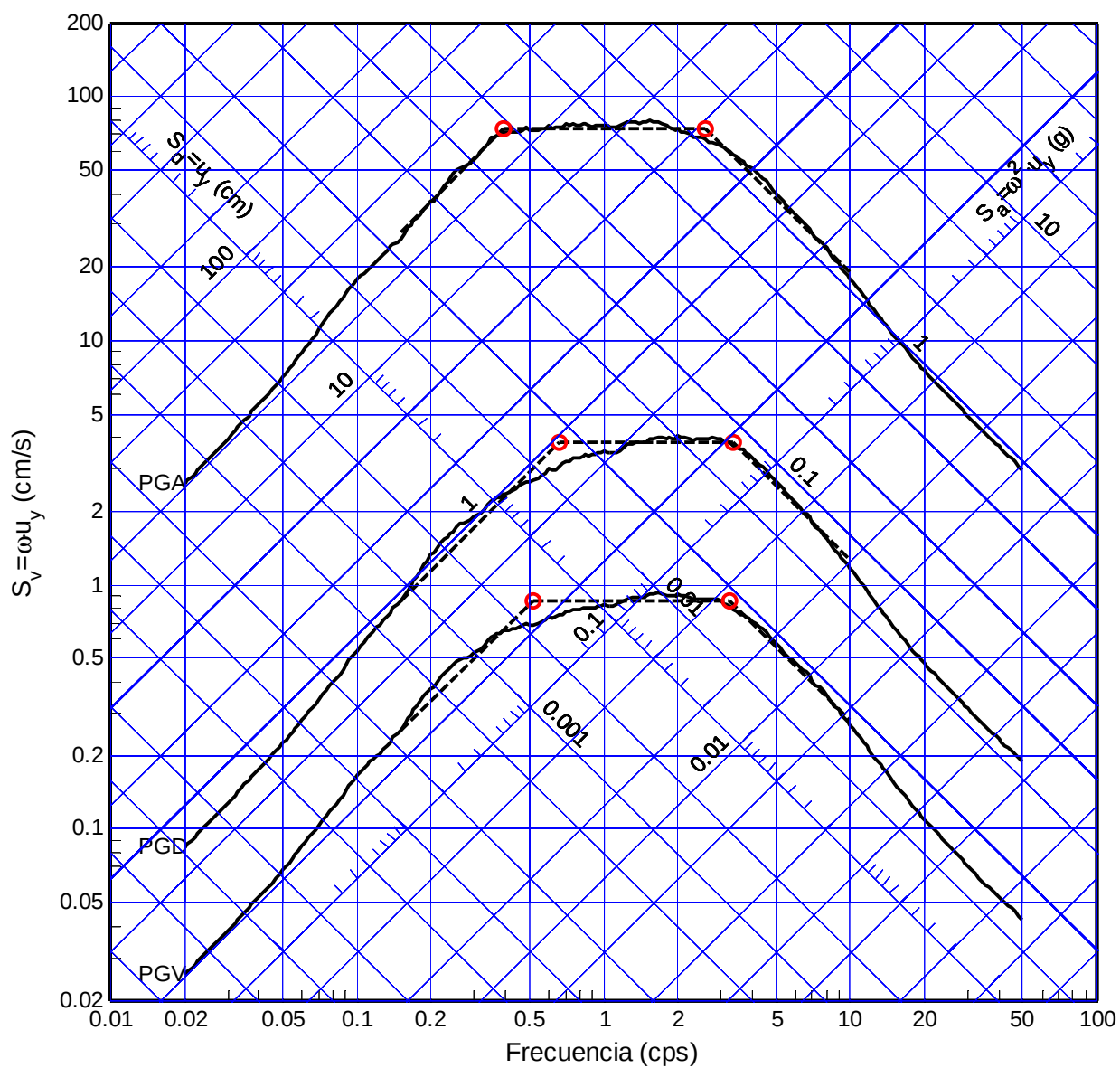


Figura 4.9 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=1,5$; amortiguamiento $\xi=10\%$.

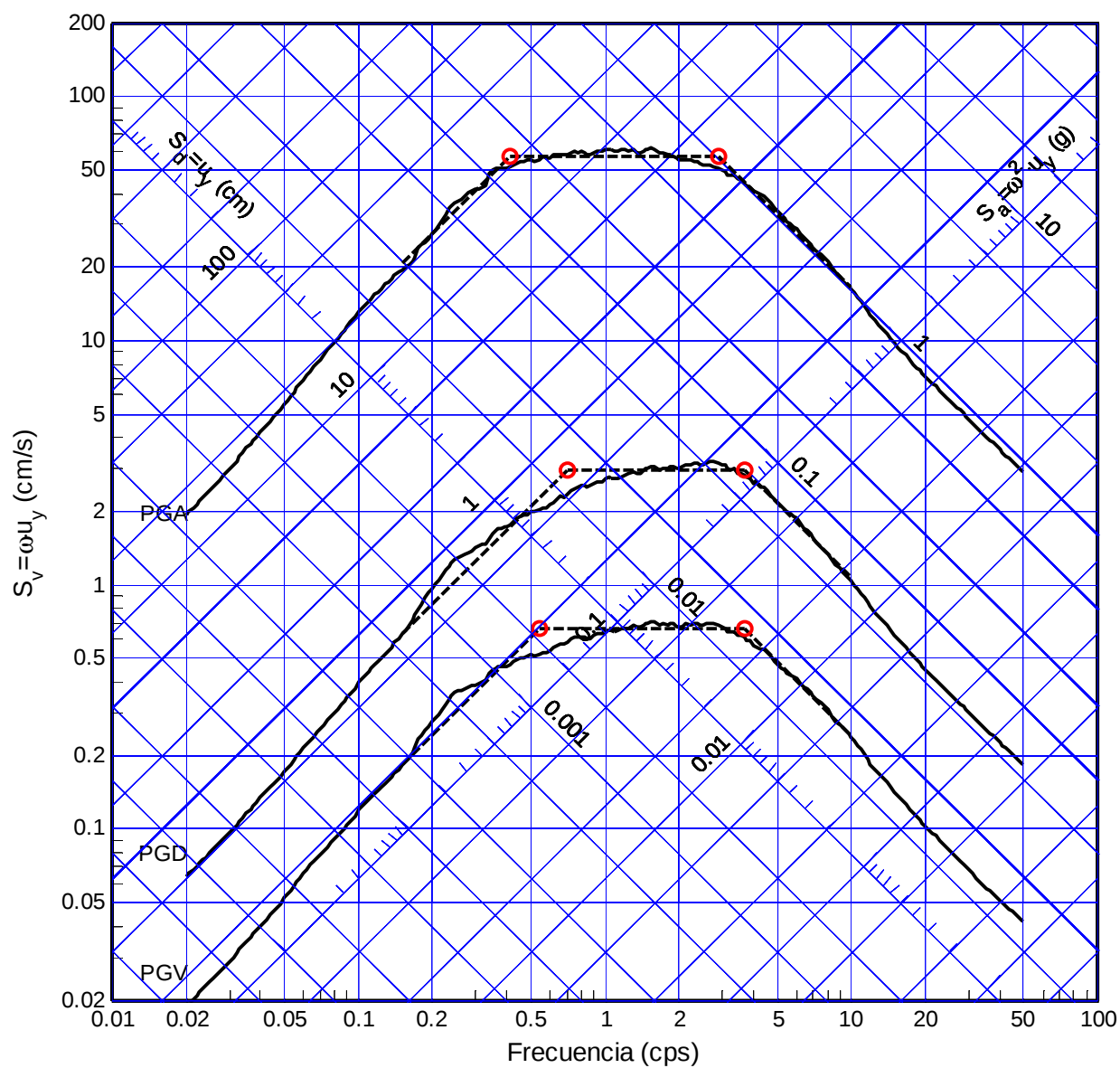


Figura 4.10 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=10\%$.

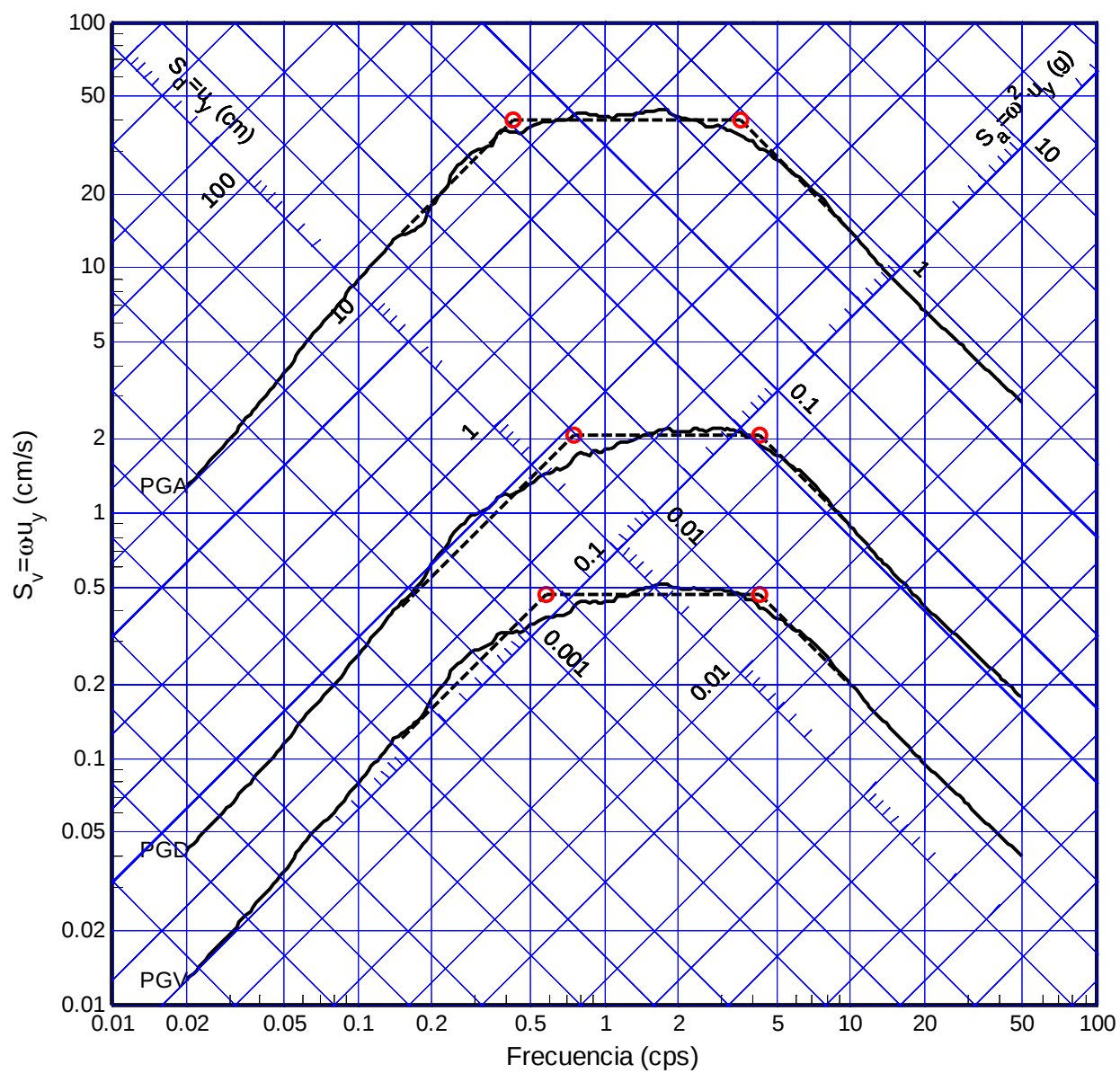


Figura 4.11 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=10\%$.

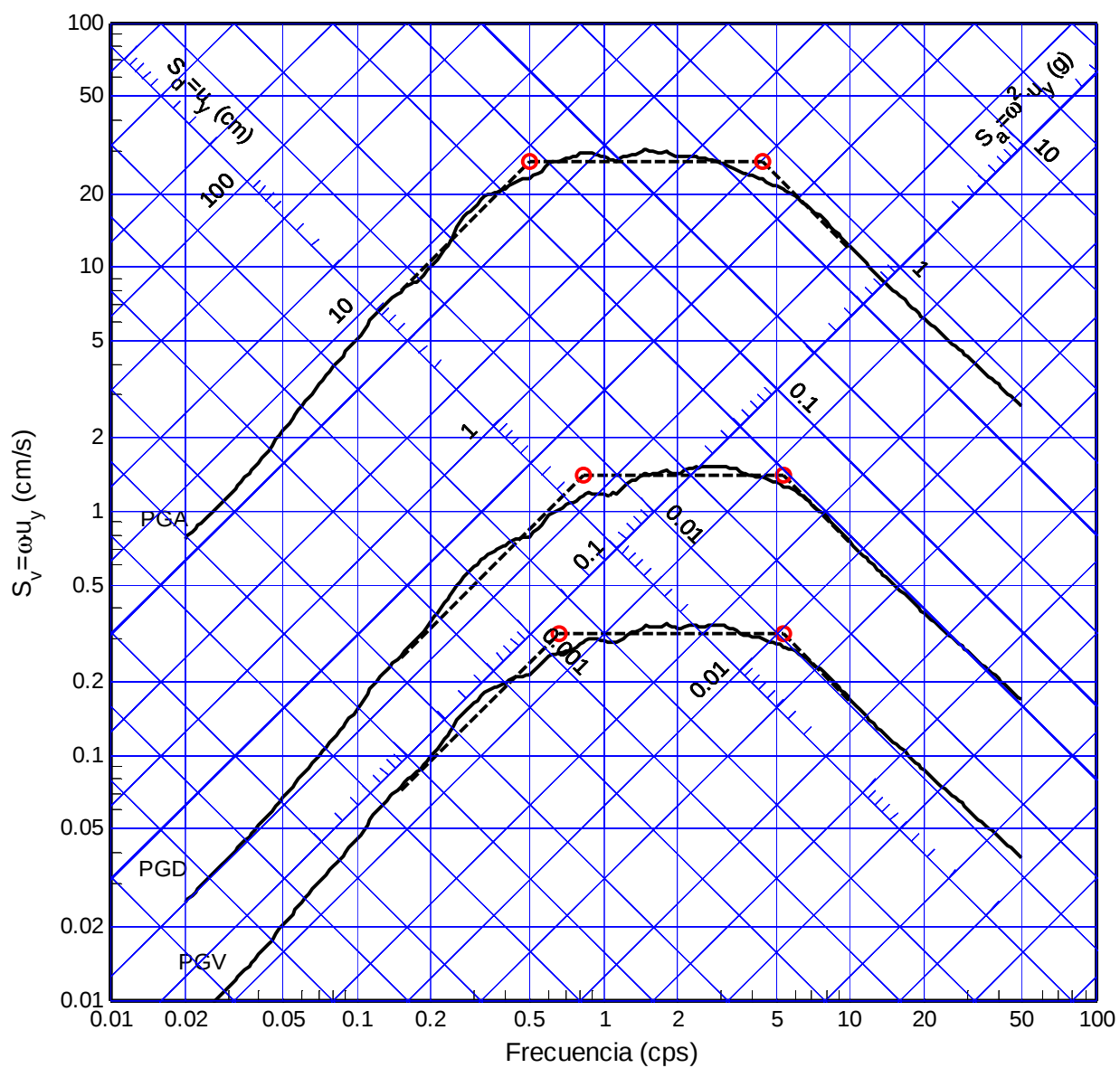


Figura 4.12 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=10\%$.

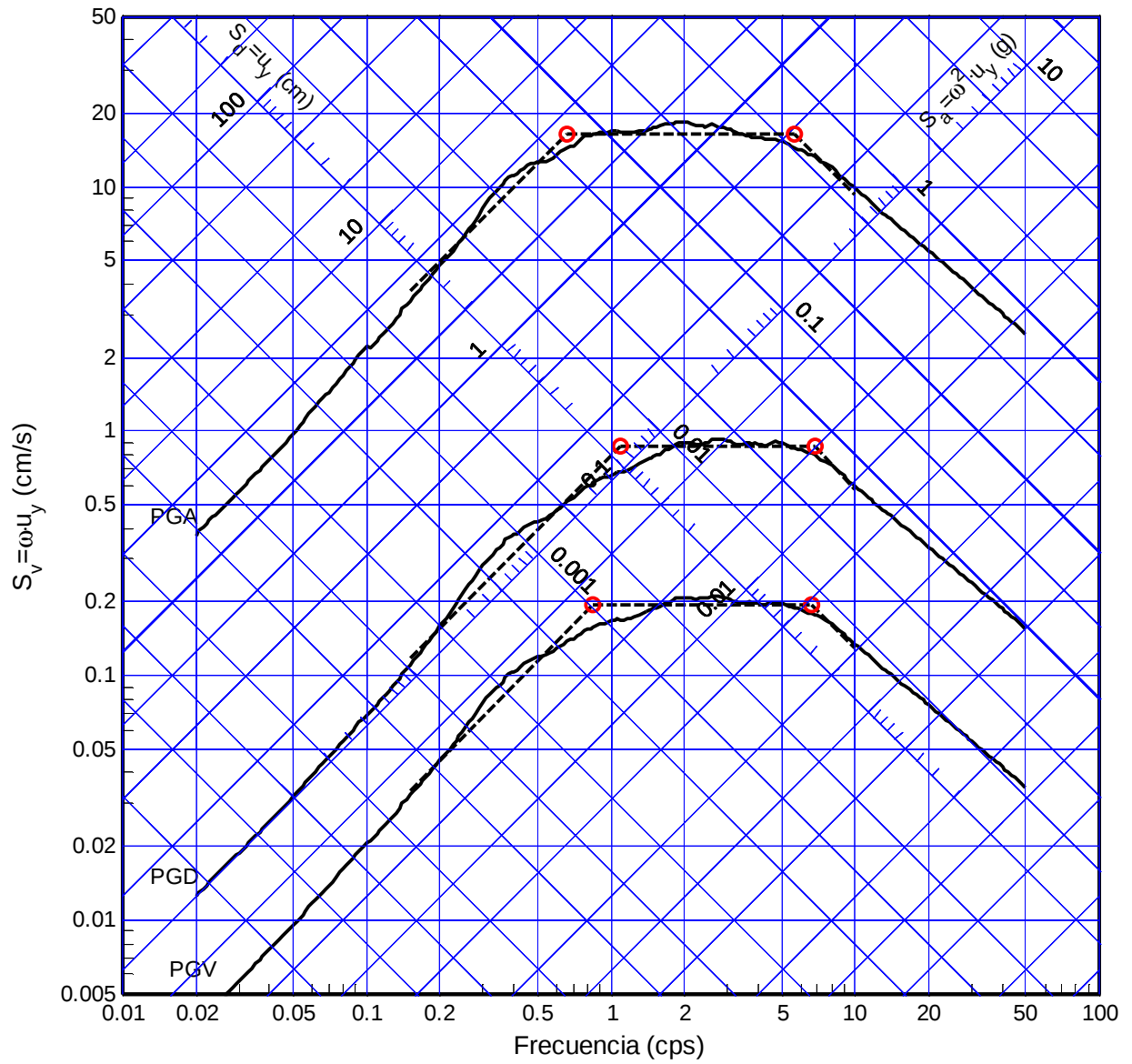


Figura 4.13 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico, ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=10\%$.

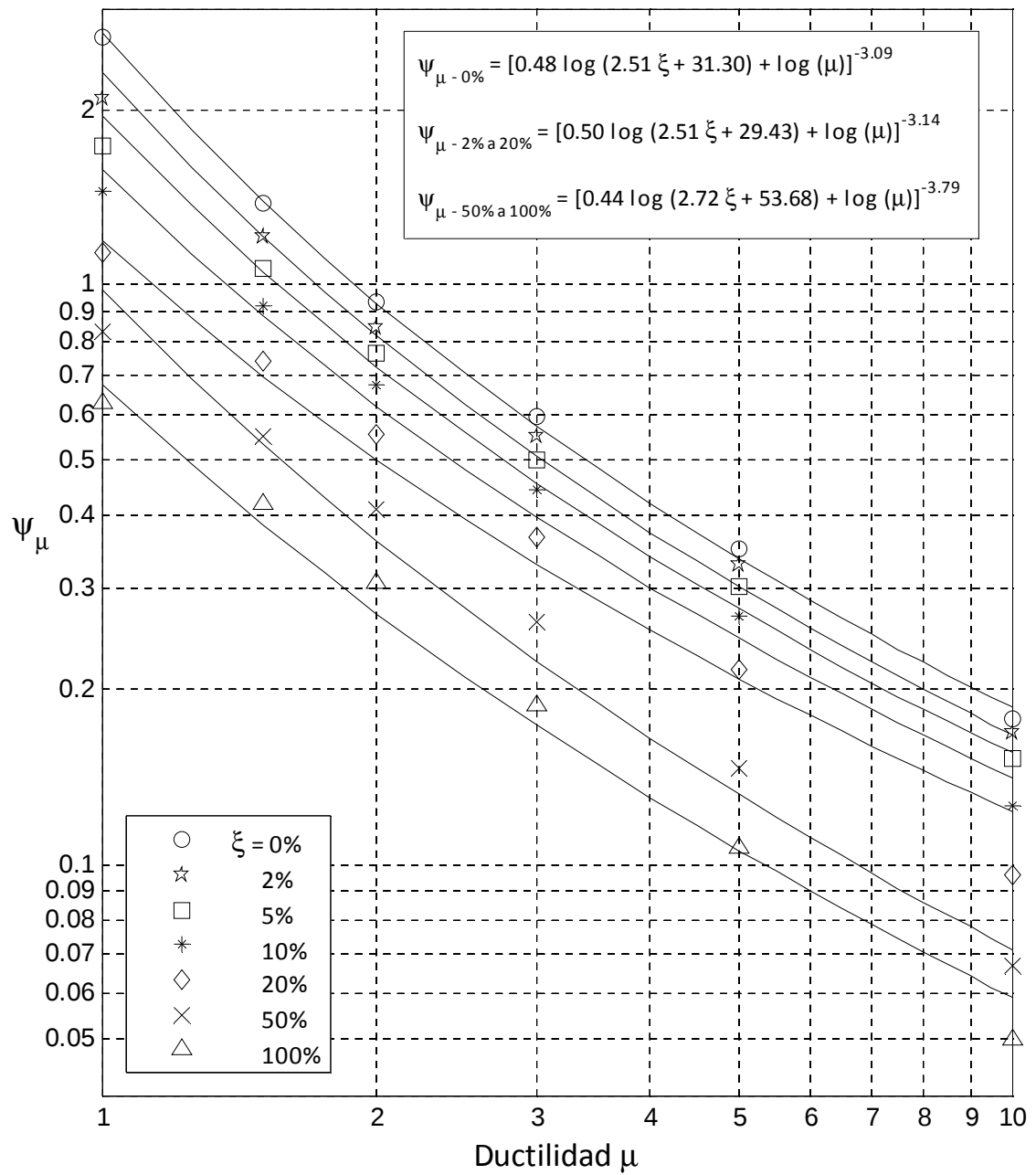


Figura 4.14 Factores de amplificación para región espectral de desplazamiento, caso elastoplástico. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.

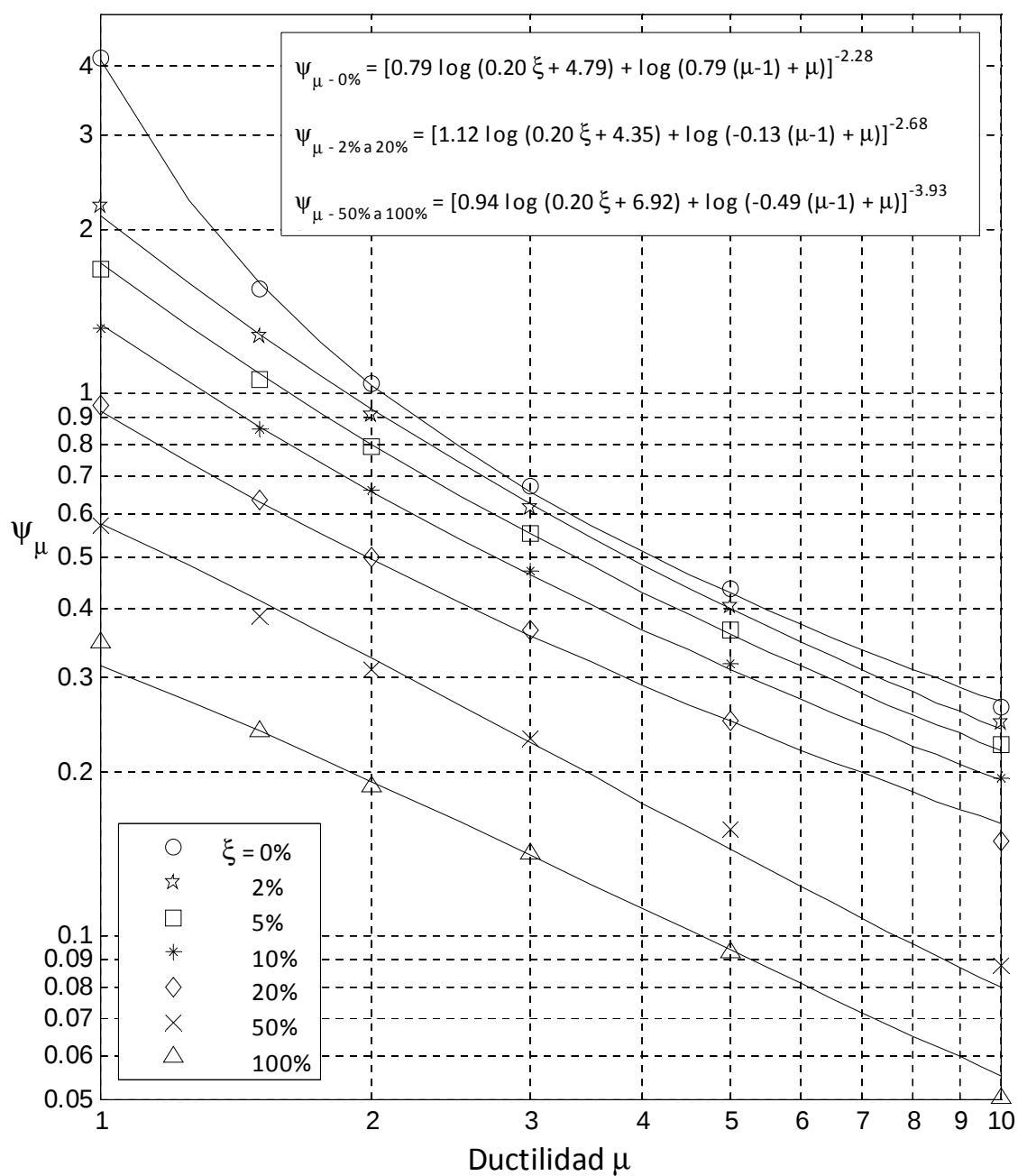


Figura 4.15 Factores de amplificación para región espectral de velocidad, caso elastoplástico. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.

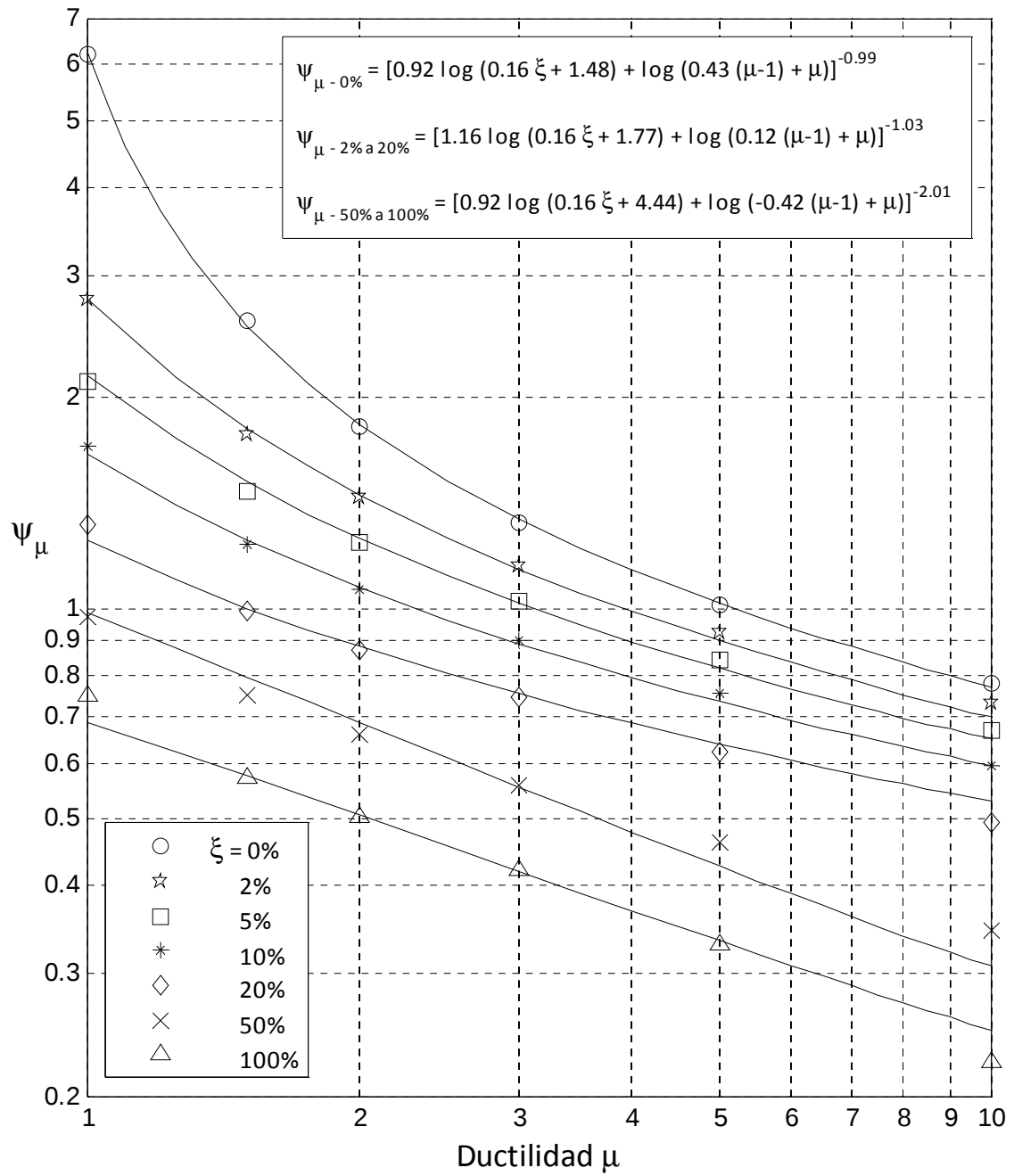


Figura 4.16 Factores de amplificación para región espectral de aceleración, caso elastoplástico. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.

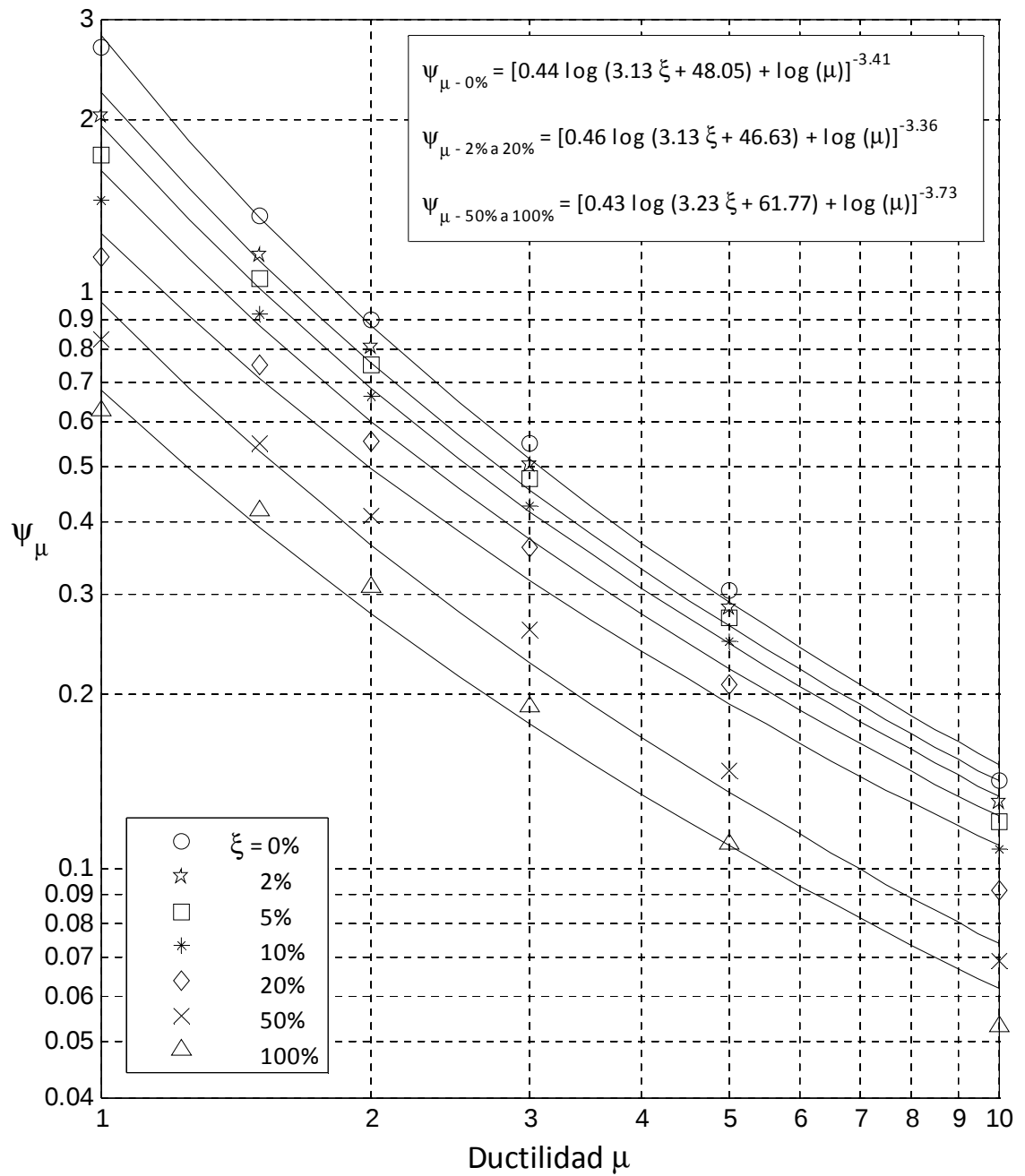


Figura 4.17 Factores de amplificación para región espectral de desplazamiento, caso bilineal. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.

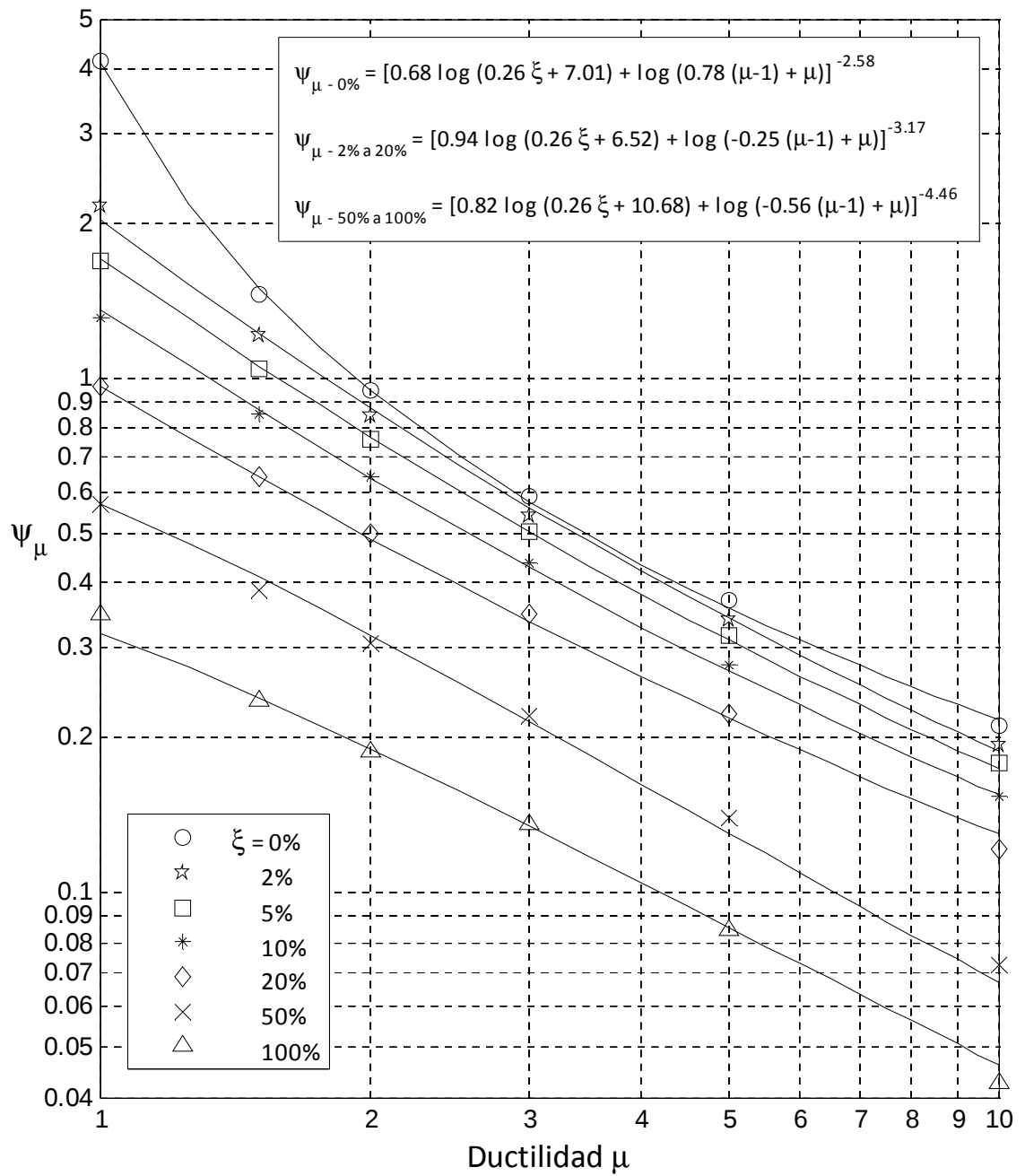


Figura 4.18 Factores de amplificación para región espectral de velocidad, caso bilineal. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.

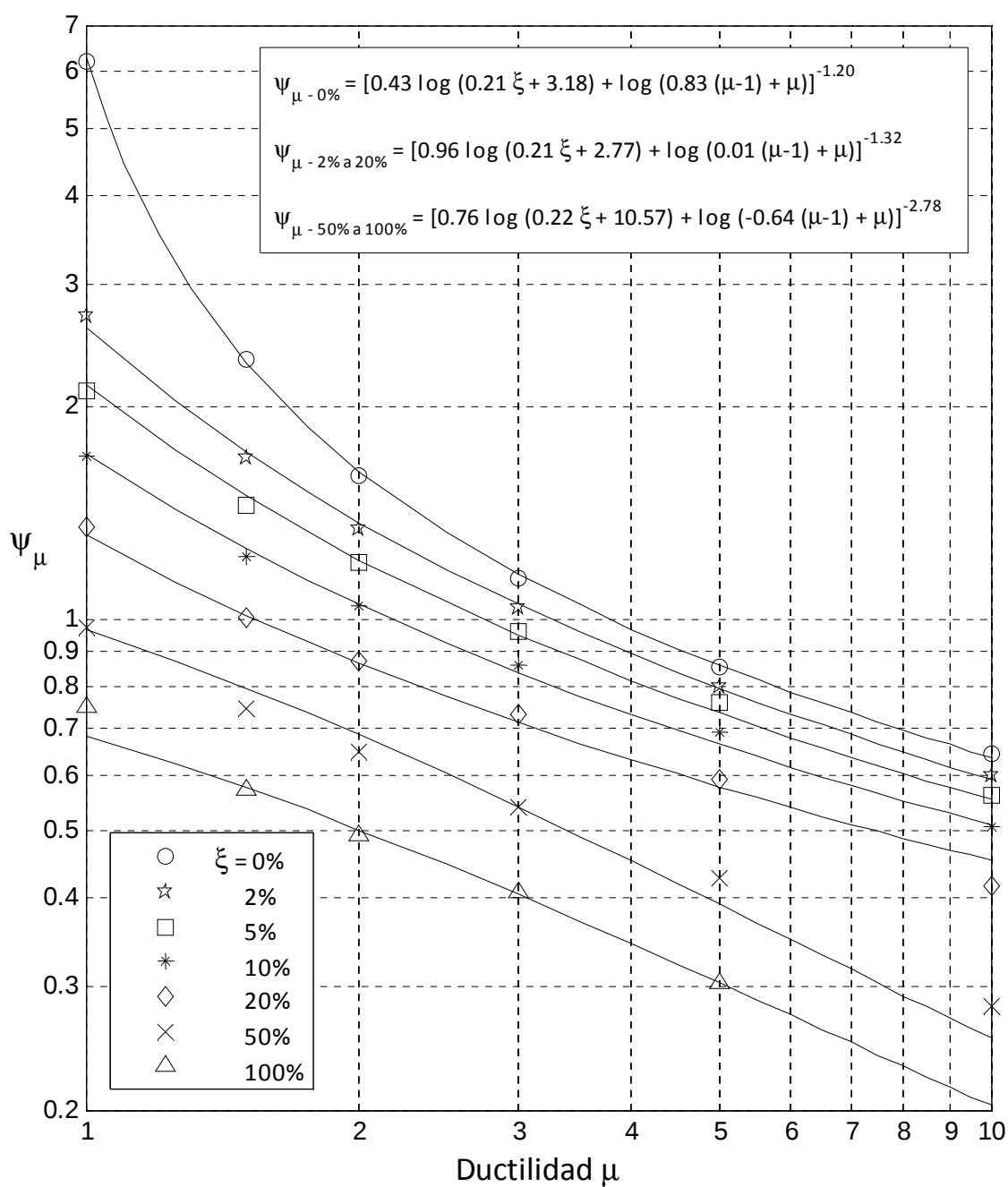


Figura 4.19 Factores de amplificación para región espectral de aceleración, caso bilineal. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.

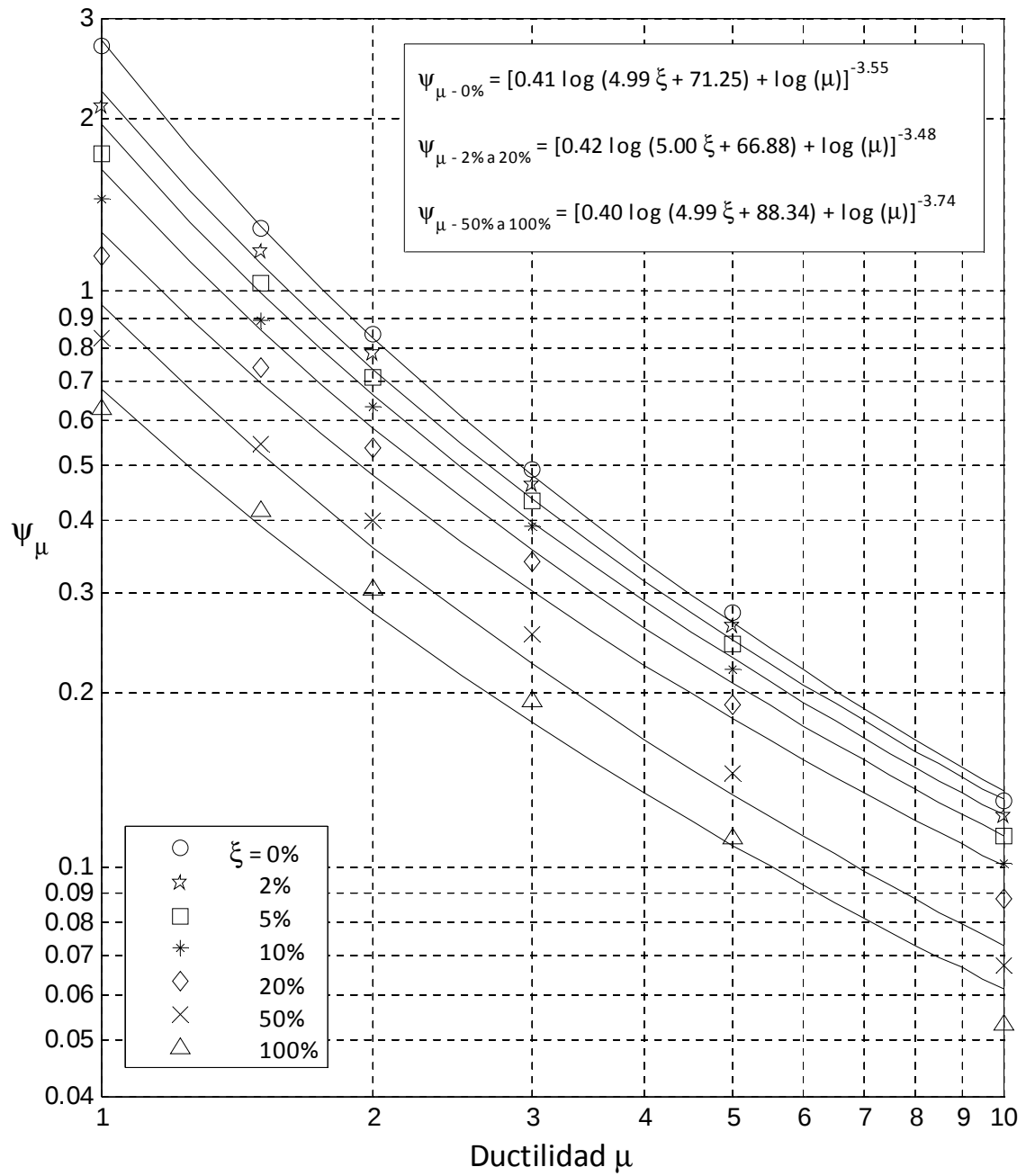


Figura 4.20 Factores de amplificación para región espectral de desplazamiento, caso degradación de rigidez. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.

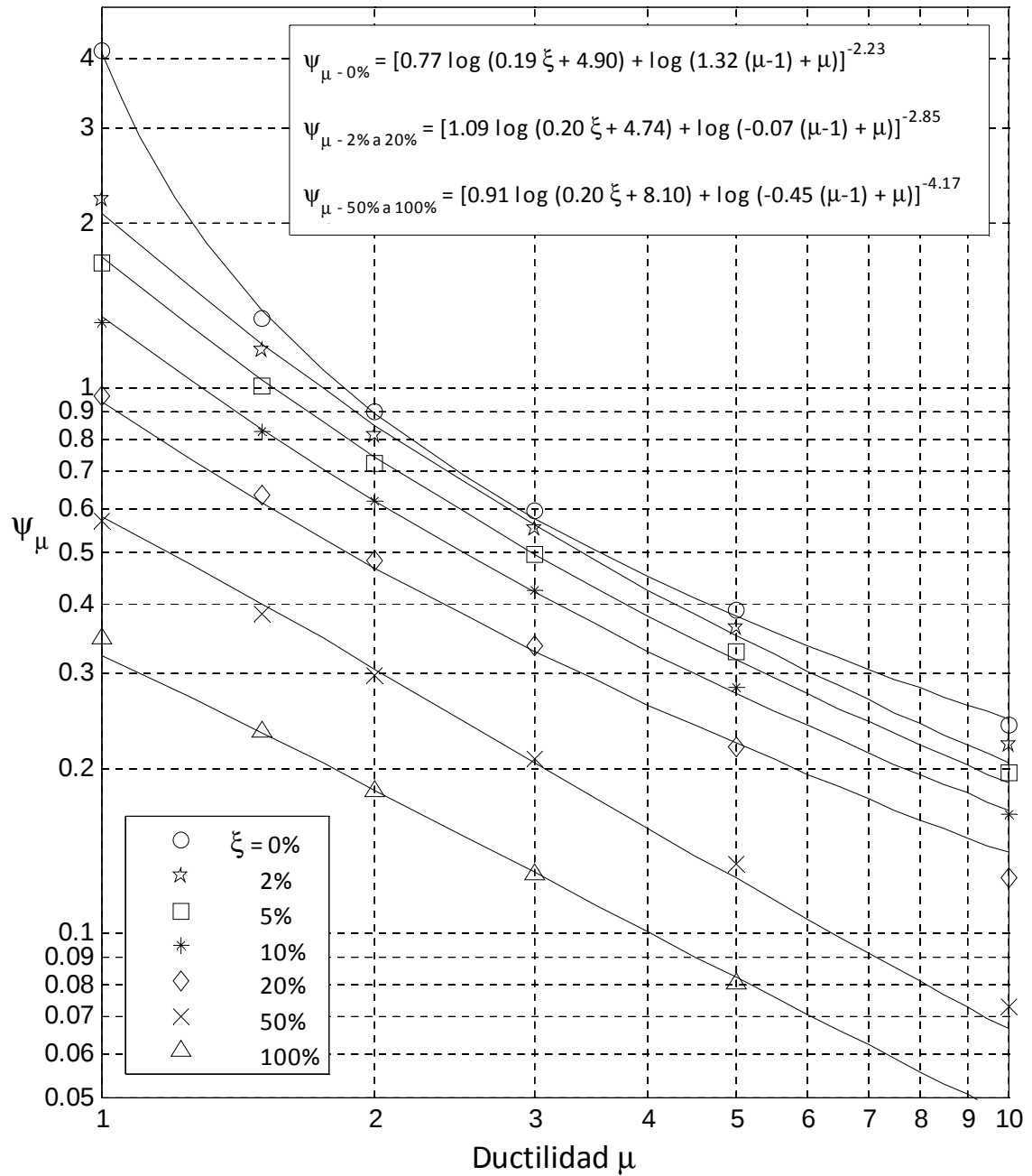


Figura 4.21 Factores de amplificación para región espectral de velocidad, caso degradación de rigidez. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.

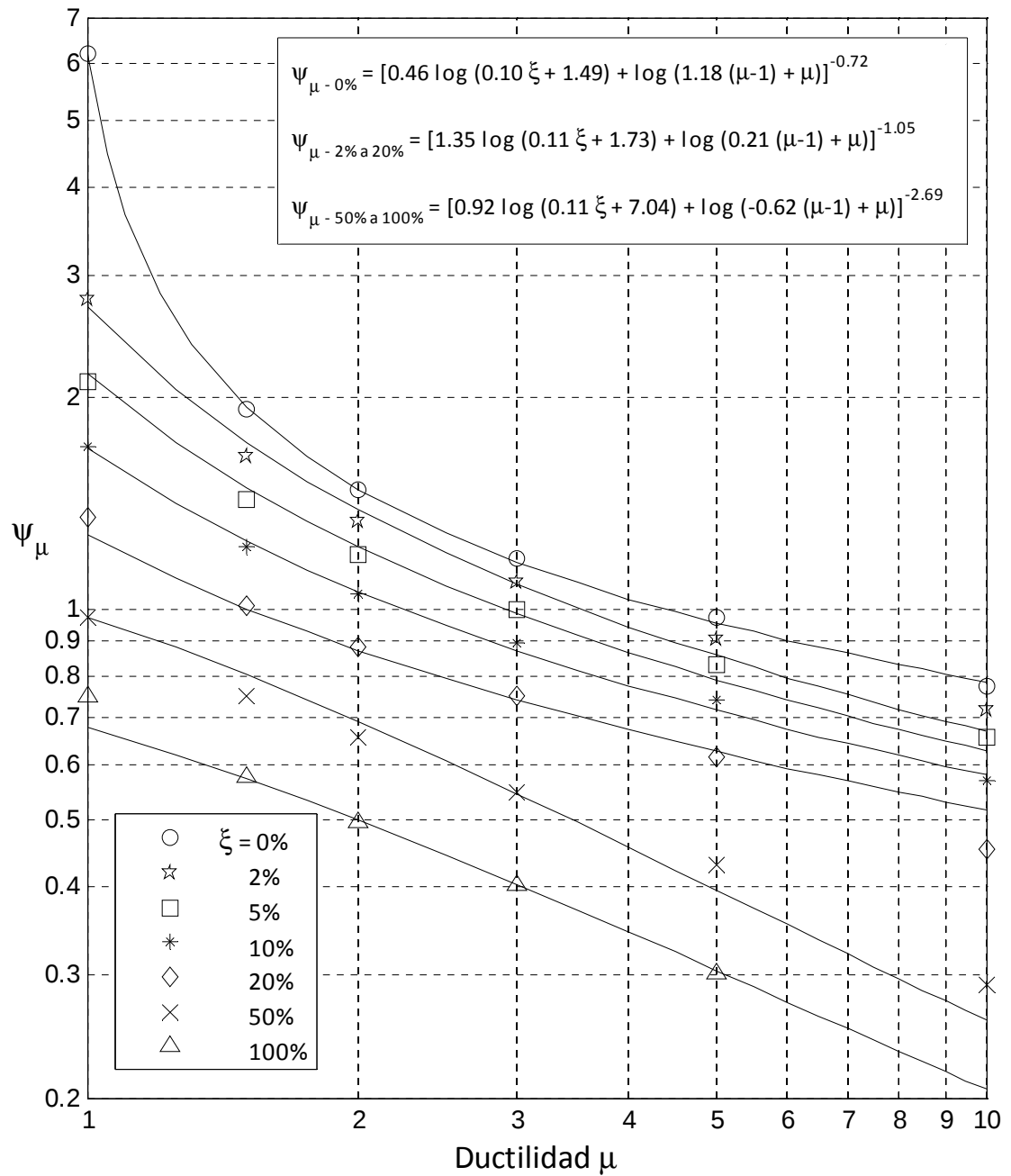


Figura 4.22 Factores de amplificación para región espectral de aceleración, caso degradación de rigidez. Ajuste a tres intervalos: $\xi = 0\%$; 2-20% y 50-100%.

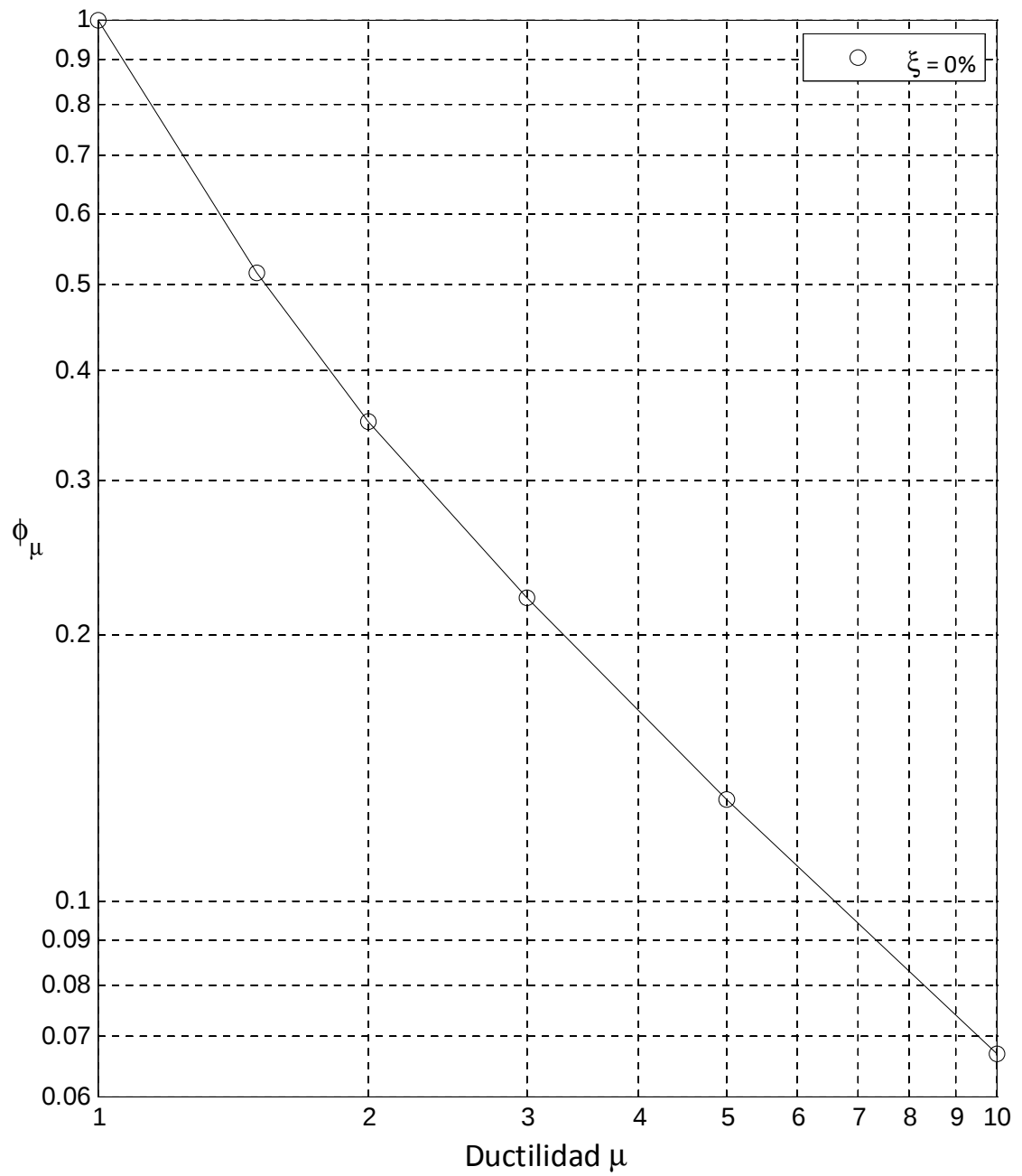


Figura 4.23 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso elastoplástico. Ajuste $\xi=0\%$.

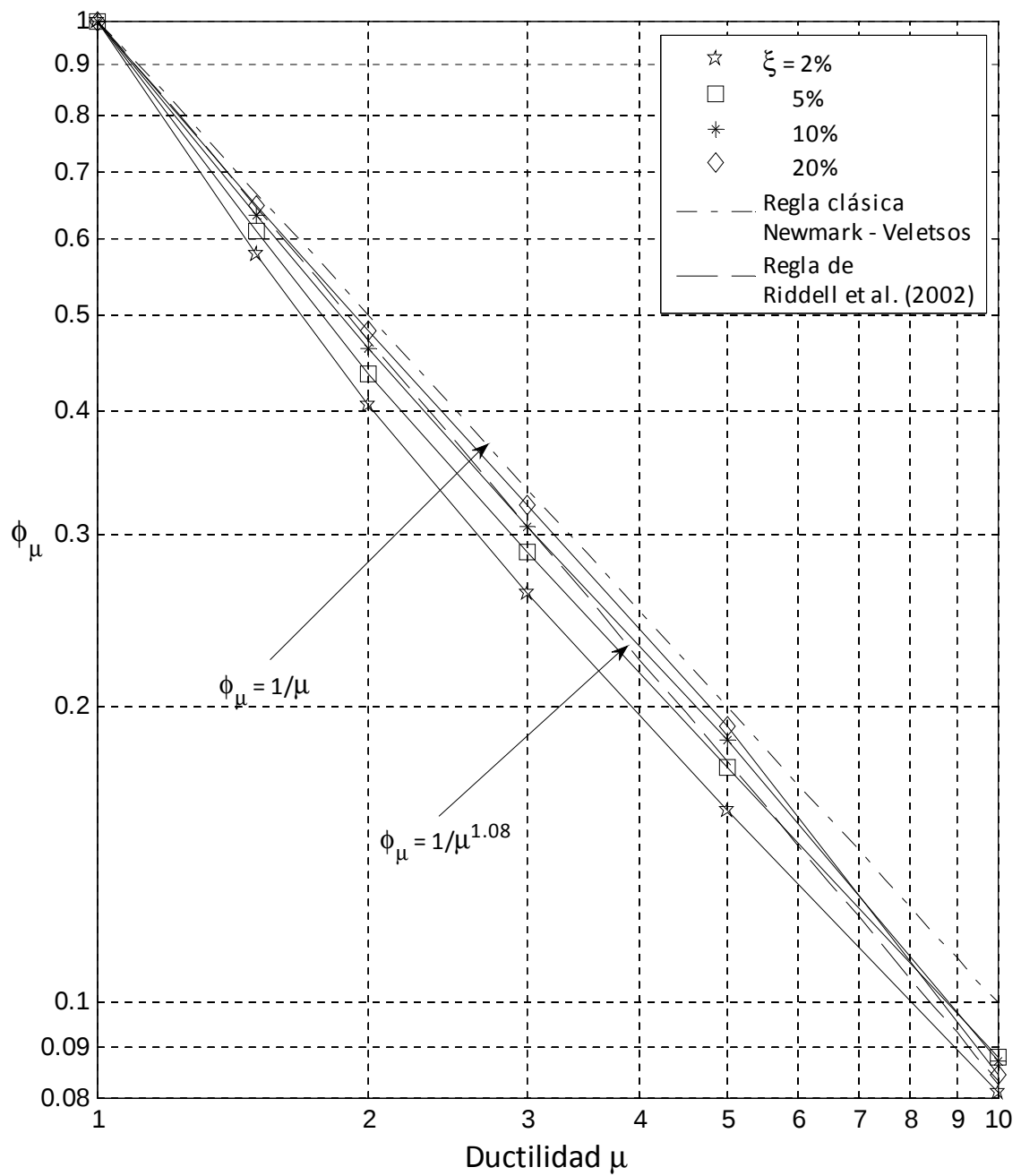


Figura 4.24 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso elastoplástico. Ajuste $\xi=2-20\%$.

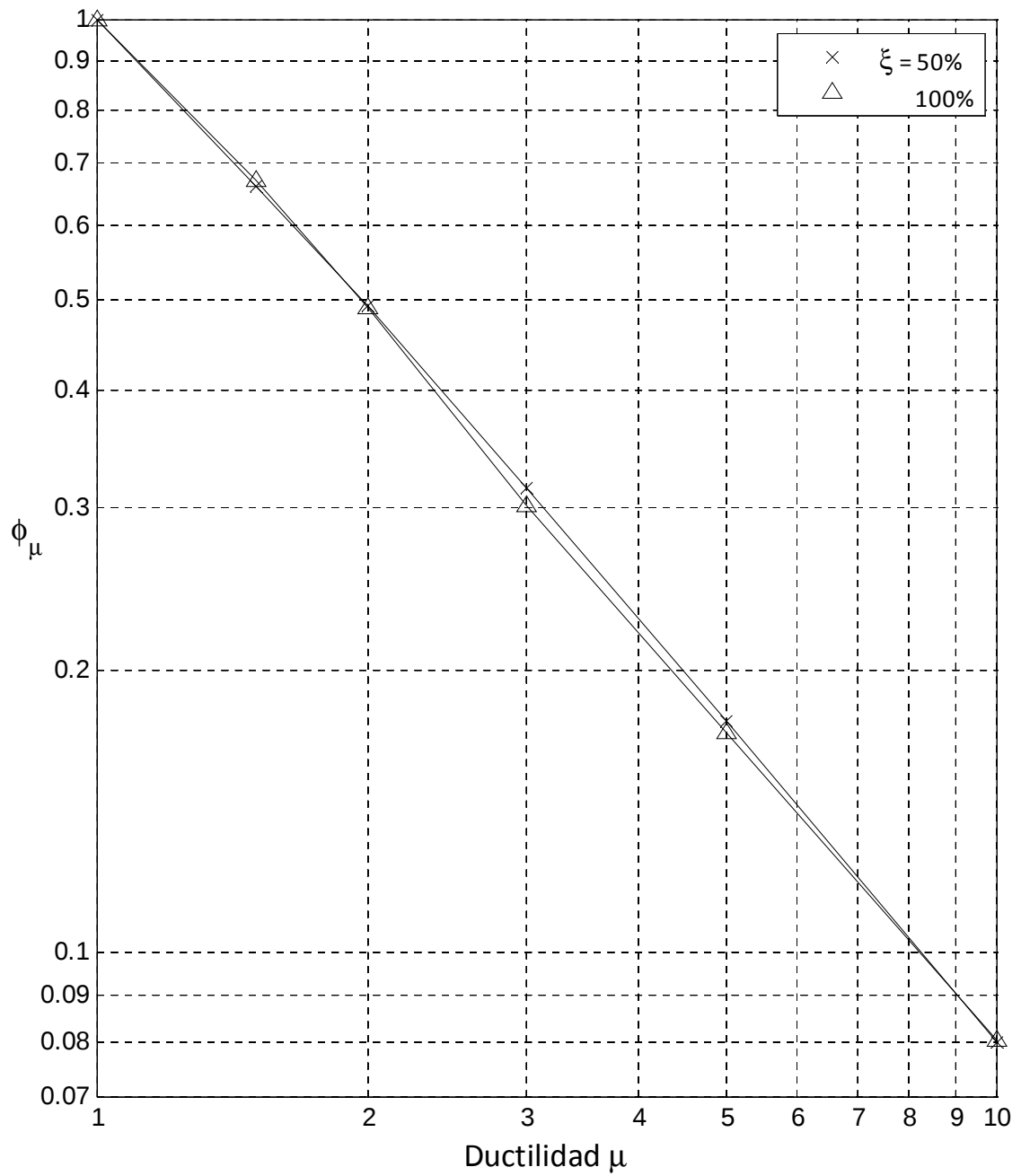


Figura 4.25 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso elastoplástico. Ajuste $\xi=50-100\%$.

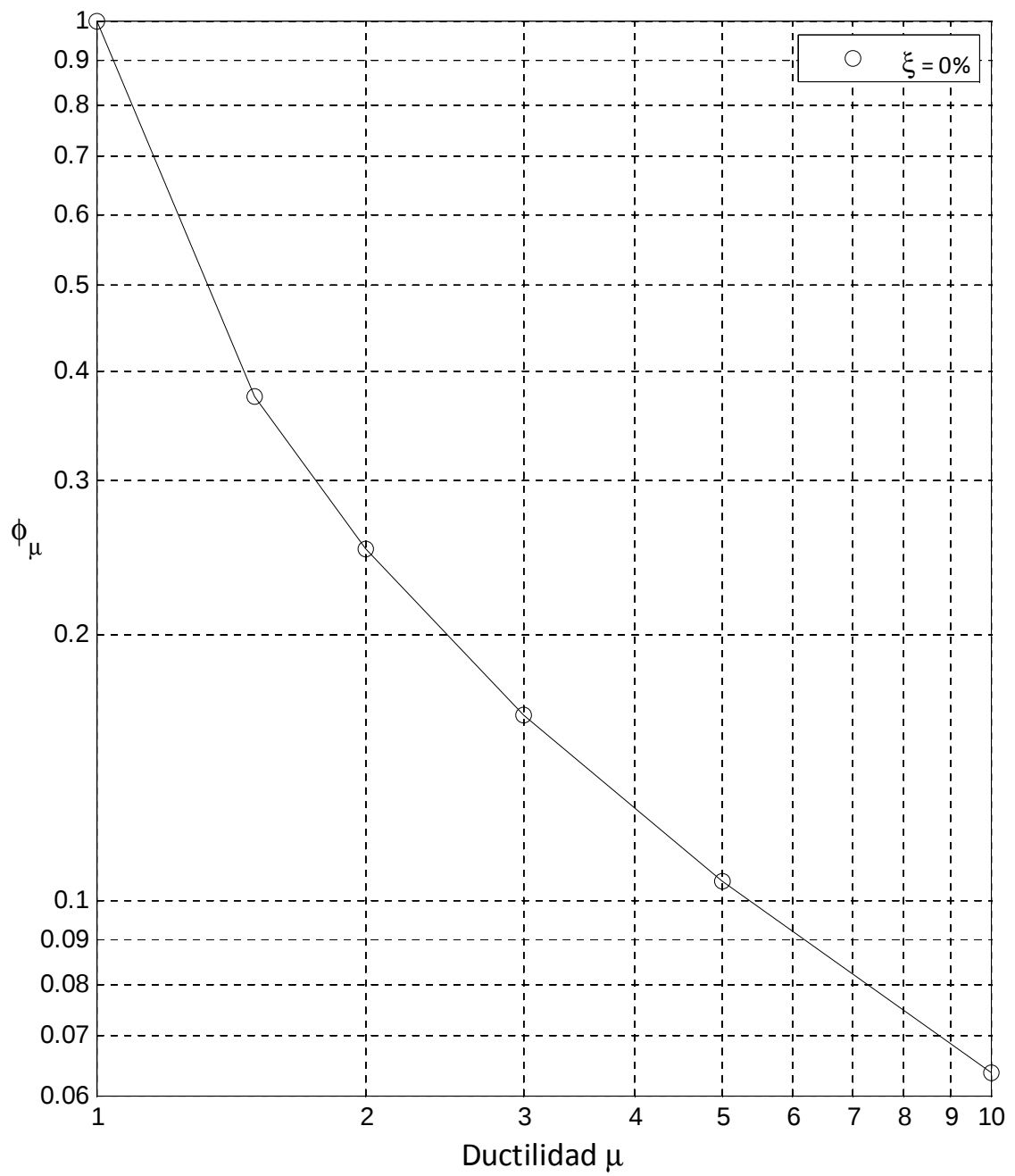


Figura 4.26 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso elastoplástico. Ajuste $\xi=0\%$.

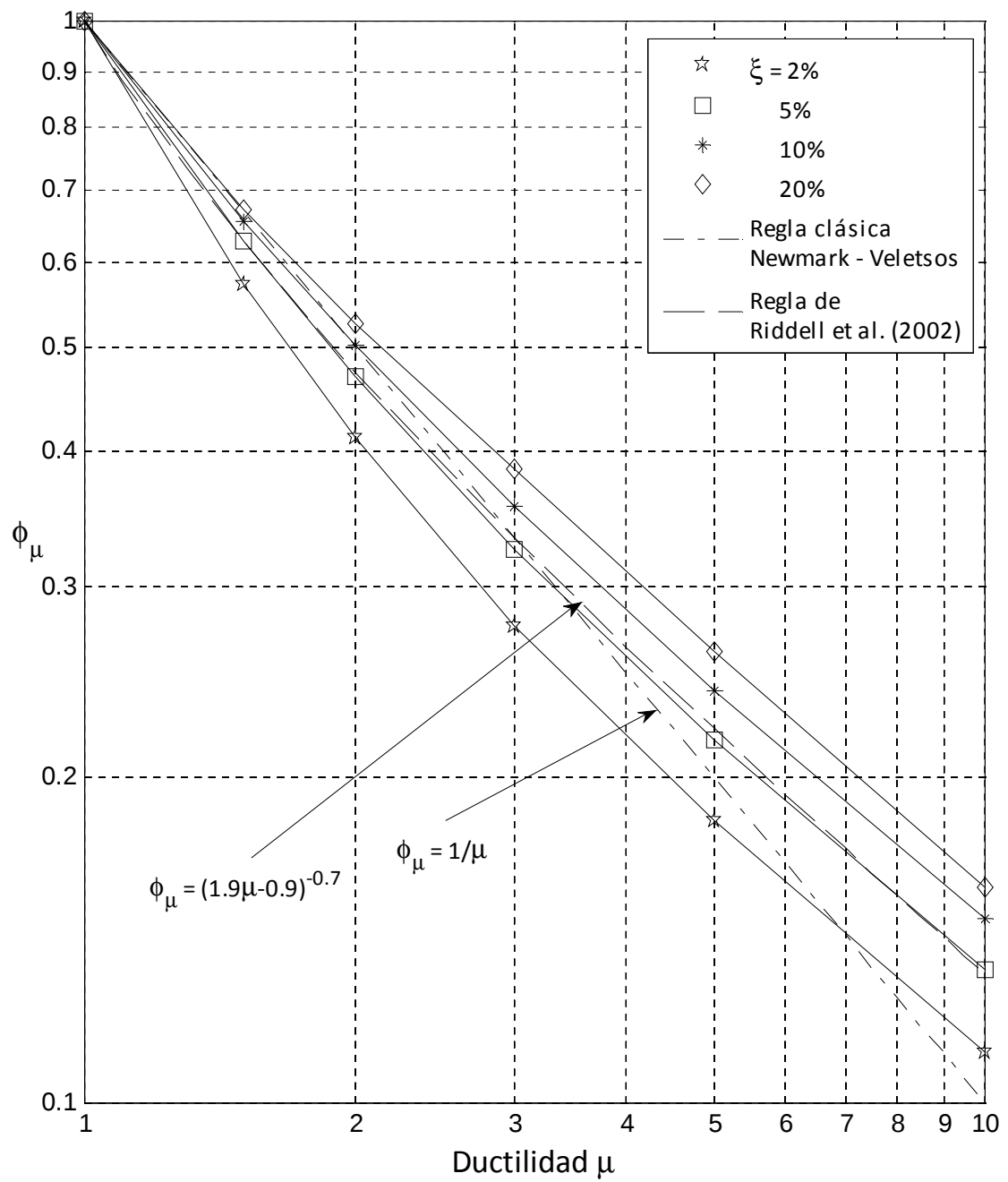


Figura 4.27 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso elastoplástico. Ajuste $\xi=2-20\%$.

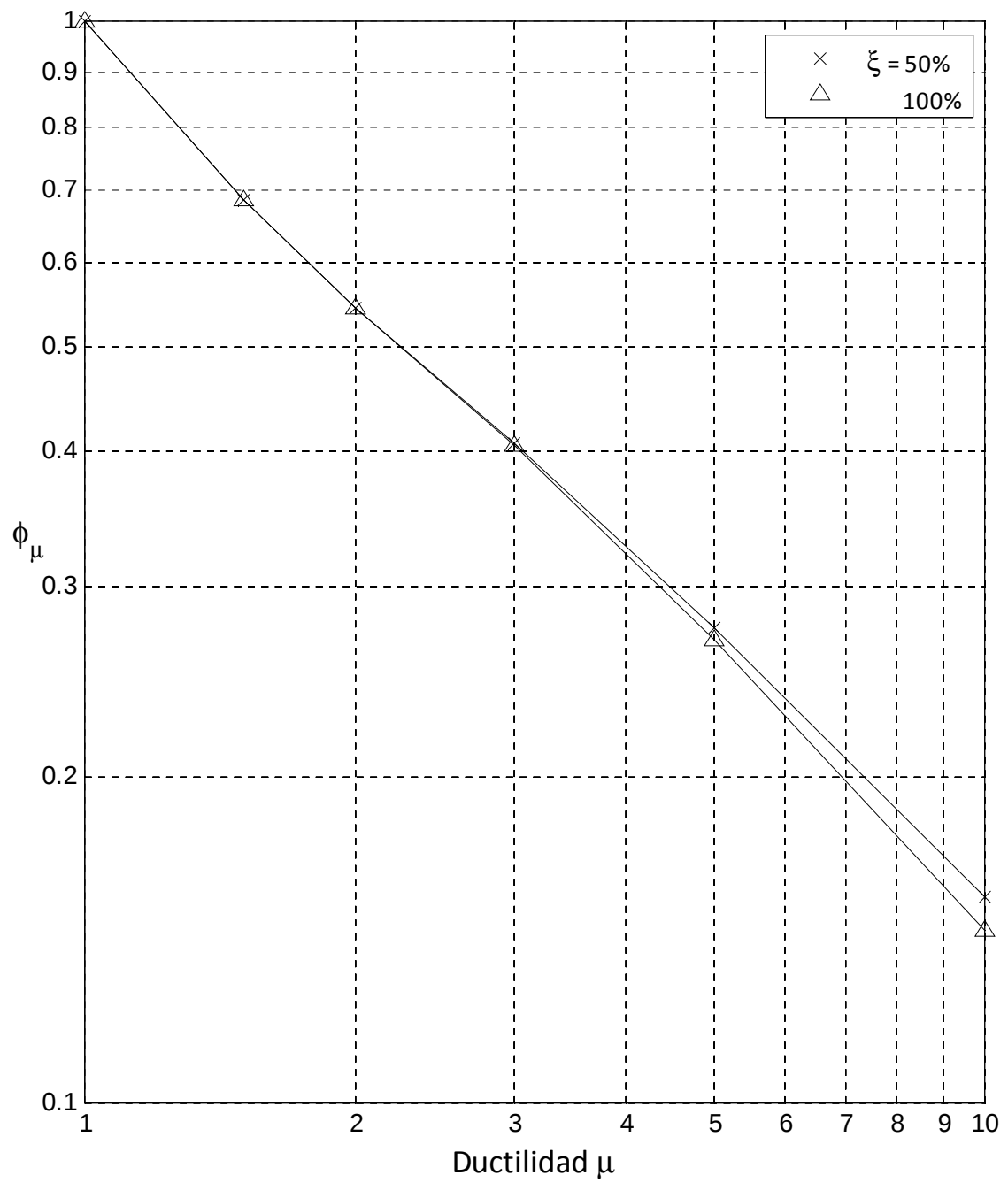


Figura 4.28 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso elastoplástico. Ajuste $\xi=50-100\%$.

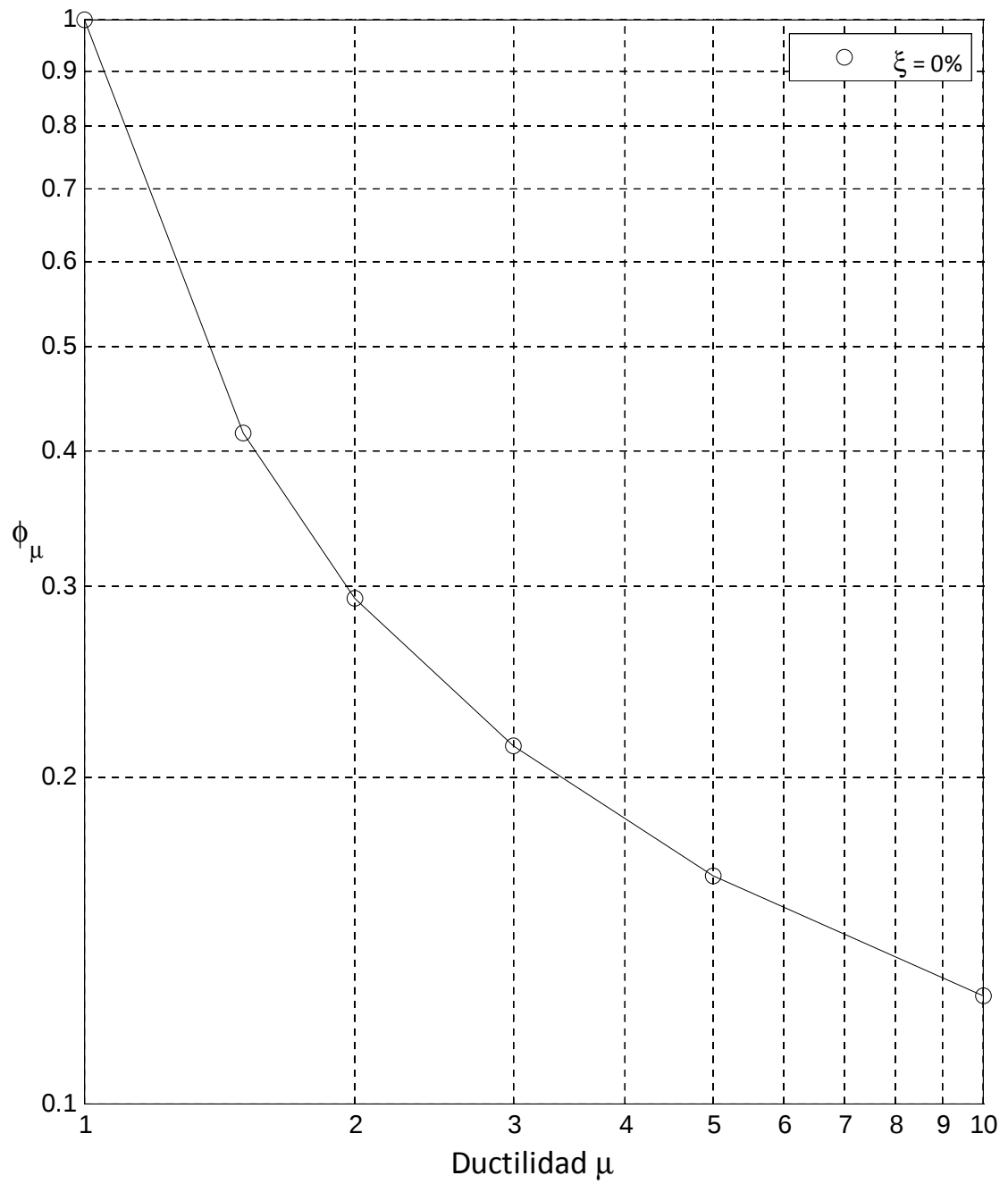


Figura 4.29 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso elastoplástico. Ajuste $\xi=0\%$.

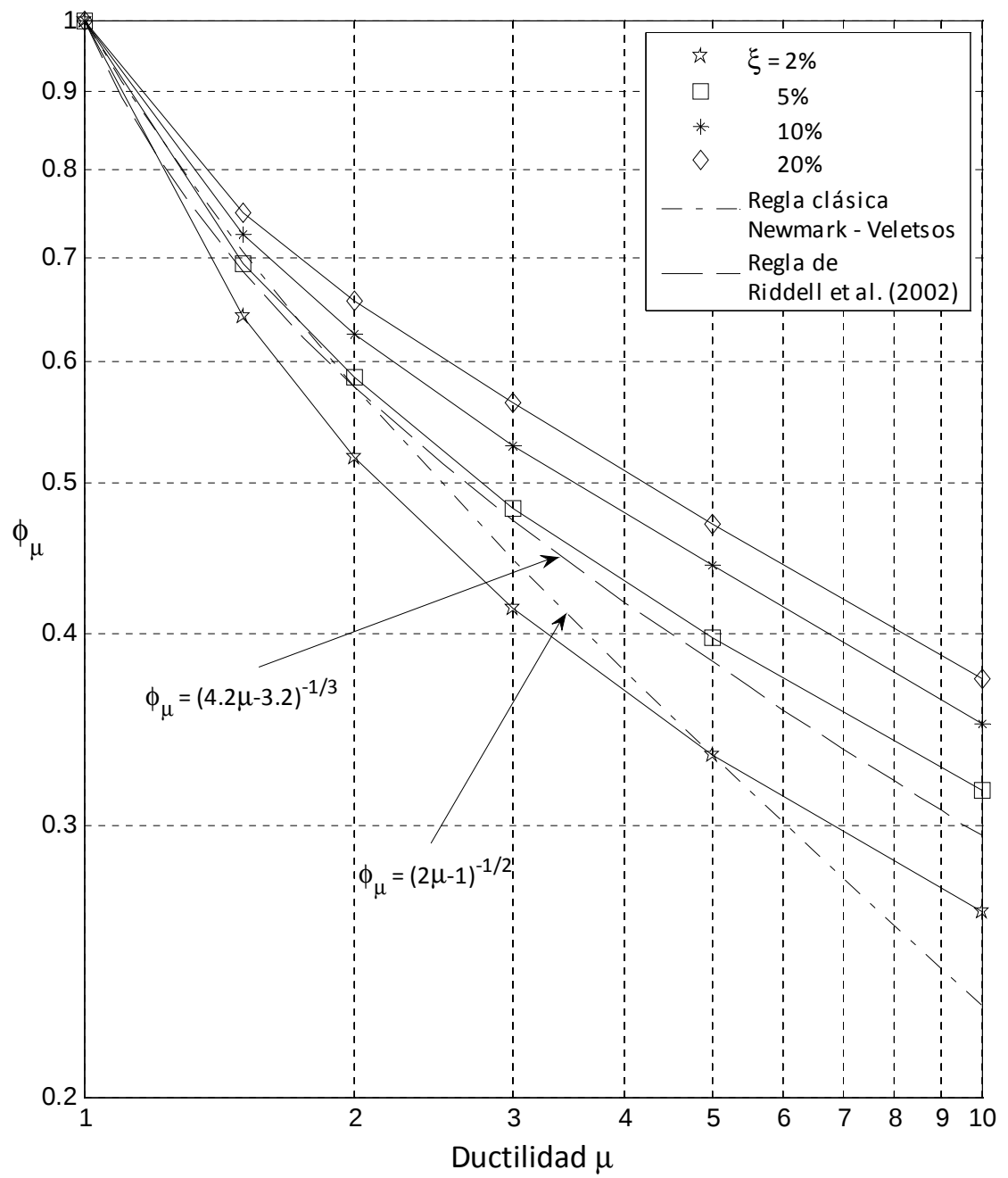


Figura 4.30 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso elastoplástico. Ajuste $\xi=2-20\%$.

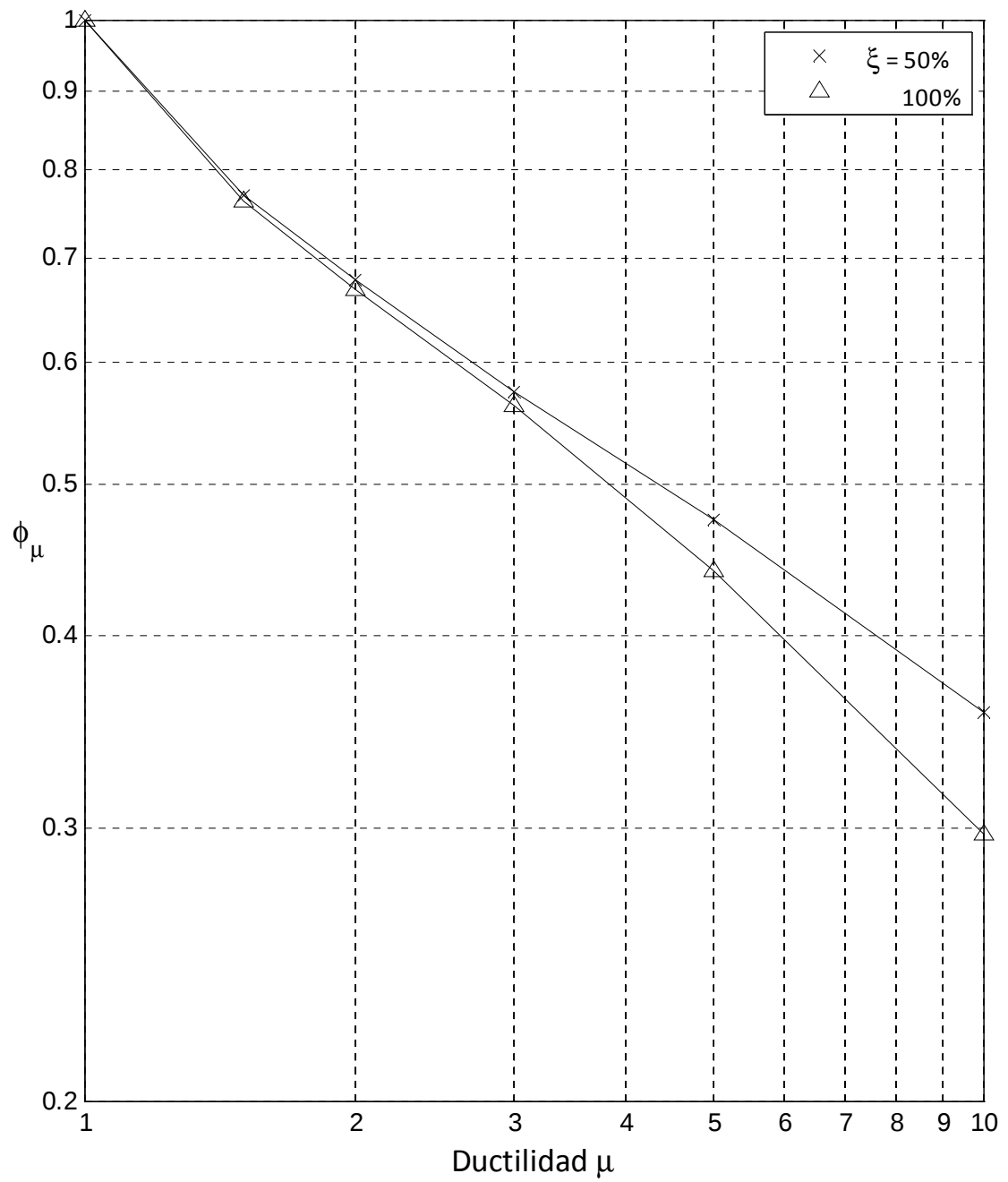


Figura 4.31 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso elastoplástico. Ajuste $\xi=50\text{-}100\%$.

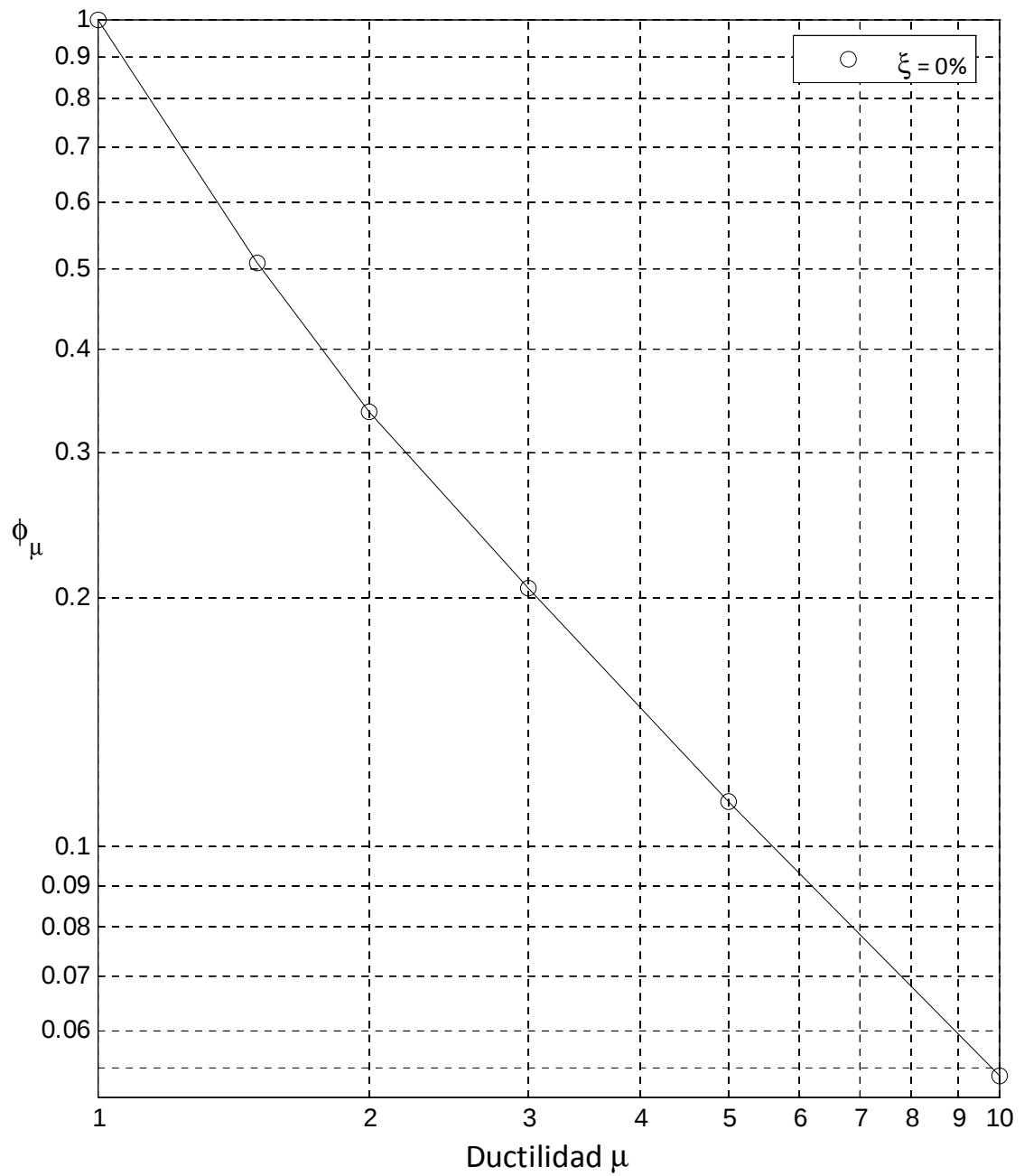


Figura 4.32 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso bilineal. Ajuste $\xi=0\%$.

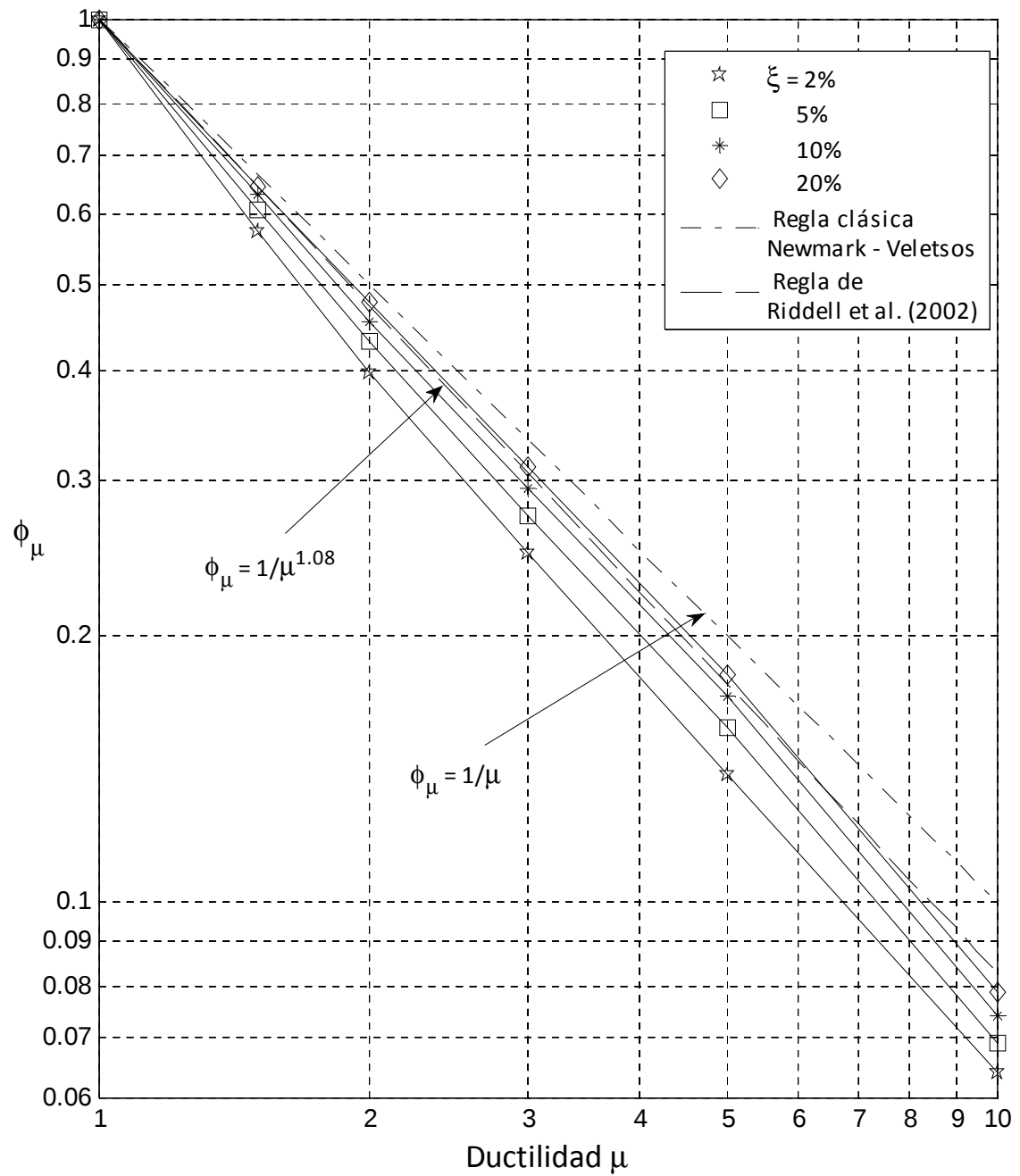


Figura 4.33 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso bilineal. Ajuste $\xi=2-20\%$.

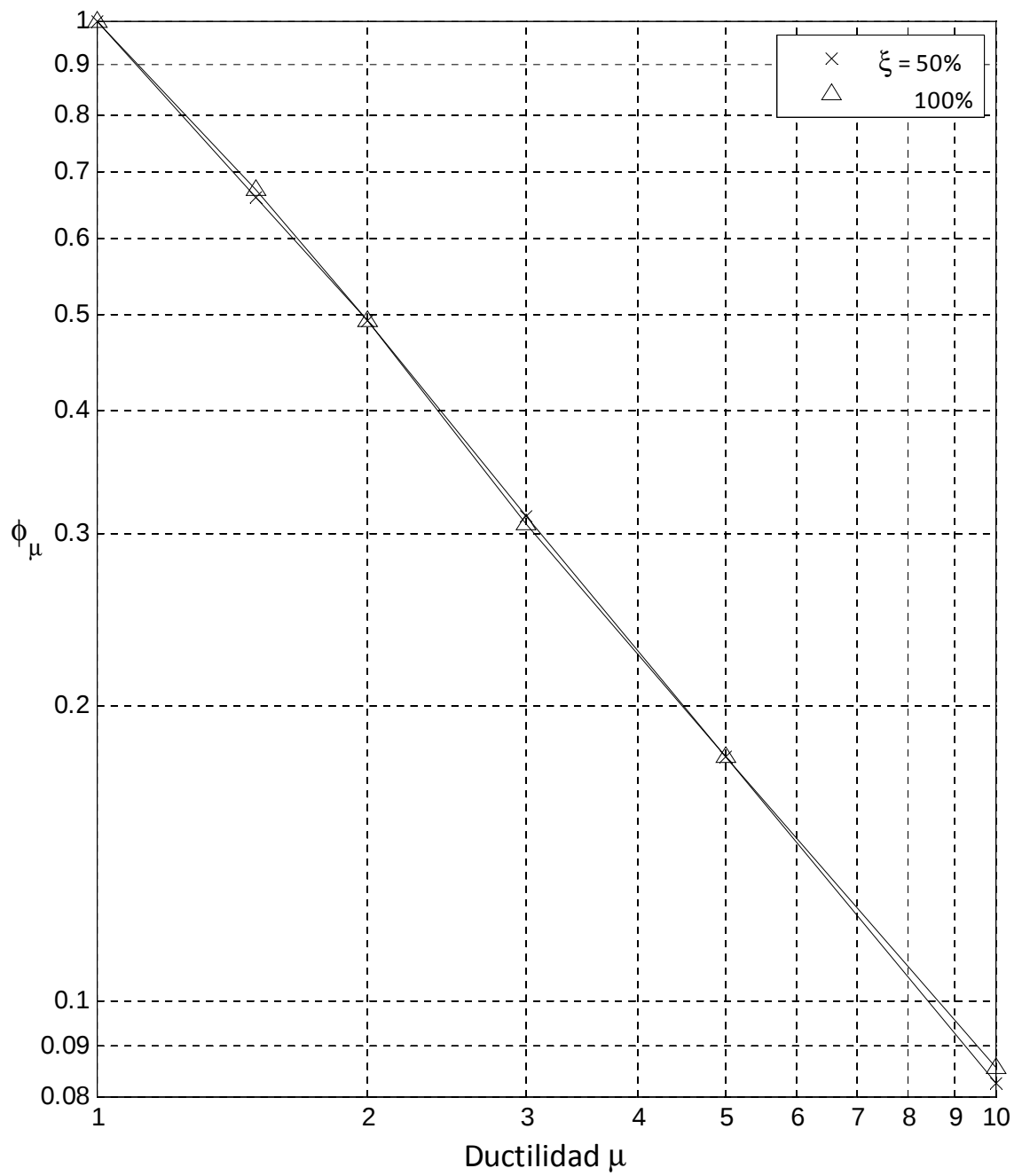


Figura 4.34 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso bilineal. Ajuste $\xi=50-100\%$.

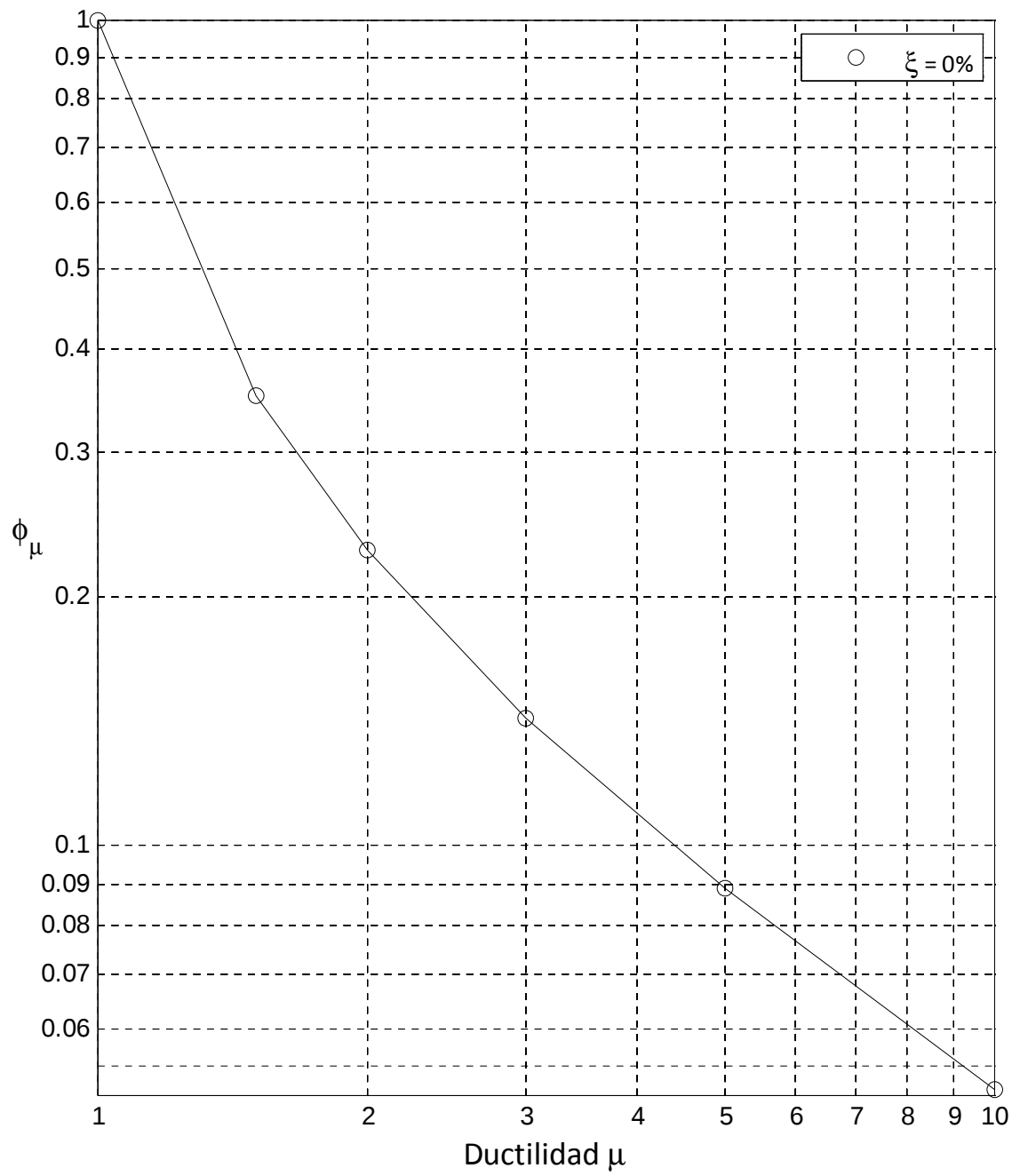


Figura 4.35 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso bilineal. Ajuste $\xi=0\%$.

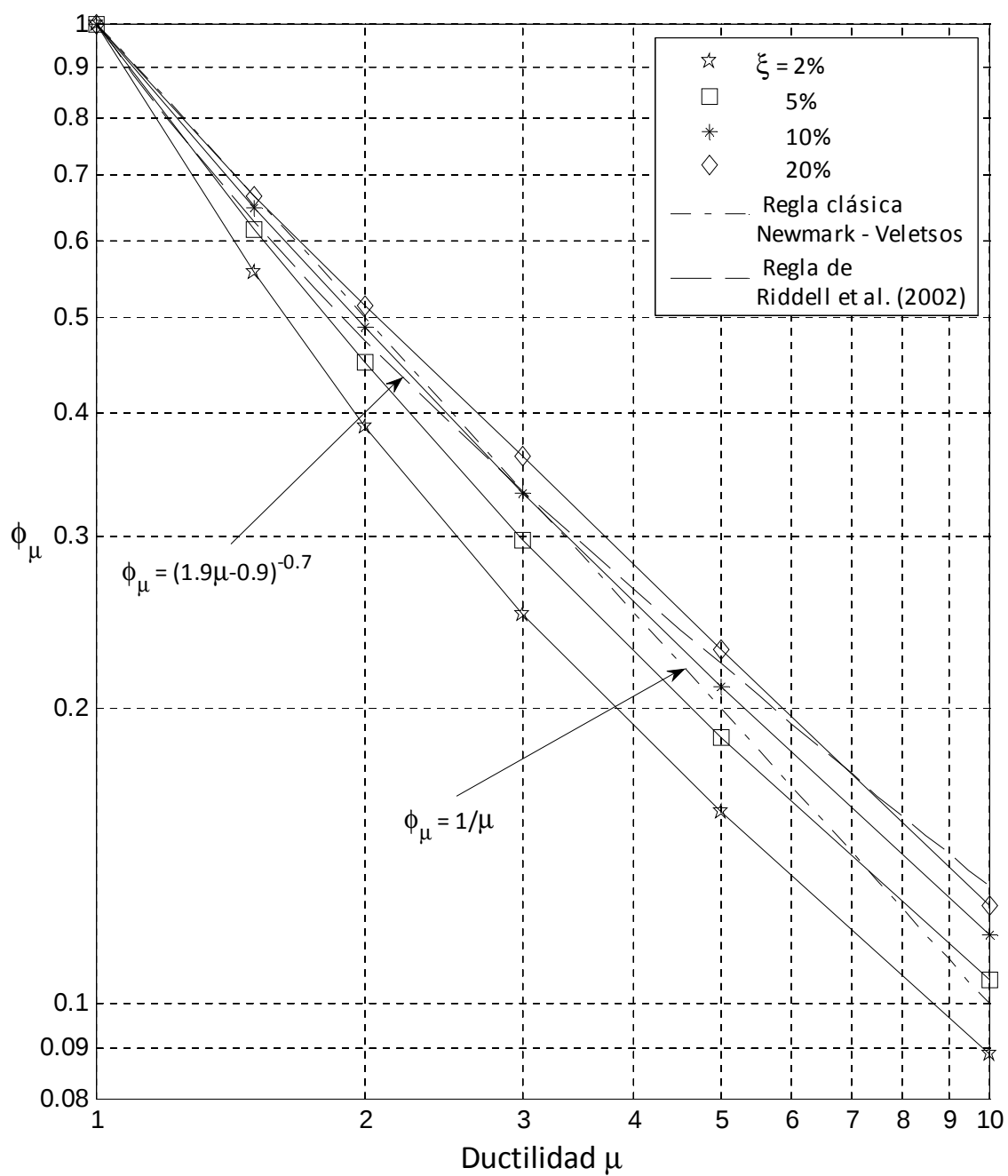


Figura 4.36 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso bilineal. Ajuste $\xi=2-20\%$.

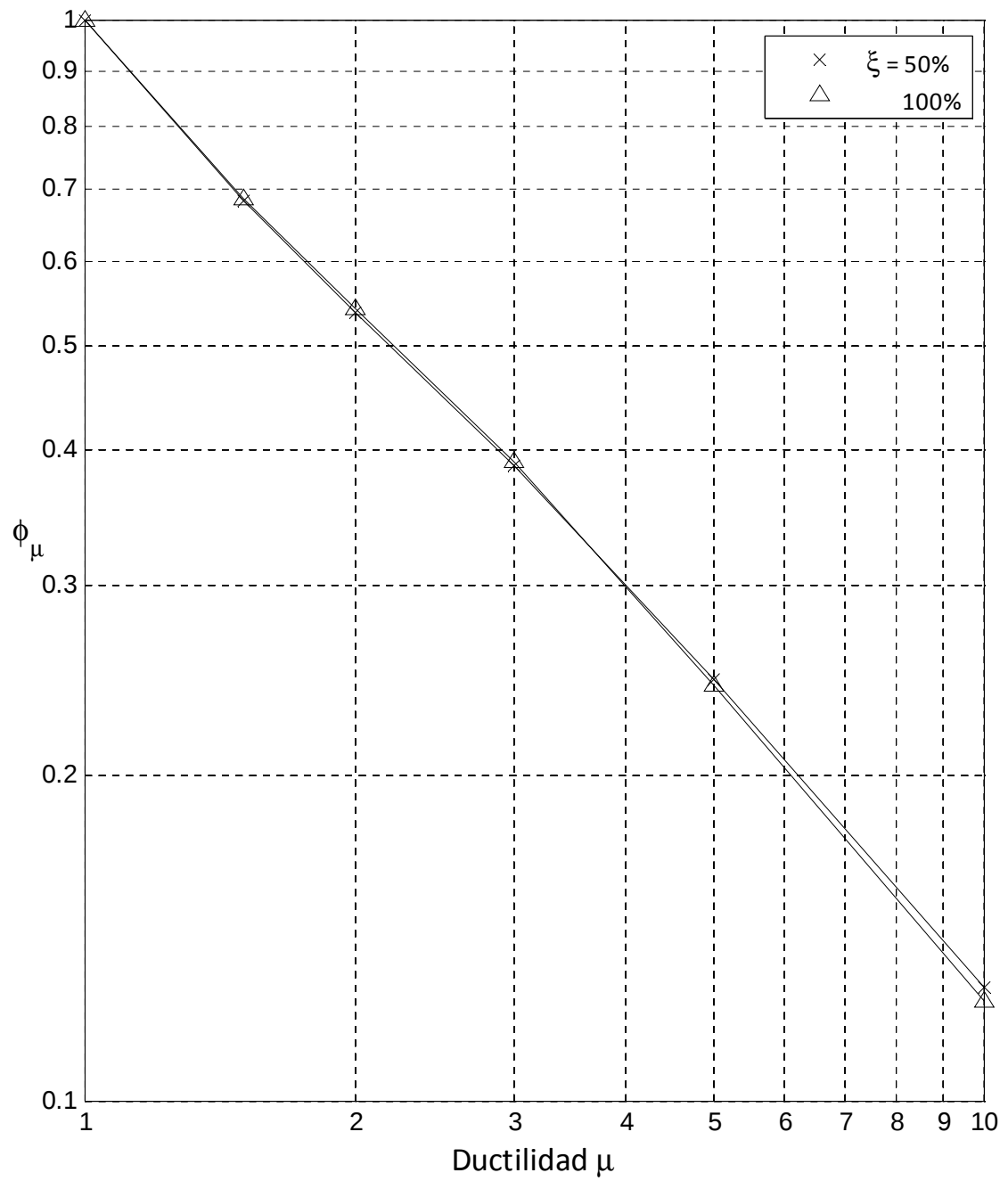


Figura 4.37 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso bilineal. Ajuste $\xi=50\text{-}100\%$.

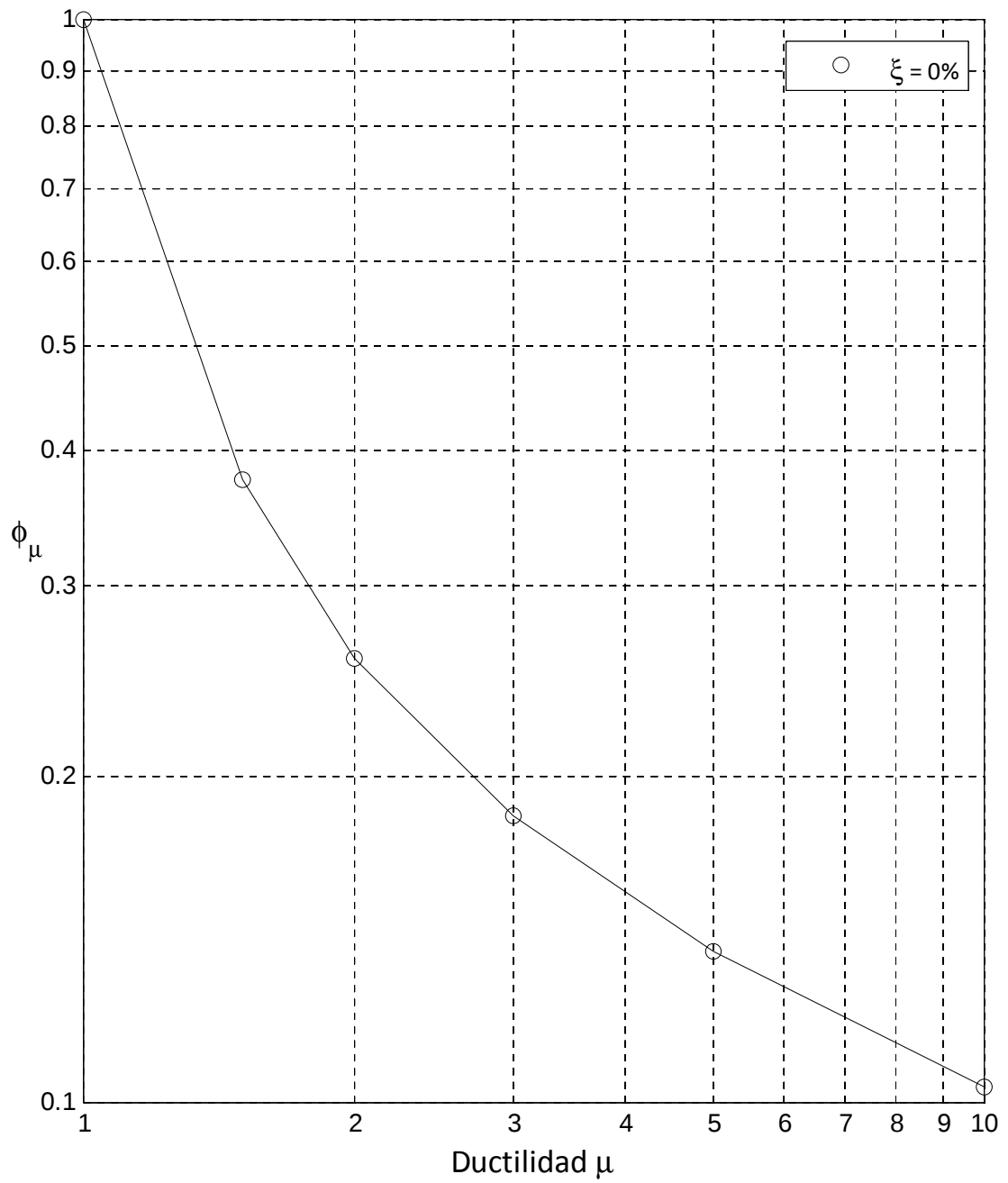


Figura 4.38 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso bilineal. Ajuste $\xi=0\%$.

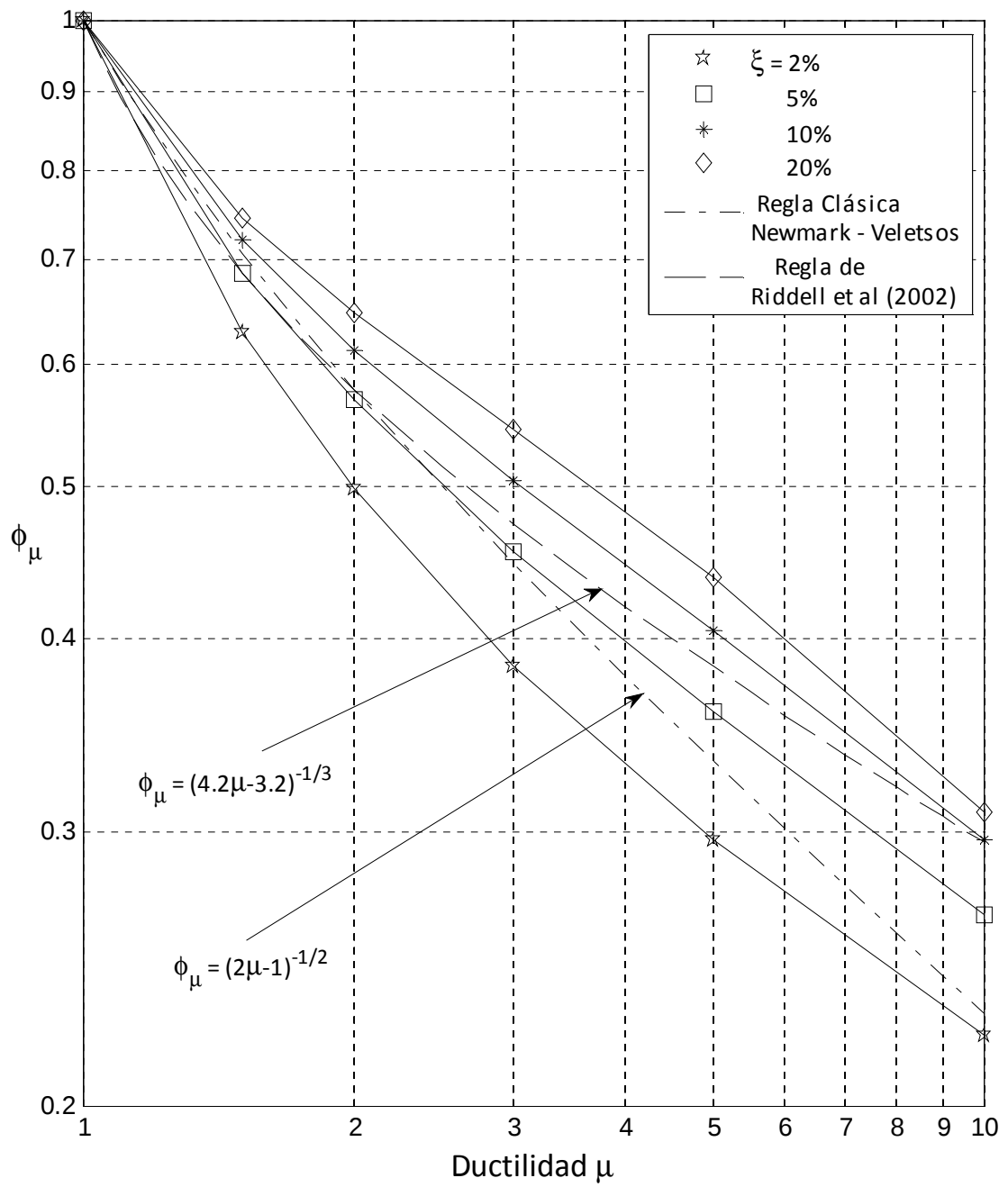


Figura 4.39 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso bilineal. Ajuste $\xi=2-20\%$.

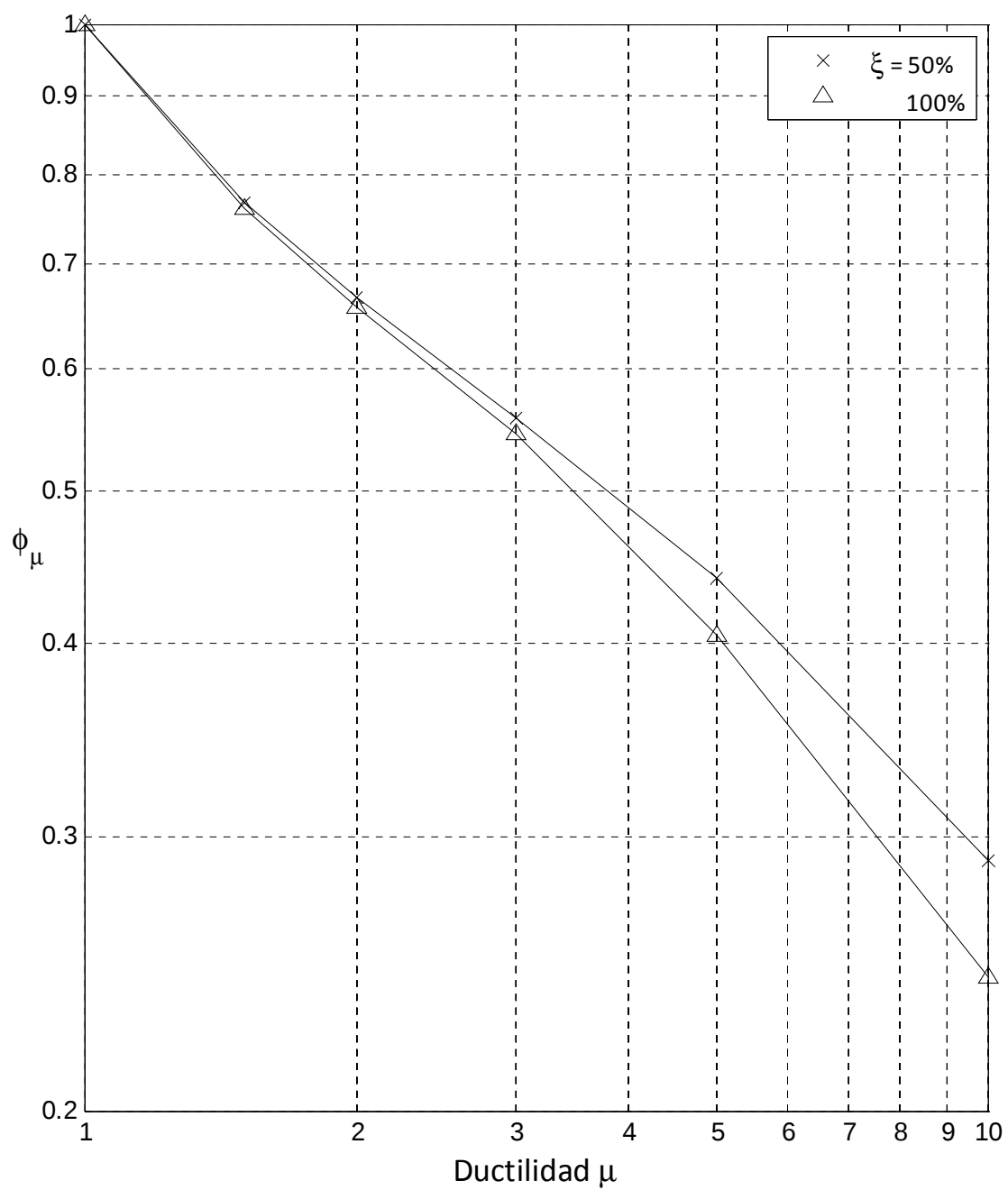


Figura 4.40 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso bilineal. Ajuste $\xi=50\text{-}100\%$.

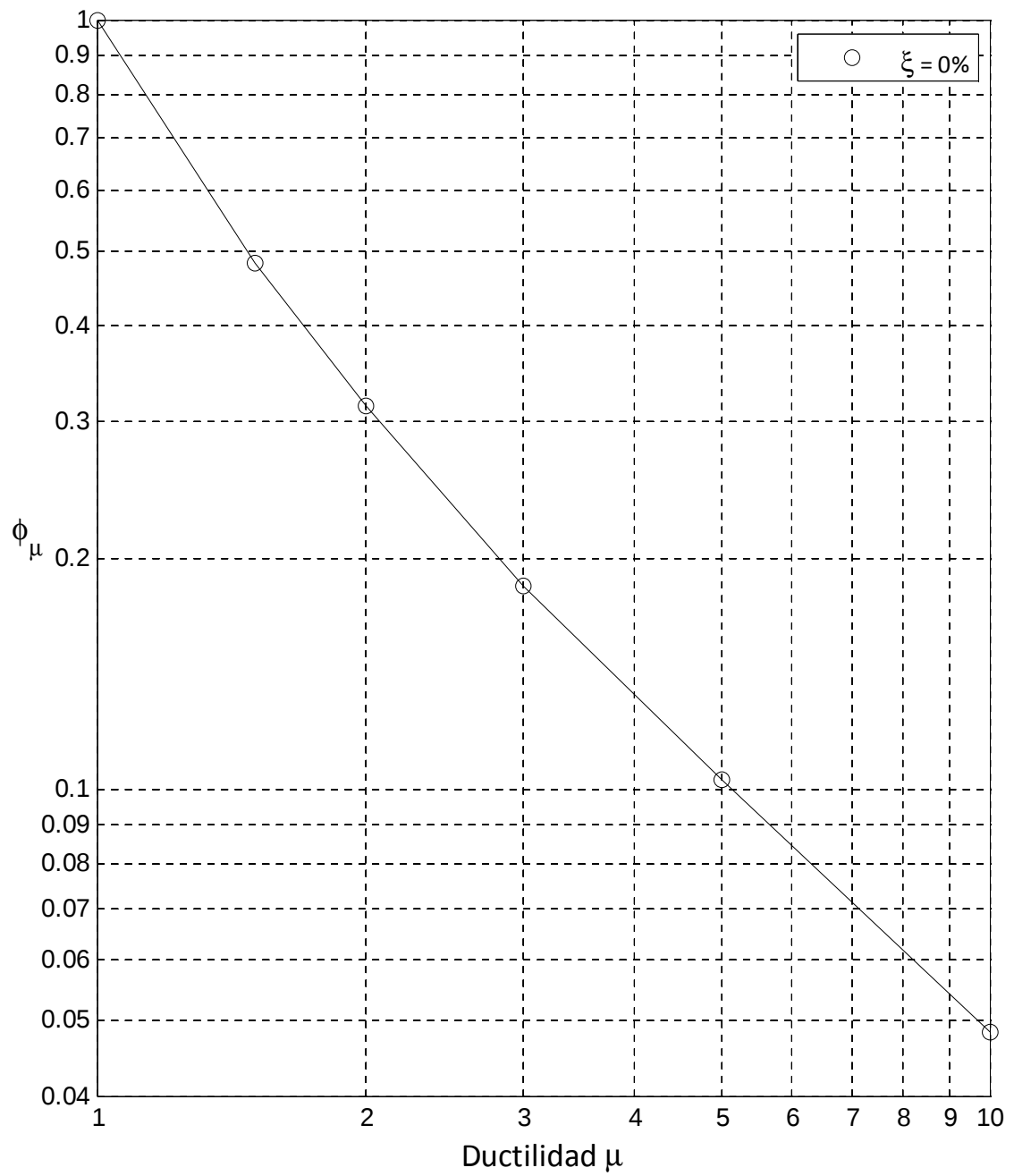


Figura 4.41 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=0\%$.

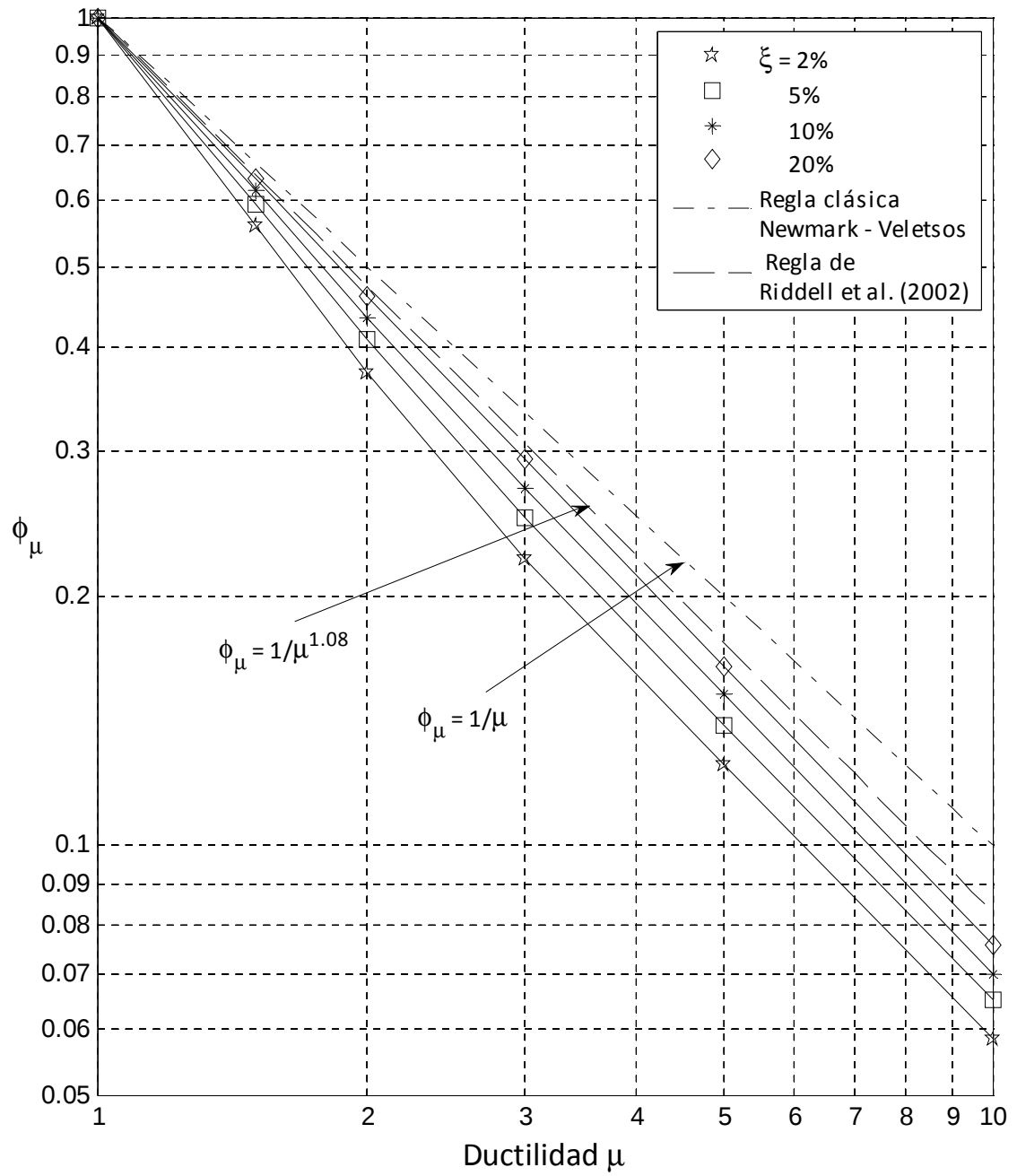


Figura 4.42 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=2-20\%$.

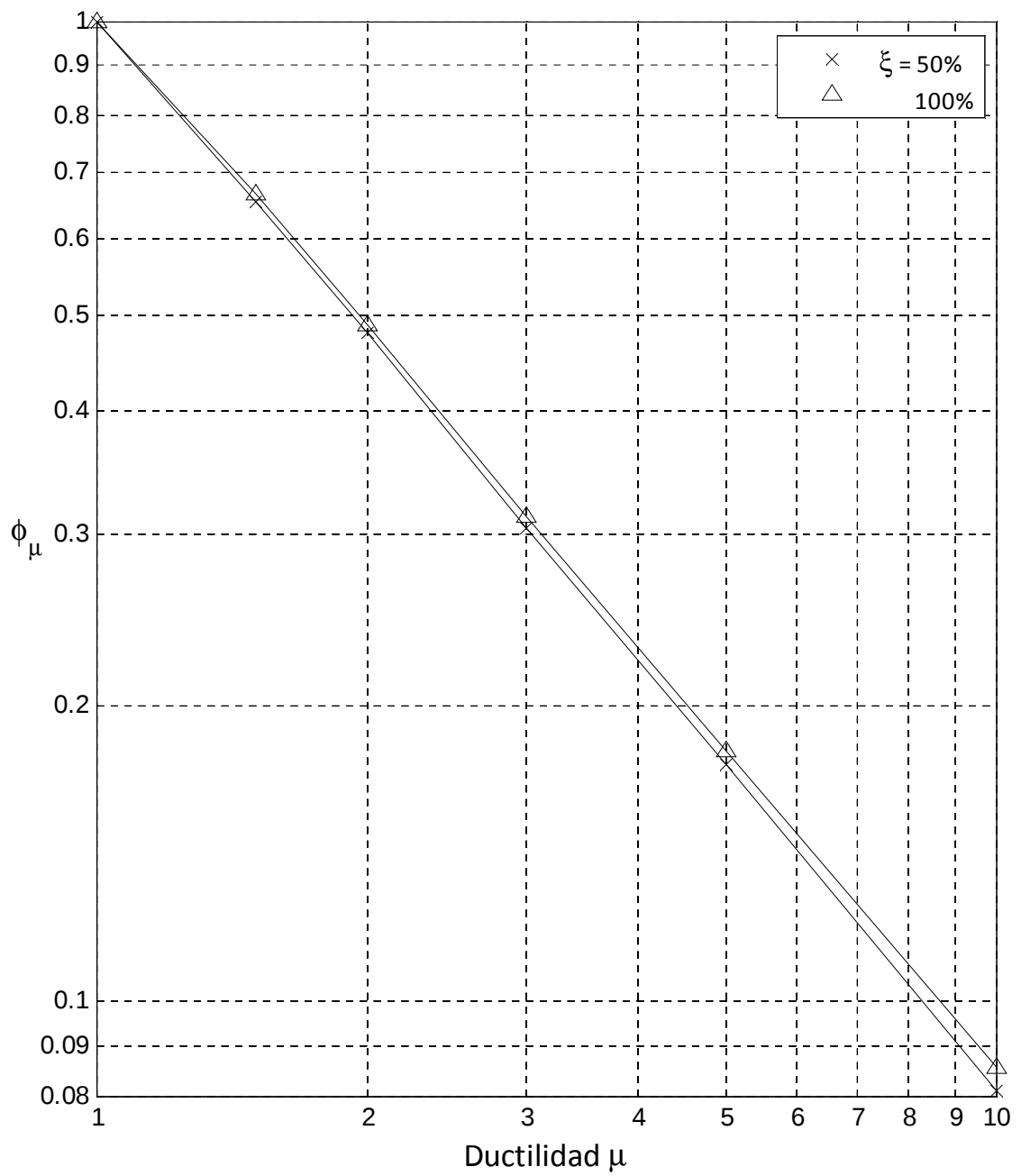


Figura 4.43 Factores de reducción para región espectral de desplazamiento, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=50-100\%$.

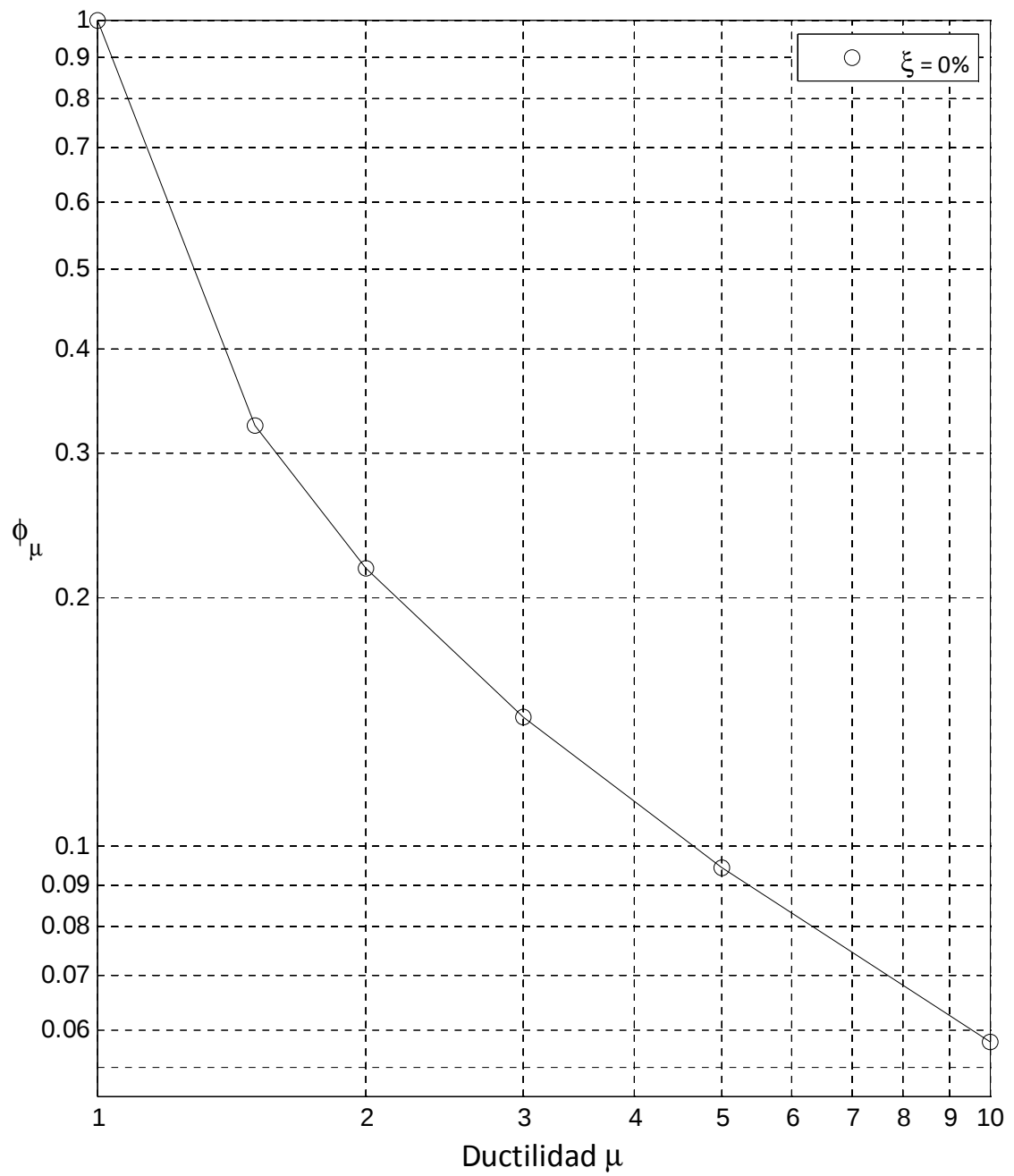


Figura 4.44 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=0\%$.

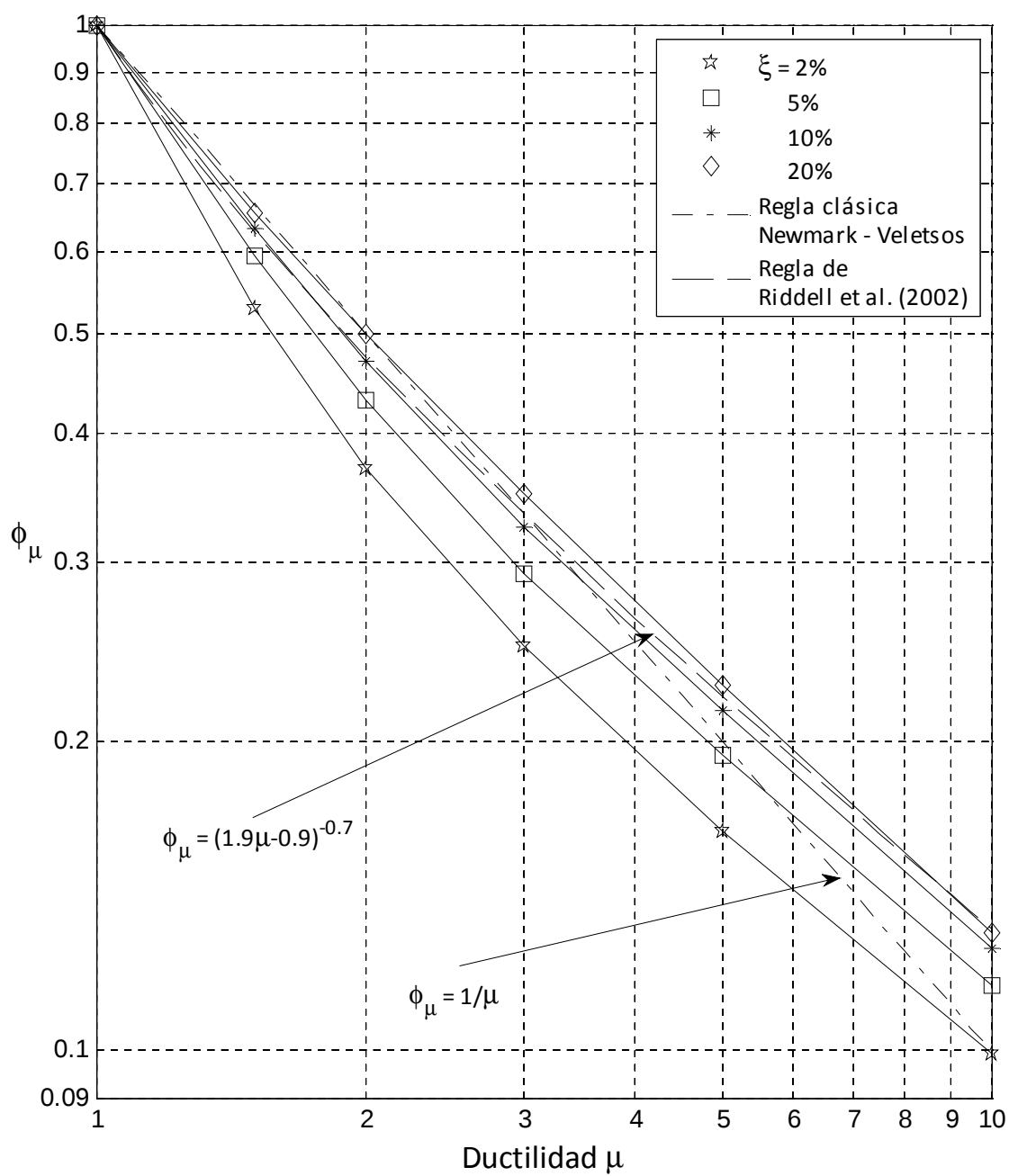


Figura 4.45 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=2-20\%$.

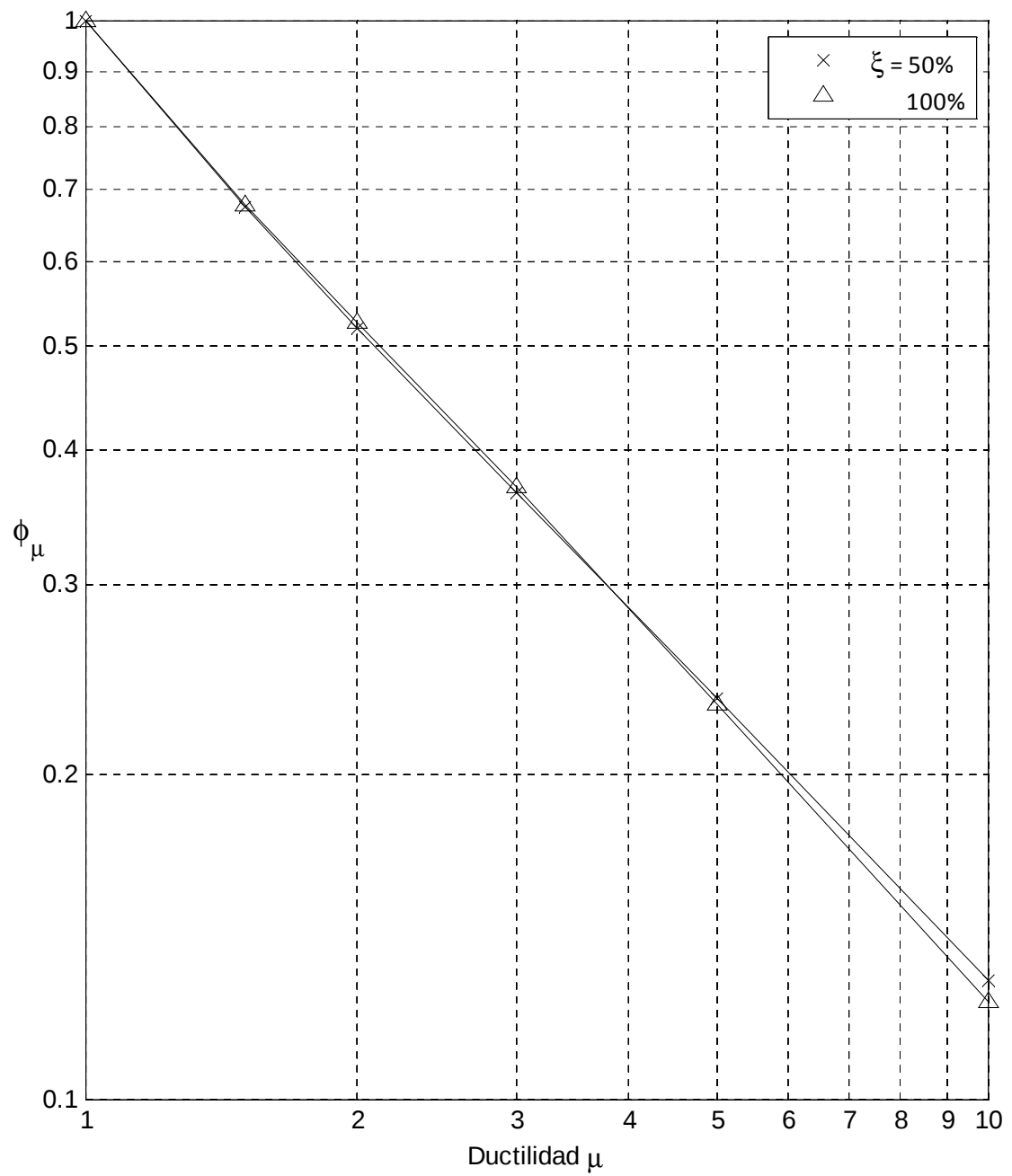


Figura 4.46 Factores de reducción para región espectral de velocidad, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=50$ -100%.

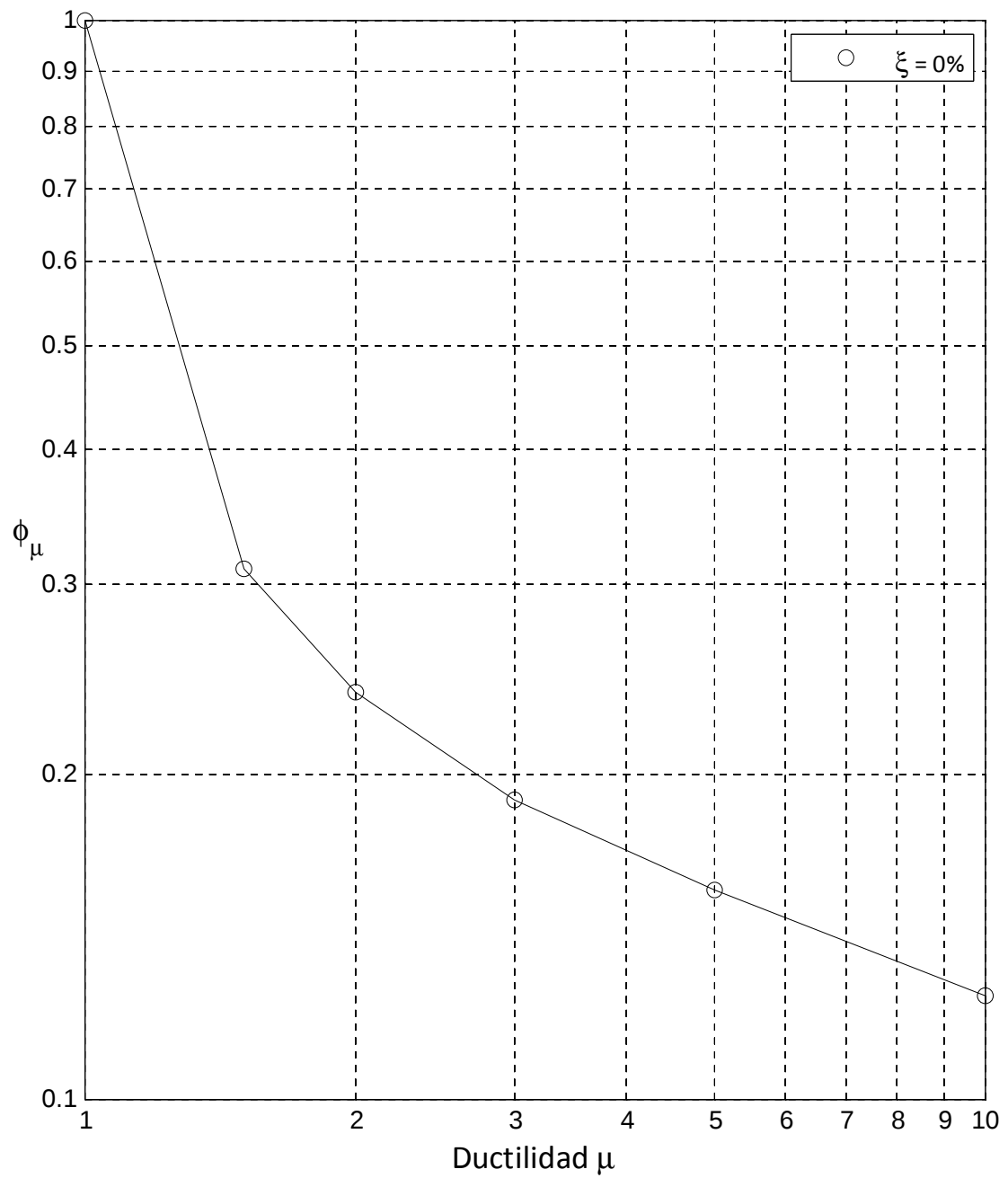


Figura 4.47 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=0\%$.

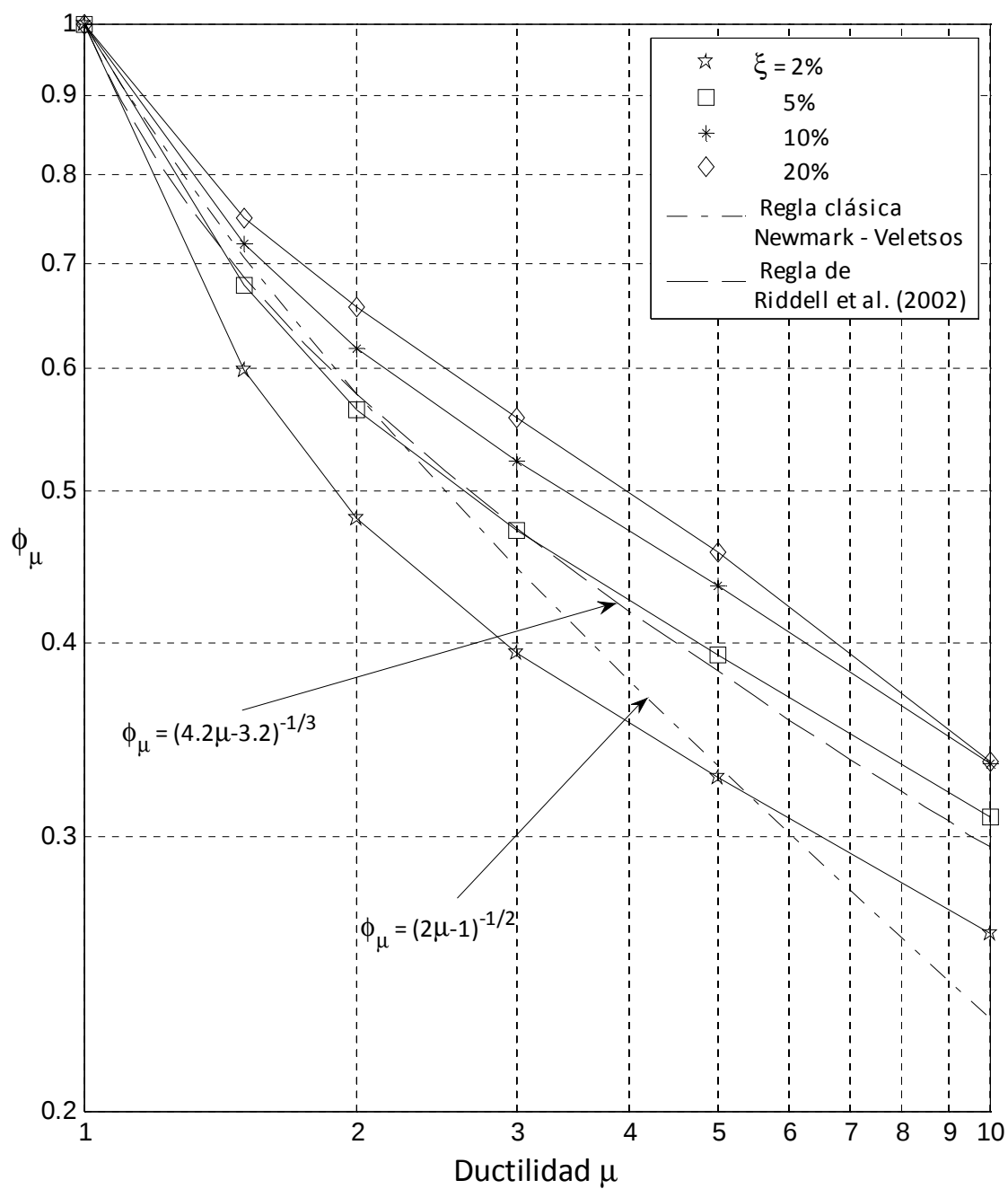


Figura 4.48 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=2-20\%$.

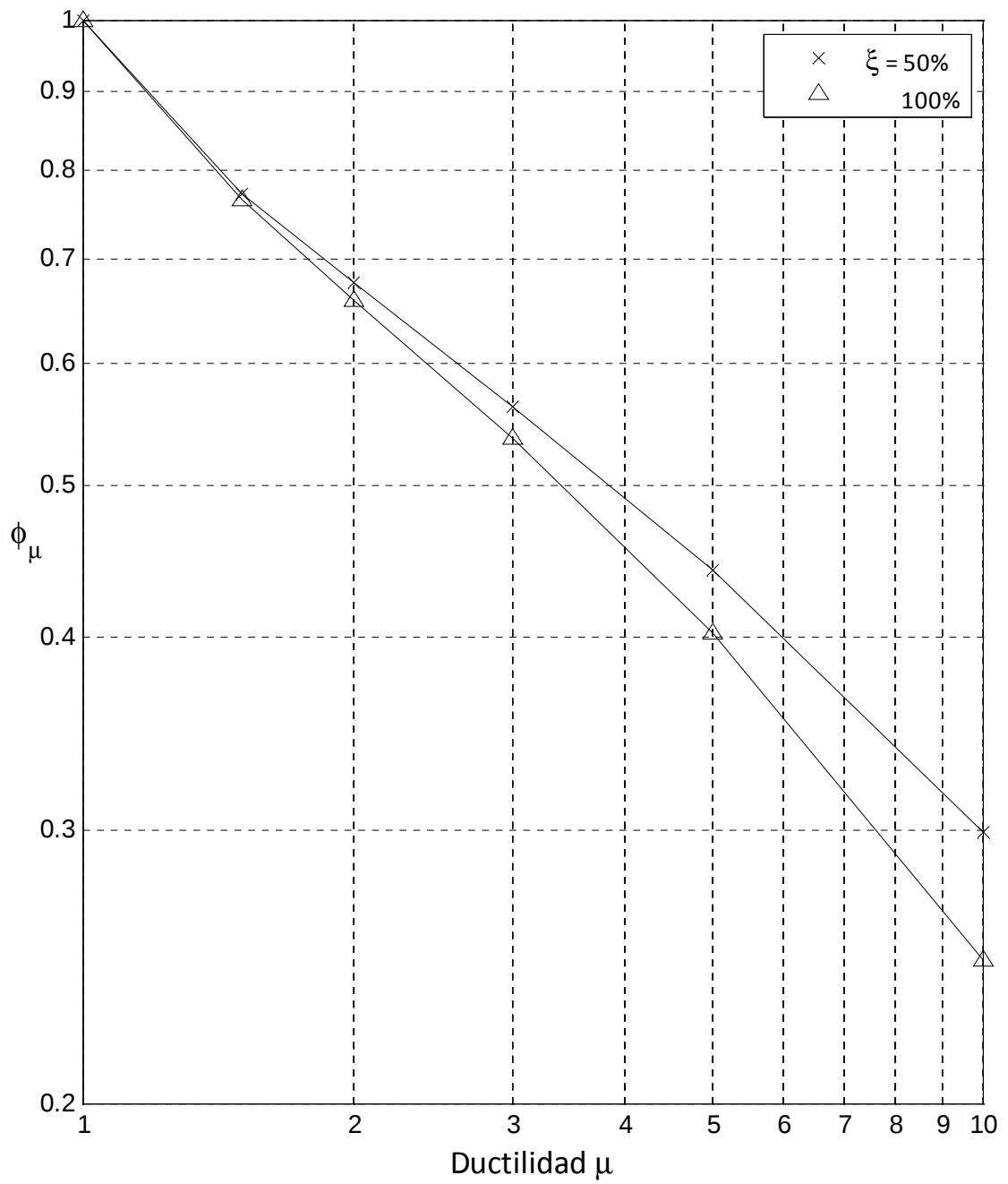


Figura 4.49 Factores de reducción para región espectral de aceleración, caso con degradación de rigidez. Ajuste $\xi=50-100\%$.

5. APLICACIÓN DEL ESTUDIO Y CONCLUSIONES

En este Capítulo se explica el procedimiento para poder construir los espectros de diseño utilizando los factores presentados en este estudio, junto con algunas consideraciones. Por último se entregan conclusiones generales la presente investigación.

5.1 Construcción de Espectros de Diseño

Lo primero que debemos determinar para construir un espectro de diseño son los valores asociados a la demanda sísmica o intensidad del movimiento del suelo en el sitio en cuestión, es decir, necesitamos conocer los valores de A , V y D , los valores máximos del movimiento del suelo. Estos valores pueden ser estimados a partir de diferentes métodos, como por ejemplo un análisis de amenaza sísmica de la zona en consideración o pueden ser obtenidos a partir de un código de diseño sísmico. Incluso es común que se permita estimar solamente la aceleración máxima del suelo.

La construcción del espectro elástico de diseño se puede observar en la Figura 5.1 (Riddell y Newmark, 1979), usando los factores de las Tablas 4.1 a 4.7, o bien los factores que se obtienen de las expresiones presentadas en la Sección 4.3. Dado que los factores para sistemas elastoplásticos en general son conservadores, como se discutió en la Sección 4.4, se recomienda usar dichos valores para propósitos generales. Primero debemos trazar los valores de A , V y D en un gráfico logarítmico tripartito. Los segmentos JK, KL y LM del espectro elástico se determinan amplificando los parámetros del movimiento máximo del suelo por los factores $\psi_{\mu=1}$ correspondientes a cada una de las regiones espectrales. Las frecuencias límite f_I , f_J , f_M y f_N se deben determinar para cada caso. En este estudio se consideró: $f_J = 0,15\text{cps}$ y $f_M = 10\text{cps}$, y siendo consistente con estudios anteriores (Riddell et al, 2002) consideraremos: $f_I = 0,05\text{cps}$ y $f_N = 30\text{cps}$. El

espectro elástico queda enteramente determinado con las líneas de transición IJ y MN, las que simplemente se interceptan con el desplazamiento máximo del suelo por la izquierda (justo en la frecuencia f_I) y a la aceleración máxima por la derecha.

Para construir el espectro inelástico (Figura 5.2, Riddell y Newmark, 1979), debemos aplicar los factores ψ_μ al movimiento máximo del suelo, según la ductilidad deseada, de esta manera similarmente como lo hicimos con el espectro elástico determinamos los segmentos J'K', K'L', y L'M' (recordemos que también podríamos hacer esto reduciendo el espectro elástico por medio de los factores ϕ_μ). El punto I' se determina dividiendo la ordenada del espectro elástico en el punto I por la ductilidad μ ; esto se justifica ya que para bajas frecuencias la deformación máxima de sistemas elásticos e inelásticos es prácticamente la misma. El punto N' puede ser tomado de manera conservadora igual al punto N, o bien puede usarse el valor dado por la Ecuación 5.1 para pasar de N a N', este valor depende del tipo de relación fuerza deformación, la ductilidad y el amortiguamiento considerado

$$S'_a(f = 30cps) = a_1(\xi + a_2)^{a_3} \mu^{a_4} \quad (5.1)$$

Los valores recomendados para las constantes a_1 a a_4 se muestran en las Tablas 5.1 y 5.2 y en la Tabla 5.3 se comparan los valores obtenidos usando esta expresión con los valores originales. Cuando la ordenada del punto L' resulta menor que la aceleración máxima del suelo A , el punto L' se puede unir directamente con el punto N', ignorando el valor de M'.

Es importante mencionar que los valores de f_{dv} y f_{va} , que limitan las regiones de desplazamiento, velocidad y aceleración, calculados en el capítulo 4 (sección 2) no son relevantes al momento de construir el espectro de diseño (elástico o inelástico), ya que ahora la intersección entre estas zonas queda

determinada automáticamente por las frecuencias correspondientes a los puntos K y L (K' y L' en el caso inelástico).

El procedimiento anterior, tanto para la construcción del espectro elástico, como inelástico, está derivado utilizando los valores promedio para los factores de amplificación ψ_μ y reducción ϕ_μ , presentados en el Capítulo 4, pero si se desea hacer una estimación mucho más conservadora del espectro de diseño, podemos usar factores con menores probabilidades de excedencia. En este sentido lo que importa son los factores $\psi_{p\mu}$ asociados al percentil p , de modo que la probabilidad de que la amplificación de la respuesta no exceda el valor $\psi_{p\mu}$ sea p . Si se asume que los datos tienen distribución normal, los factores de amplificación asociados a un percentil p se calculan de la siguiente manera

$$\psi_{p\mu} = \psi_\mu + \delta_p \sigma_\mu \quad (5.2)$$

donde el coeficiente δ_p , que indica la desviación con respecto de la media, se puede obtener de tablas de probabilidad normal estándar. Por ejemplo, δ_p es igual a 0, 1 y 2 para p igual a 0,5; 0,841 y 0,977; respectivamente, y los factores $\psi_{p\mu}$ asociados corresponden a los valores del percentil 50, percentil 84,1 y percentil 97,7. Es común que para el diseño de estructuras de edificación se utilicen valores asociados al percentil 50, sin embargo en obras especiales puede ser recomendable un valor mas conservador como el percentil 84,1.

Si se desea realizar lo mismo pero aplicando los factores de reducción $\phi_{p\mu}$, que corresponderían a un nivel de probabilidad de p , podemos obtener dichos factores de la siguiente manera

$$\phi_{p\mu} = \frac{\psi_\mu + \delta_p \sigma_\mu}{\psi_{\mu=1} + \delta_p \sigma_{\mu=1}} \quad (5.3)$$

o también

$$\phi_{p\mu} = \frac{(1 + \delta_p \Omega_\mu)}{(1 + \delta_p \Omega_{\mu=1})} \phi_\mu \quad (5.4)$$

Para valores de δ_p entre 0 y 1, la diferencia entre $\phi_{p\mu}$ y ϕ_μ no es significativa. Particularmente, para el nivel de probabilidad recomendado de 84,1%, es decir, $\delta_p=1$, el factor de corrección

$$\lambda_\mu = \frac{(1 + \delta_p \Omega_\mu)}{(1 + \delta_p \Omega_{\mu=1})} \quad (5.5)$$

es en general cercano a 1.

5.2 Conclusiones

En este estudio se han presentado nuevos factores que permiten obtener espectros de diseño para estimar los esfuerzos máximos en un sistema estructural, pero esta vez ampliando el rango de amortiguamiento para así tener en consideración un campo más amplio de sistemas estructurales. Ya que debido a nuevas tecnologías no es extraño observar estructuras que poseen sistemas de disipación de energía que permiten aumentar el amortiguamiento de la estructura, y por lo tanto los métodos clásicos de análisis y diseño deben ser adaptados para así tener en consideración esta nueva propiedad. Una alternativa es mediante el cálculo de factores de amplificación, ψ (o reducción ϕ) que permiten la construcción del espectro de diseño inelástico a partir de los parámetros máximos del movimiento del suelo (A , V y D), según diferentes condiciones de amortiguamiento, y dependiendo de la ductilidad que se desea alcanzar.

Es importante destacar que al ampliar el rango de amortiguamiento considerado para obtener la respuesta de un sistema estructural, se mantienen ciertas ventajas tales como la simplicidad del procedimiento tradicional de Veletsos, Newmark y Hall para obtener una estimación de la respuesta inelástica

de un sistema de 1gdl. Además la respuesta máxima de los diferentes sistemas estructurales (representados por su frecuencia natural de vibración, y considerando diferentes grados de amortiguamiento) mantiene una correlación bastante buena con la con los parámetros de movimiento máximo del suelo en cada una de las zonas espectrales (aceleración, velocidad y desplazamiento). Otra ventaja que se mantiene es que tampoco es necesario llevar a cabo un procedimiento iterativo en el cálculo de la respuesta, ya que esta se puede leer directamente del espectro de diseño.

Además de las ventajas anteriores, existen otras más derivadas de este estudio. En primer lugar quedó demostrado que el efecto del amortiguamiento en el cálculo de la respuesta del sistema estructural de 1gdl es importante y no se puede omitir esta consideración al estimar la respuesta inelástica de un sistema considerando los factores tradicionales (obtenidos para un 5% del amortiguamiento crítico), ya que de ser así se llegaría a resultados muy diferentes, esto es independiente de la relación fuerza-deformación considerada para obtener la respuesta del sistema estructural. Por otra parte se demostró que de las tres relaciones constitutivas de fuerza-deformación consideradas (elastoplástico, bilineal, y bilineal con degradación de rigidez), la respuesta del sistema elastoplástico (representada por los factores de amplificación y reducción obtenidos) sigue siendo conservadora en la gran mayoría de los casos analizados, y además se asemeja considerablemente a las respuestas obtenidas con los otros dos sistemas, por lo tanto presenta una gran ventaja debido a la simplicidad de este modelo, por lo que es posible utilizarla de manera general.

En síntesis, se han obtenido nuevas reglas para obtener factores de amplificación (y reducción) que aplicadas a la respuesta máxima del suelo, permiten la construcción de espectros de respuesta considerando el efecto combinado del amortiguamiento y el comportamiento inelástico para un sistema de 1gdl. Las reglas propuestas en este estudio además de ser consecuentes con

estudios anteriores (siendo incluso mejores), pueden ser utilizadas de forma general, ya que se han considerado diferentes relaciones de fuerza-deformación y se han diferenciado los rangos de frecuencias (zonas espectrales) en los que se pueden aplicar. Finalmente la gran ventaja es que se puede mantener el procedimiento clásico para la obtención de espectros de diseño elástico e inelástico para sistemas de 1gdl, pero ampliando el rango de amortiguamiento que se puede considerar, desde un 0% a un 100%. Lo anterior es bastante atractivo y permite considerar incluso la posibilidad de incluirlas en códigos para el diseño sísmico.

Tabla 5.1 Coeficientes para obtener valores promedio de ordenadas espectrales para $f=30\text{cps}$, según ecuación 5.1, espectros normalizados a aceleración máxima del suelo.

Relacion Fuerza-Deformación	Coeficiente	Amortiguamiento considerado para el ajuste			
		0-100%	0%	2% - 20%	50% - 100%
Elastoplastico	a1	3.9223	3.9221	3.0757	4.6856
	a2	-0.3287	-0.3309	-0.2846	-0.3344
	a3	-0.1729	-0.1407	-0.1211	-0.2864
	a4	42.3648	42.3648	42.4768	42.2656
	R^2	0.9037	0.9510	0.9644	0.9889
Bilineal	a1	4.8755	4.8750	4.0077	5.6304
	a2	-0.3702	-0.3800	-0.3407	-0.3627
	a3	-0.2230	-0.1699	-0.1628	-0.3567
	a4	46.3091	46.3091	46.4573	46.3606
	R^2	0.8963	0.9380	0.9613	0.9828
Degradación de Rigidez	a1	7.0396	7.0388	6.1772	7.9724
	a2	-0.4377	-0.4597	-0.4237	-0.4236
	a3	-0.1988	-0.1119	-0.1401	-0.3438
	a4	62.0887	62.0887	62.2896	62.1066
	R^2	0.8685	0.9806	0.9498	0.9794

Tabla 5.2 Coeficientes para obtener valores promedio + 1 desviación estándar de ordenadas espectrales para $f=30\text{cps}$, según ecuación 5.1, espectros normalizados a aceleración máxima del suelo.

Relacion Fuerza-Deformación	Coeficiente	Amortiguamiento considerado para el ajuste			
		0-100%	0%	2% - 20%	50% - 100%
Elastoplastico	a1	1.3256	1.4136	1.2137	2.0182
	a2	-0.0867	-0.0130	-0.0662	-0.1640
	a3	-0.1447	-0.2189	-0.0915	-0.2124
	a4	1.8824	1.8769	4.8283	4.8174
	R^2	0.8671	0.8905	0.9748	0.9885
Bilineal	a1	1.5689	1.5795	1.3203	2.1883
	a2	-0.1247	-0.0934	-0.0870	-0.1736
	a3	-0.1887	-0.2198	-0.1337	-0.2806
	a4	6.6596	6.6593	6.6764	6.6659
	R^2	0.8628	0.7964	0.9645	0.9828
Degradación de Rigidez	a1	2.0645	2.0631	1.8239	2.5913
	a2	-0.1843	-0.1932	-0.1657	-0.2042
	a3	-0.1681	-0.1291	-0.1218	-0.2712
	a4	20.9288	20.9288	20.9428	20.9292
	R^2	0.8966	0.9175	0.9623	0.9807

Tabla 5.3 Ordenadas espectrales para $f=30\text{cps}$ para espectros normalizados a aceleración máxima del suelo, comparación de valores reales y valores obtenidos según ecuación 5.1.

Duct μ	Amort β	Elastoplástico		Elastoplástico + 1DE		Bilineal		Bilineal + 1DE		Degr de Rigidez		Degr de Rigidez +1DE	
		S_a	S'_a	S_a	S'_a	S_a	S'_a	S_a	S'_a	S_a	S'_a	S_a	S'_a
1.5	0.0	1.1062	1.0722	1.3789	1.2830	1.1084	1.0596	1.3662	1.2104	1.0243	1.0084	1.1326	1.0879
2	0.0	1.0186	1.0297	1.1890	1.2047	0.9824	1.0090	1.0825	1.1362	0.9649	0.9765	1.0265	1.0482
3	0.0	0.9478	0.9726	1.0450	1.1024	0.9192	0.9419	0.9723	1.0393	0.9246	0.9332	0.9685	0.9948
5	0.0	0.8968	0.9051	0.9446	0.9857	0.8580	0.8636	0.9047	0.9290	0.8839	0.8813	0.9265	0.9313
10	0.0	0.8358	0.8210	0.8963	0.8470	0.7817	0.7677	0.8444	0.7977	0.8184	0.8156	0.8663	0.8516
1.5	2.0	0.9777	0.9945	1.0359	1.0298	0.9723	1.0362	1.0283	1.0362	0.9728	0.9999	1.0253	1.0331
2	2.0	0.9473	0.9604	0.9959	1.0030	0.9389	0.9971	0.9841	0.9971	0.9423	0.9604	0.9856	0.9975
3	2.0	0.9142	0.9144	0.9575	0.9665	0.8962	0.9445	0.9386	0.9445	0.9075	0.9073	0.9461	0.9494
5	2.0	0.8702	0.8596	0.9222	0.9224	0.8410	0.8821	0.8919	0.8821	0.8640	0.8447	0.9064	0.8922
10	2.0	0.8150	0.7904	0.8779	0.8657	0.7590	0.8040	0.8227	0.8040	0.7932	0.7665	0.8405	0.8200
1.5	5.0	0.9587	0.9762	0.9940	1.0052	0.9532	1.0098	0.9879	1.0098	0.9573	0.9807	0.9922	1.0122
2	5.0	0.9316	0.9428	0.9662	0.9791	0.9221	0.9717	0.9559	0.9717	0.9287	0.9420	0.9620	0.9774
3	5.0	0.8959	0.8976	0.9395	0.9435	0.8792	0.9204	0.9207	0.9204	0.8920	0.8900	0.9293	0.9303
5	5.0	0.8523	0.8438	0.9068	0.9004	0.8205	0.8596	0.8757	0.8596	0.8445	0.8285	0.8865	0.8742
10	5.0	0.7856	0.7758	0.8565	0.8451	0.7275	0.7835	0.7919	0.7835	0.7621	0.7518	0.8111	0.8034
1.5	10.0	0.9462	0.9488	0.9742	0.9782	0.9403	0.9790	0.9685	0.9790	0.9444	0.9514	0.9720	0.9831
2	10.0	0.9156	0.9163	0.9503	0.9528	0.9059	0.9420	0.9404	0.9420	0.9133	0.9138	0.9452	0.9493
3	10.0	0.8765	0.8724	0.9231	0.9181	0.8578	0.8923	0.9040	0.8923	0.8716	0.8634	0.9110	0.9035
5	10.0	0.8252	0.8201	0.8845	0.8762	0.7915	0.8334	0.8509	0.8334	0.8152	0.8037	0.8597	0.8490
10	10.0	0.7469	0.7540	0.8236	0.8224	0.6841	0.7596	0.7486	0.7596	0.7163	0.7294	0.7706	0.7803

S_a : Valor obtenido del análisis estadístico

S'_a : Valor obtenido usando la expresión de la ecuación 5.1

Tabla 5.3 (Continuación).

Duct μ	Amort β	Elastoplástico		Elastoplástico + 1DE		Bilineal		Bilineal + 1DE		Degr de Rigidez		Degr de Rigidez + 1DE	
		S_a	S'_a	S_a	S'_a	S_a	S'_a	S_a	S'_a	S_a	S'_a	S_a	S'_a
1.5	20.0	0.9269	0.9028	0.9583	0.9454	0.9213	0.9397	0.9526	0.9397	0.9246	0.9006	0.9552	0.9385
2	20.0	0.8910	0.8719	0.9319	0.9208	0.8802	0.9043	0.9210	0.9043	0.8879	0.8650	0.9250	0.9062
3	20.0	0.8411	0.8301	0.8958	0.8873	0.8220	0.8565	0.8761	0.8565	0.8370	0.8172	0.8812	0.8626
5	20.0	0.7772	0.7803	0.8461	0.8468	0.7421	0.8000	0.8086	0.8000	0.7652	0.7608	0.8180	0.8105
10	20.0	0.6837	0.7175	0.7677	0.7948	0.6164	0.7292	0.6877	0.7292	0.6444	0.6904	0.7054	0.7449
1	50.0	0.9967	1.0318	1.0152	1.0468	0.9959	1.0738	1.0148	1.0858	0.9967	1.0800	1.0152	1.0855
1.5	50.0	0.8789	0.9187	0.9267	0.9604	0.8733	0.9292	0.9198	0.9691	0.8790	0.9395	0.9232	0.9724
2	50.0	0.8274	0.8460	0.8878	0.9035	0.8159	0.8386	0.8772	0.8939	0.8264	0.8510	0.8806	0.8994
3	50.0	0.7577	0.7533	0.8330	0.8289	0.7386	0.7257	0.8111	0.7978	0.7552	0.7403	0.8197	0.8058
5	50.0	0.6737	0.6508	0.7608	0.7437	0.6385	0.6048	0.7217	0.6913	0.6583	0.6210	0.7327	0.7015
10	50.0	0.5516	0.5336	0.6615	0.6419	0.4872	0.4723	0.5805	0.5691	0.5059	0.4893	0.5938	0.5813
1	100.0	0.9539	0.8927	1.0037	0.9413	0.9535	0.9228	1.0028	0.9729	0.9539	0.9238	1.0037	0.9735
1.5	100.0	0.8147	0.7948	0.8802	0.8636	0.8093	0.7985	0.8743	0.8683	0.8153	0.8036	0.8799	0.8721
2	100.0	0.7472	0.7320	0.8265	0.8124	0.7376	0.7206	0.8163	0.8010	0.7490	0.7279	0.8225	0.8066
3	100.0	0.6637	0.6517	0.7547	0.7453	0.6481	0.6236	0.7358	0.7148	0.6593	0.6332	0.7445	0.7226
5	100.0	0.5617	0.5630	0.6709	0.6687	0.5314	0.5197	0.6335	0.6194	0.5409	0.5312	0.6405	0.6291
10	100.0	0.4372	0.4617	0.5504	0.5771	0.3737	0.4059	0.4767	0.5099	0.3843	0.4186	0.4877	0.5213

S_a : Valor obtenido del análisis estadístico

S'_a : Valor obtenido usando la expresión de la ecuación 5.1

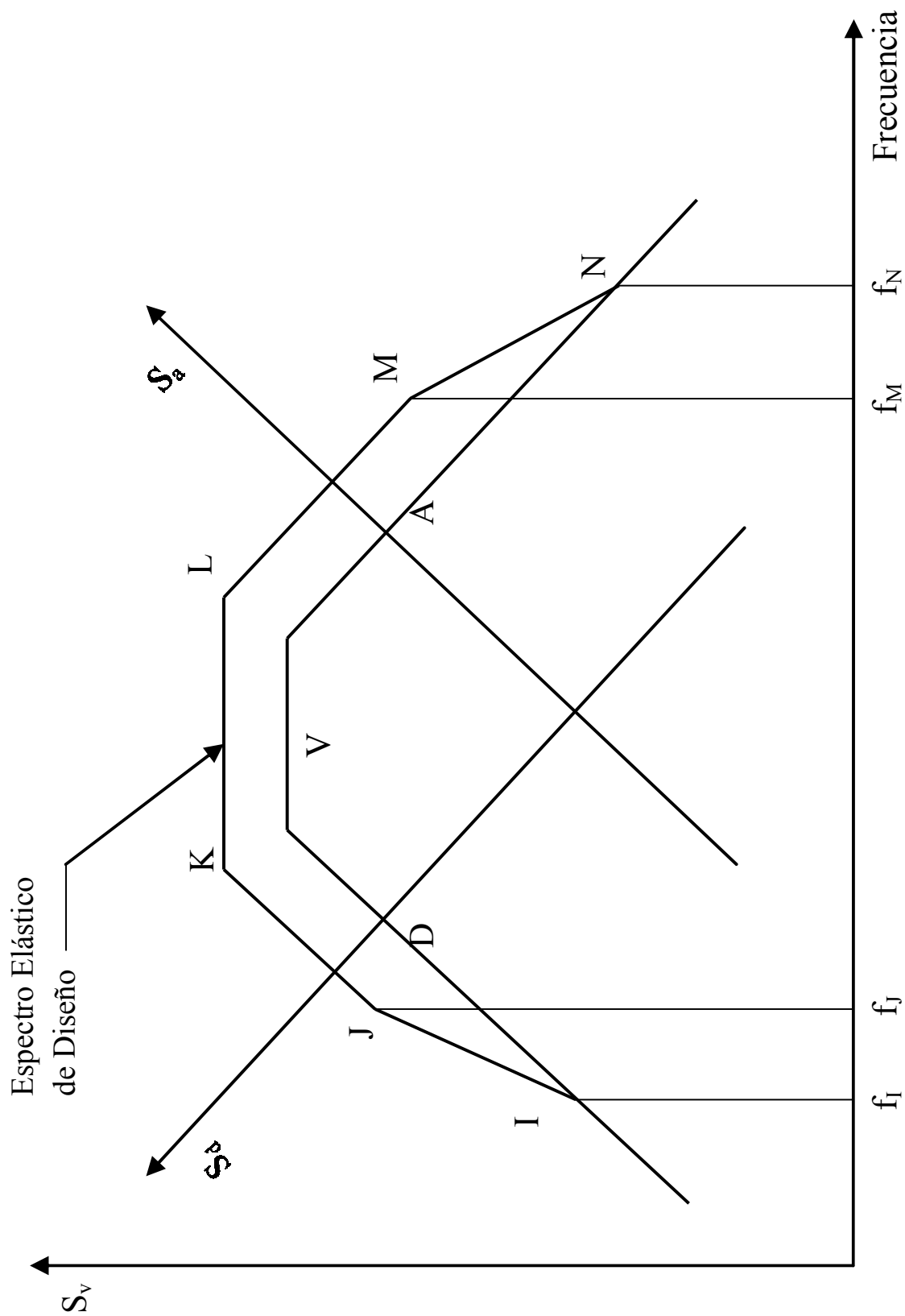


Figura 5.1 Construcción del espectro de diseño elástico (Riddell, 1979).

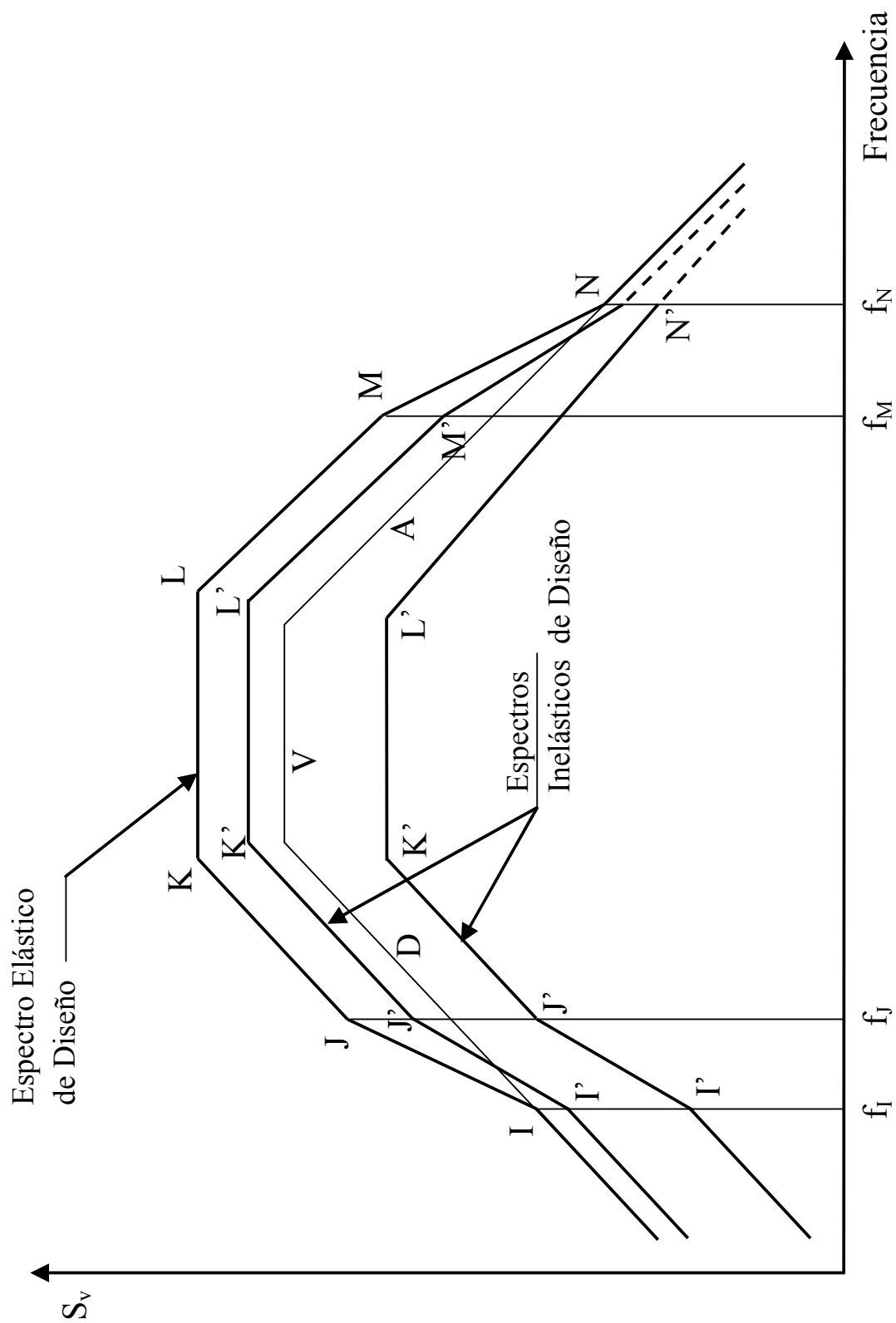


Figura 5.2 Construcción del espectro de diseño inelástico (Riddell, 1979).

BIBLIOGRAFIA

Ang, A. y Tang W., “Probability concepts in engineering – Emphasis on applications to civil and environmental engineering” second edition.

Chopra, A.K., (1995) “Dynamics of structures”. Prentice-Hall Inc.: Englewood Cliffs, NJ.

Draper, N. y Smith., (1998) “Applied regression analysis” third edition.

FEMA-273. *NEHRP* “Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings”. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1997.

FEMA-2000. *NEHRP* “Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures”. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000.

Garcés, E. y Riddell, R., (2000) “Análisis de Espectros de Respuesta Inelástica Considerando la Distancia a la Fuente”. Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad Católica de Chile.

García, E. y Riddell, R., (1995) “SPEC95 Programa para el cálculo de espectros de respuesta de sistemas inelásticos sometidos a excitación basal”. Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad Católica de Chile.

Hanson, R. y Soong, T., (2001) “Seismic Design With Supplemental energy dissipation devices”. Earthquake Engineering Research Institute.

Instituto Nacional de Normalización, INN-Chile (2003). “Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica”, Norma chilena oficial Nch 2745.Of2003.

Leigh, P. y De la Llera, J.C., (2002) “Aislación sísmica de estructuras en base a sistemas híbridos de goma y aleaciones: análisis, experimentación y diseño”. Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad Católica de Chile.

Lin, Y.-Y., Miranda E. and Chang K.-C., (2005) “Evaluation of damping reduction factors for estimating elastic response of structures with high damping”. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Volumen 34, páginas 1427-1443.

Newmark N., and Hall W., (1969), “Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities”, 4ª Conferencia Mundial en Ingeniería Sísmica, Santiago, Chile. Volúmen II, pags. B4, 37-50.

Newmark N., and Hall W., (1973), “Procedures and Criteria for Earthquake Resistant Design”. Building Practices for Disaster Mitigation. Building Science Series, vol.46. National Bureau of Standards: Washington, DC; 209–236.

Newmark, N. y Hall, W., (1982) “Earthquake spectra and design”. Earthquake Engineering Research Institute. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Pecknold, D.A. y Riddell, R., “Closure to Effects of Initial Base Motion on Response Spectra”, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 105, Diciembre 1979, pp. 1057-1060.

Rice, J., (1995) “Mathematical Statistics and Data Analysis”. University of California, Berkeley.

Riddell R. and Newmark NM., (1979), “Force-deformation models for non-linear analysis”. Journal of the Structural Division, ASCE.

Riddell, R. y Newmark, N.M., (1979) “Statistical analysis of the response of nonlinear systems subjected to earthquakes”, Structural Research Series N° 468, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois.

Riddell, R., (2007) “On ground Motion Intensity Indices”. Earthquake Spectra, Volumen 23, No. 1, páginas 147—173.

Riddell, R., (2008) “Inelastic Response Spectrum: Early History”. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Volumen 37, No. 8, páginas 1175—1183.

Riddell, R., Garcia, J.E. y Garces, E., (2002) “Inelastic deformation response of SDOF systems subjected to earthquakes”, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Journal of the International Association for Earthquake Engineering and of the International Association for Structural Control, Volumen 31, Número 3, páginas 515-538.

Sirve, Sistemas innovativos de reducción de vibraciones en estructuras. Consultado el 15 de Junio de 2010, página web oficina de Ingeniería Estructural, Santiago, Chile., <http://www.sirve.cl/>

Veletsos, A.S. y Newmark, N.M., (1960) “Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions”, 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Japón. Vol. 2, pp. 895-912.

Veletsos, A.S. y Newmark, N.M., (1964) “Response Spectra For Single-Degree-of-Freedom Elastic and Inelastic Systems”, Vol. III of Design Procedures for Shock Isolation Systems of Underground Protective Structures. Report No. RTD-TDR-63-3096, Air Force Weapons Laboratory, Kirkland Air Force Base, Albuquerque, NM.

Veletsos, A.S., Newmark, N.M. y Chelapati, C.V., (1965) "Deformation Spectra for Elastic and Elastoplastic Systems Subjected to Ground Shock And Earthquake Motion". Third World Conference on Earthquake Engineering. Vol. II, p. 663–682, Wellington, Nueva Zelanda.

ANEXOS

ANEXO A: REGISTROS USADOS EN ESTE ESTUDIO

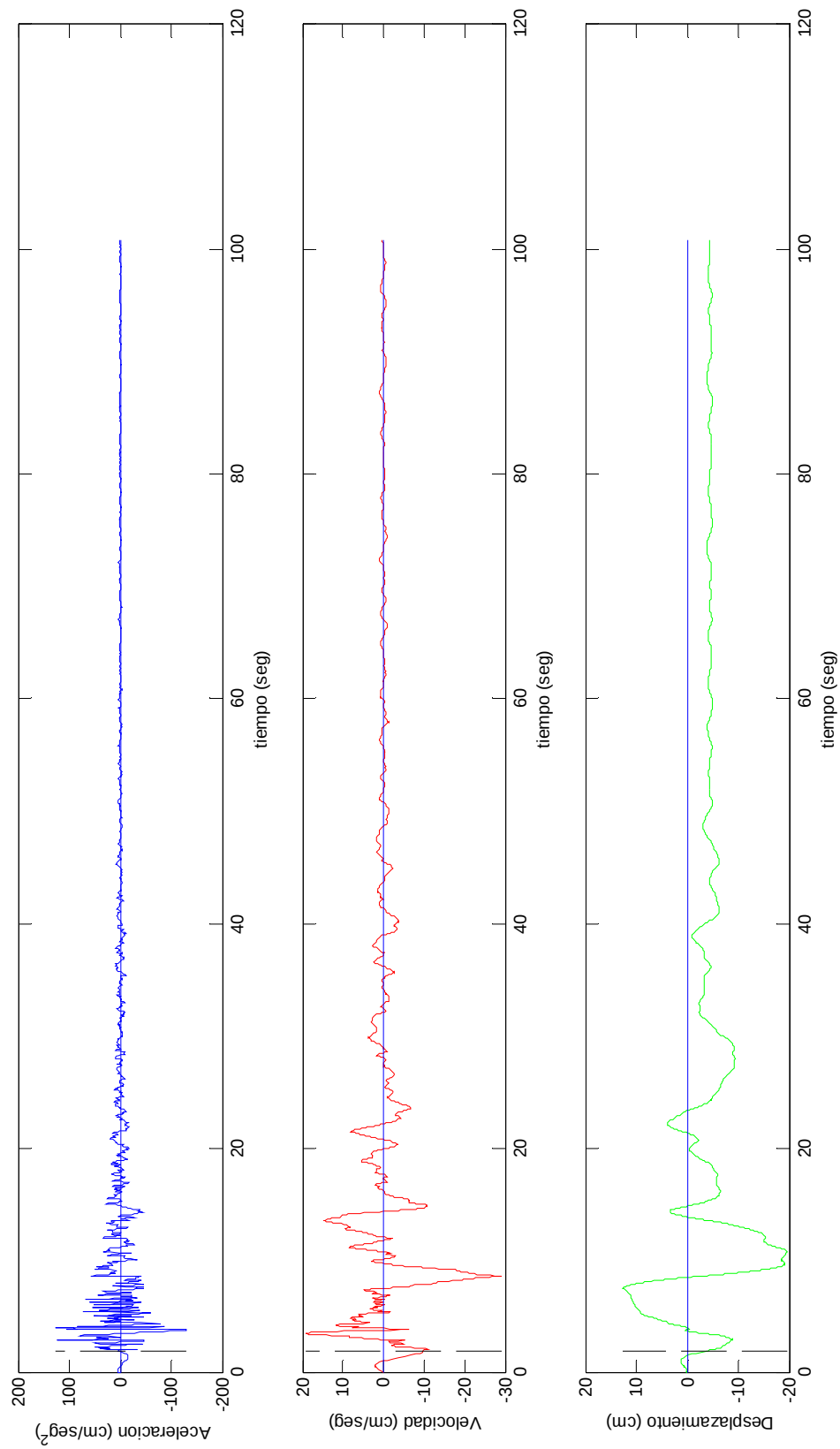


Figura A.1 Registro Cmd Vernon, componente S08w, 10-marzo-1933. Corregido.

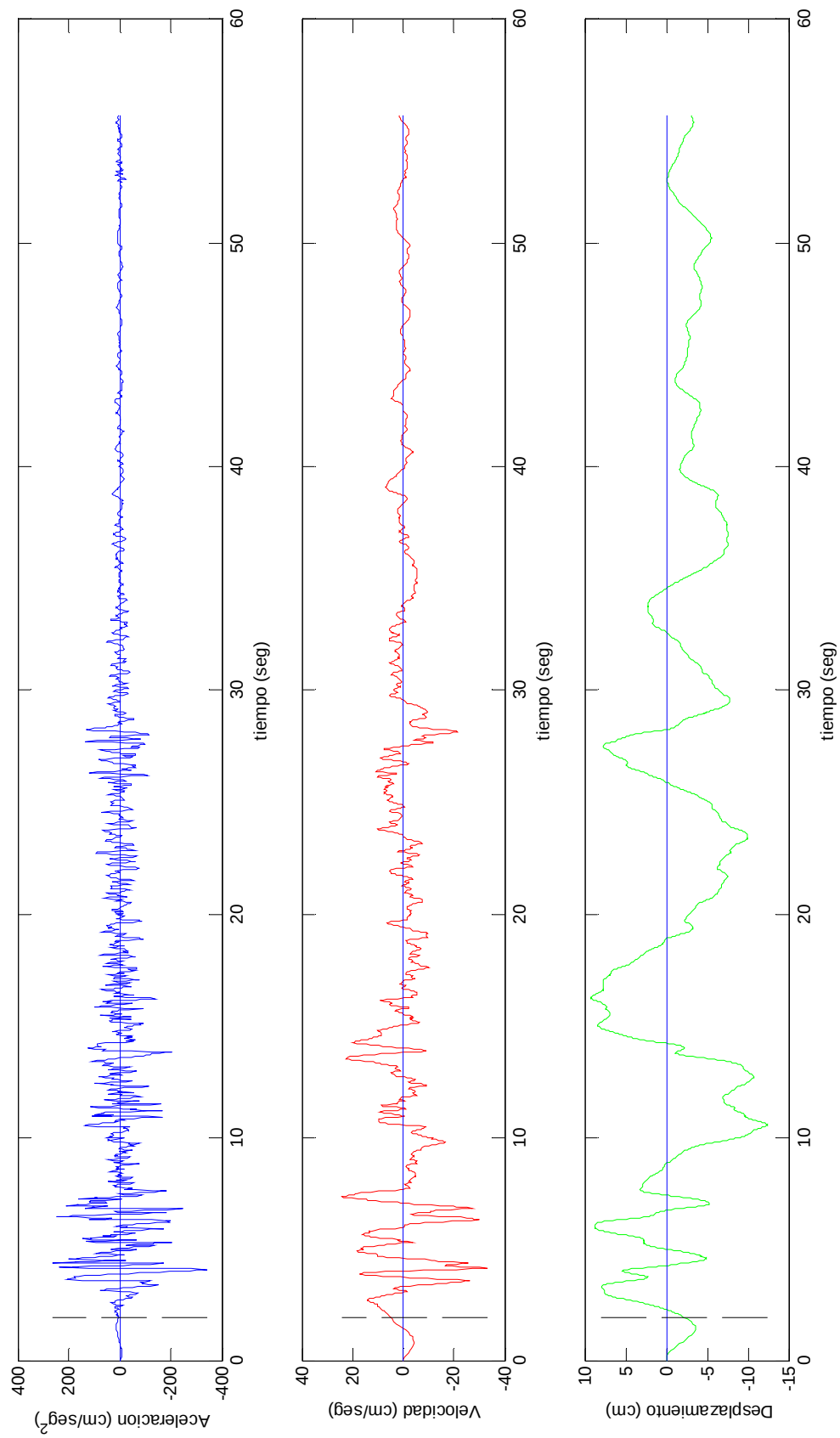


Figura A.2 Registro El Centro, componente S00e, 18-mayo-1940. Corregido.

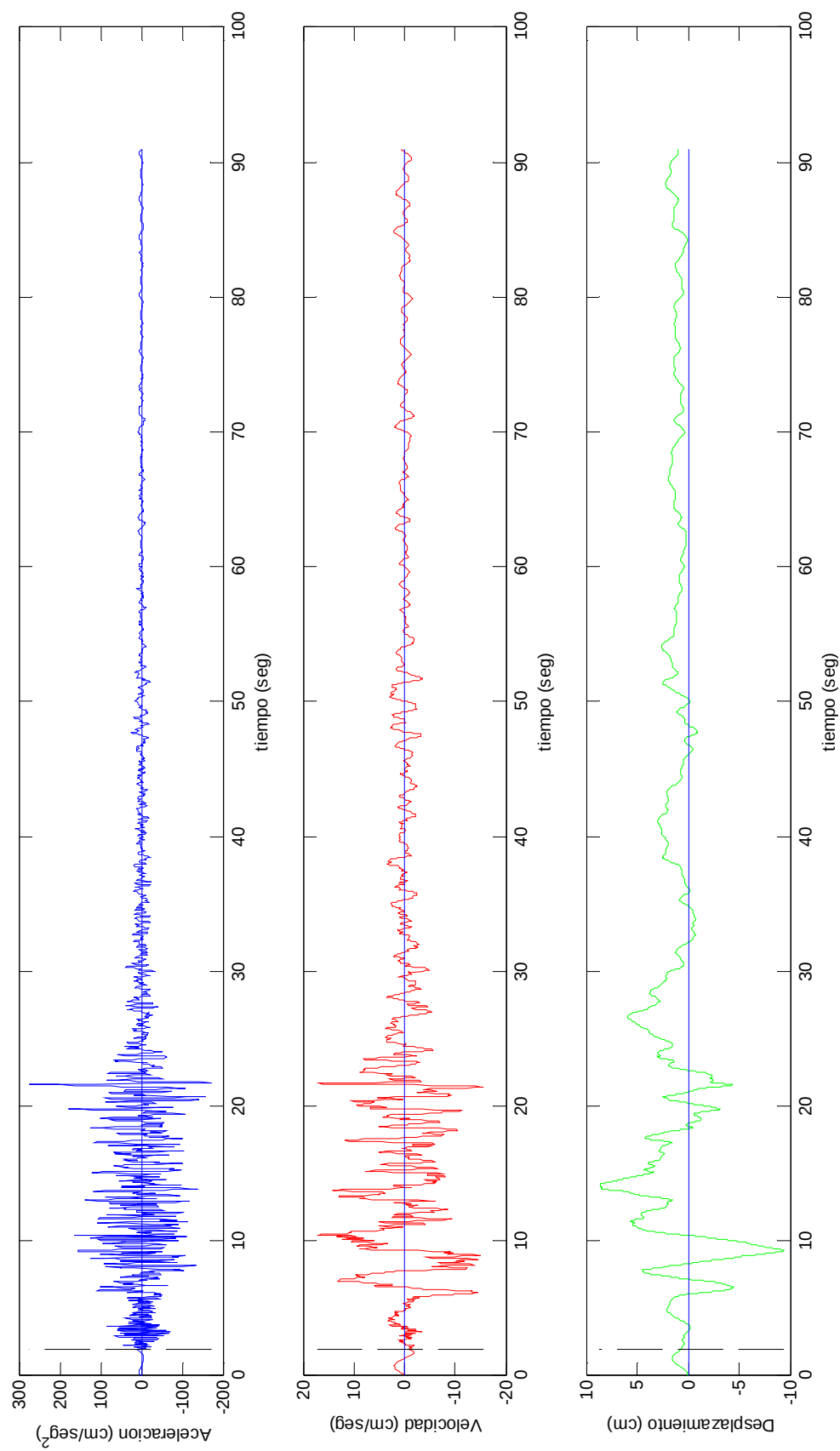


Figura A.3 Registro Olympia, componente N86E, 13-abril-1949. Corregido.

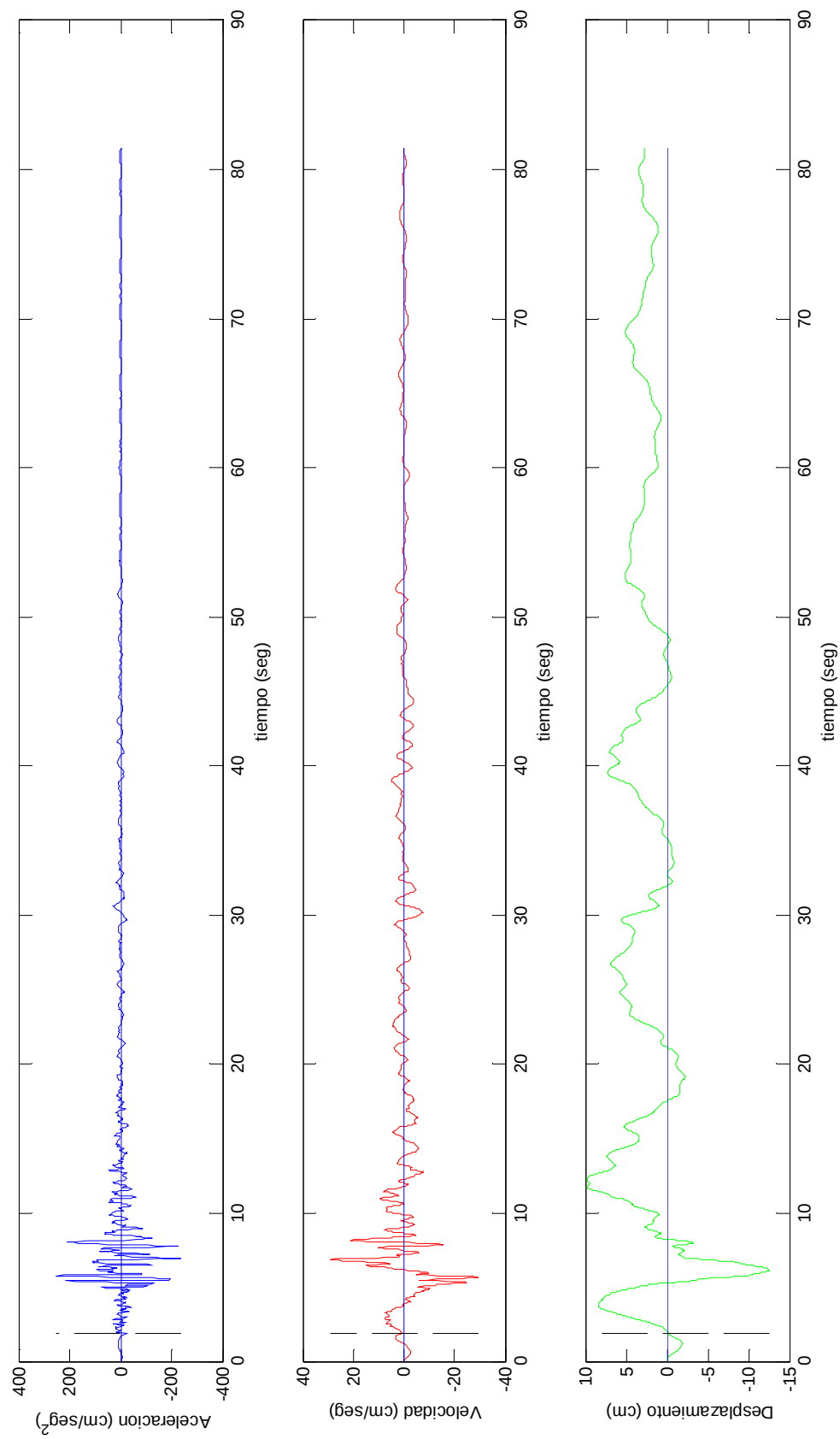


Figura A.4 Registro Eureka, componente N79E, 21-diciembre-1954. Corregido.

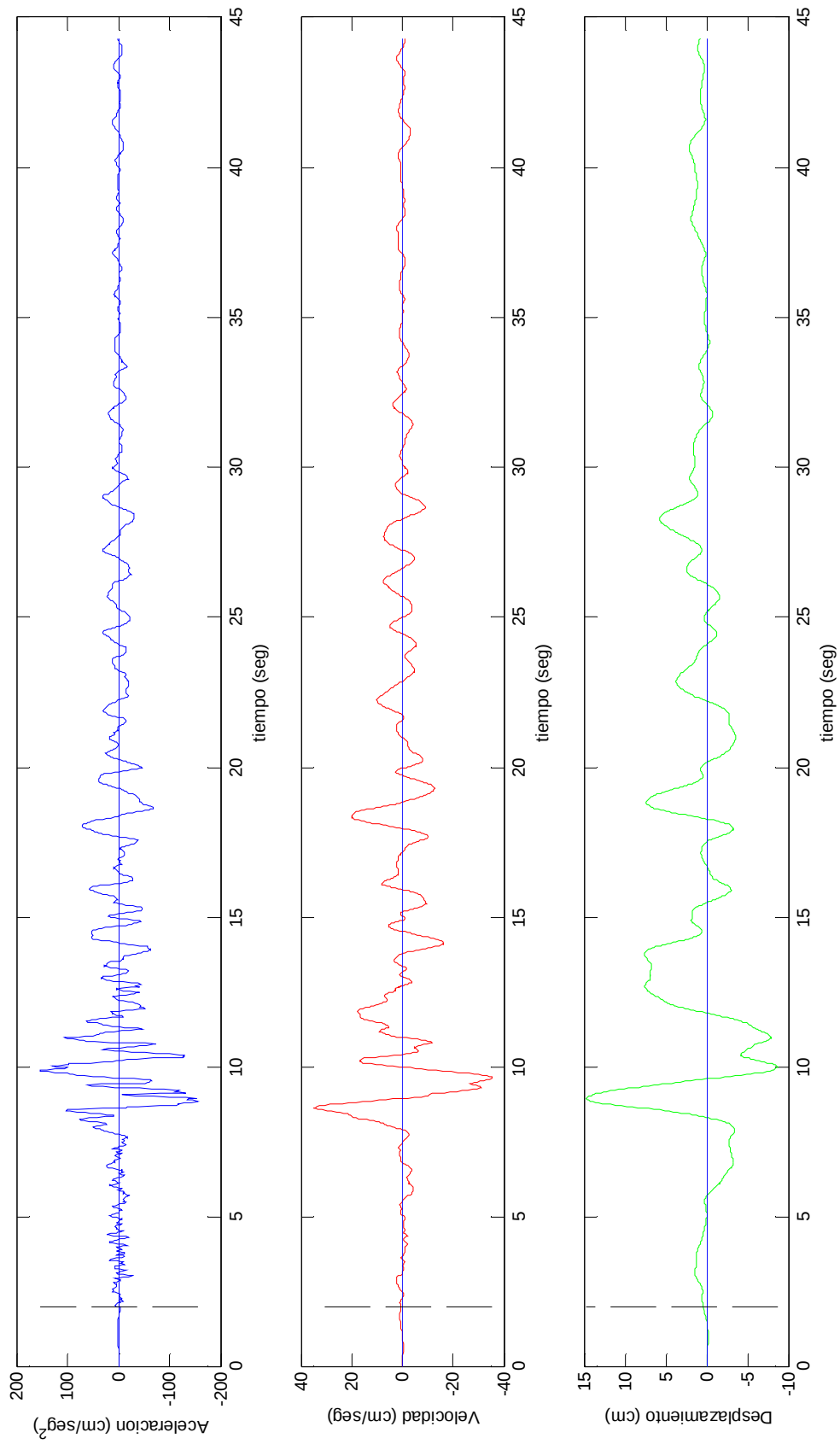


Figura A.5 Registro Ferndale, componente N44E, 21-diciembre-1954. Corregido.

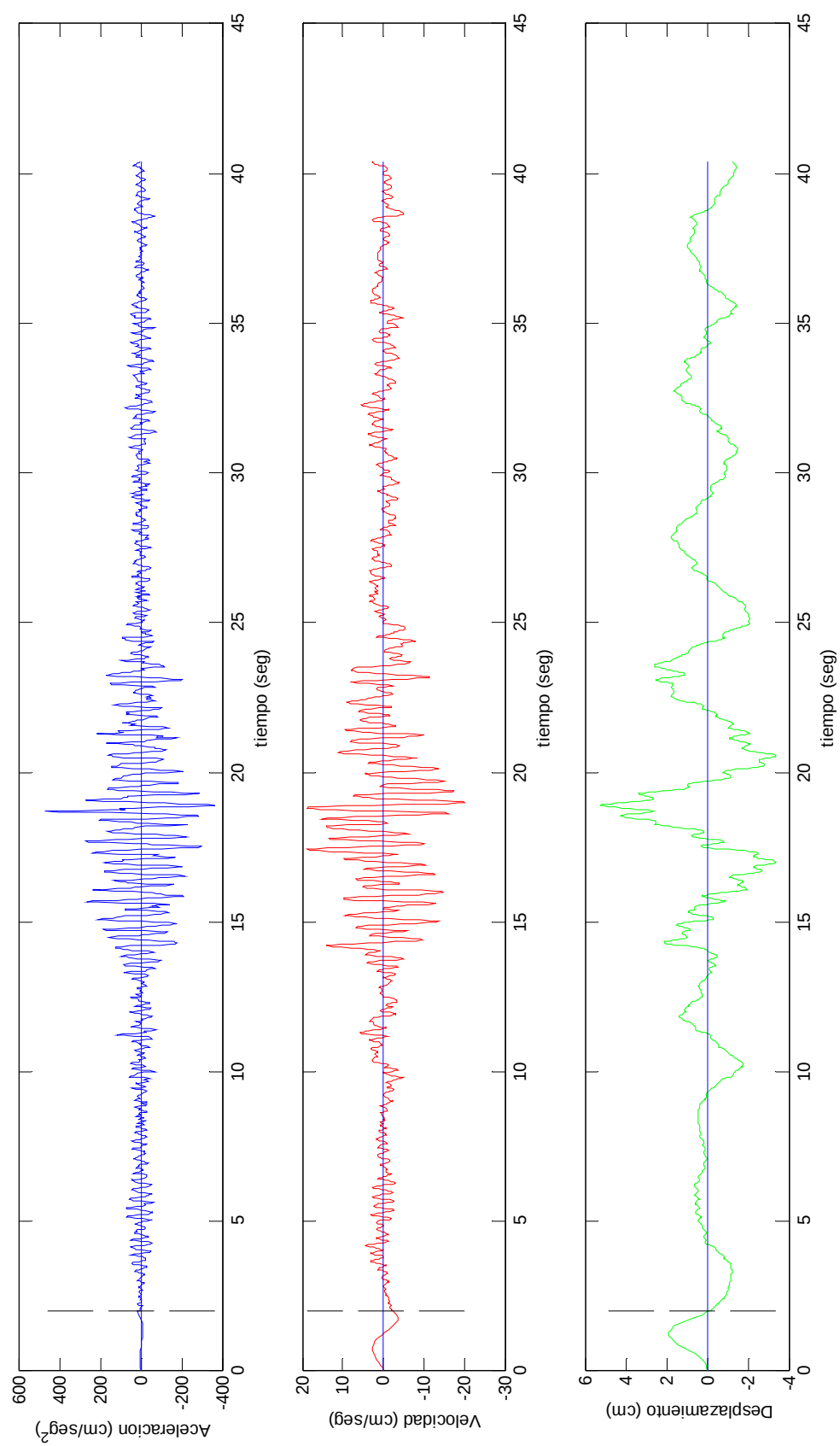


Figura A.6 Registro Kishiro Kisyo-Dai, componente N90E, 23-abril-1962. Corregido.

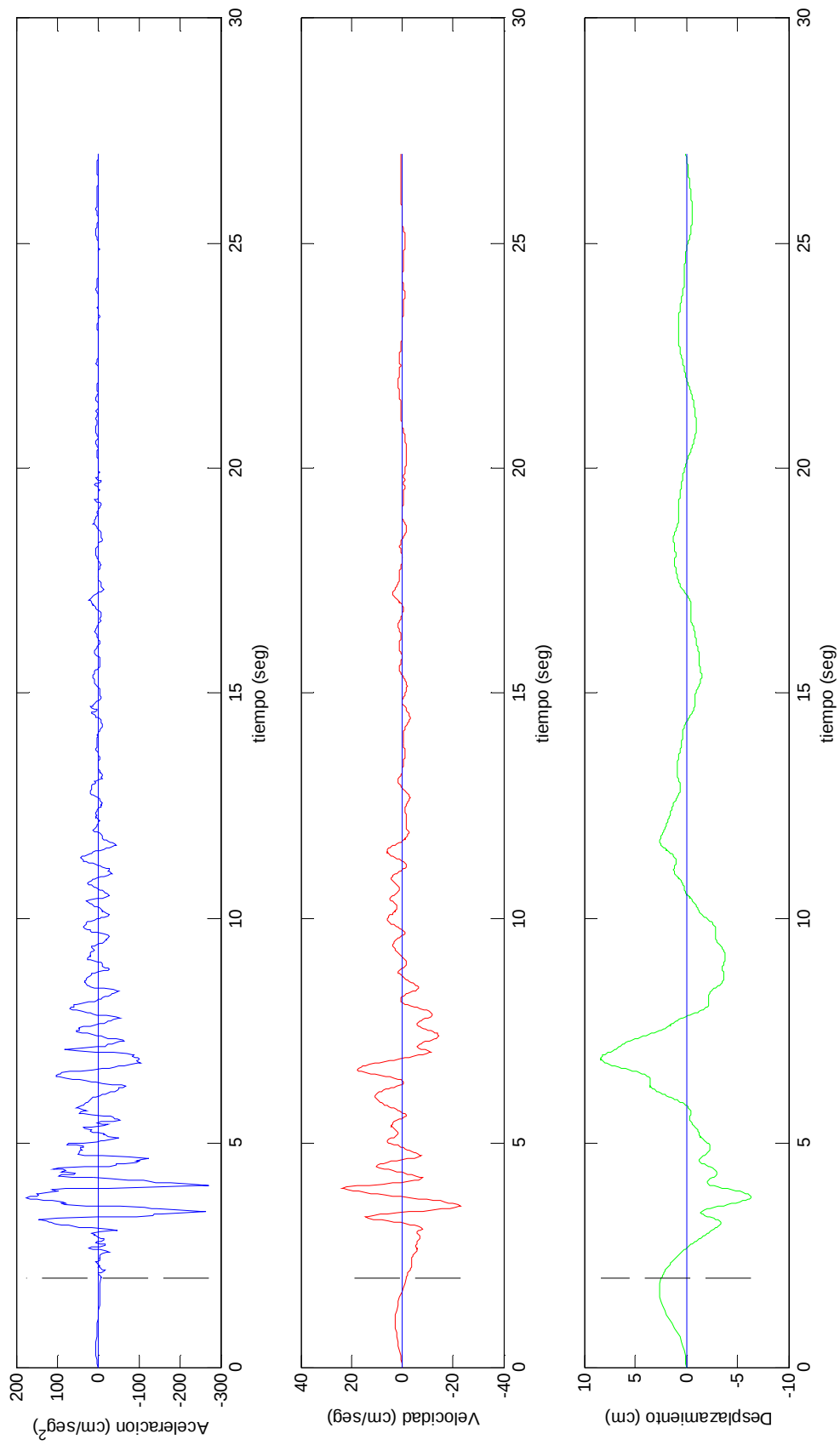


Figura A.7 Registro Ochiai Bridge, componente N00E, 5-abril-1966. Corregido.

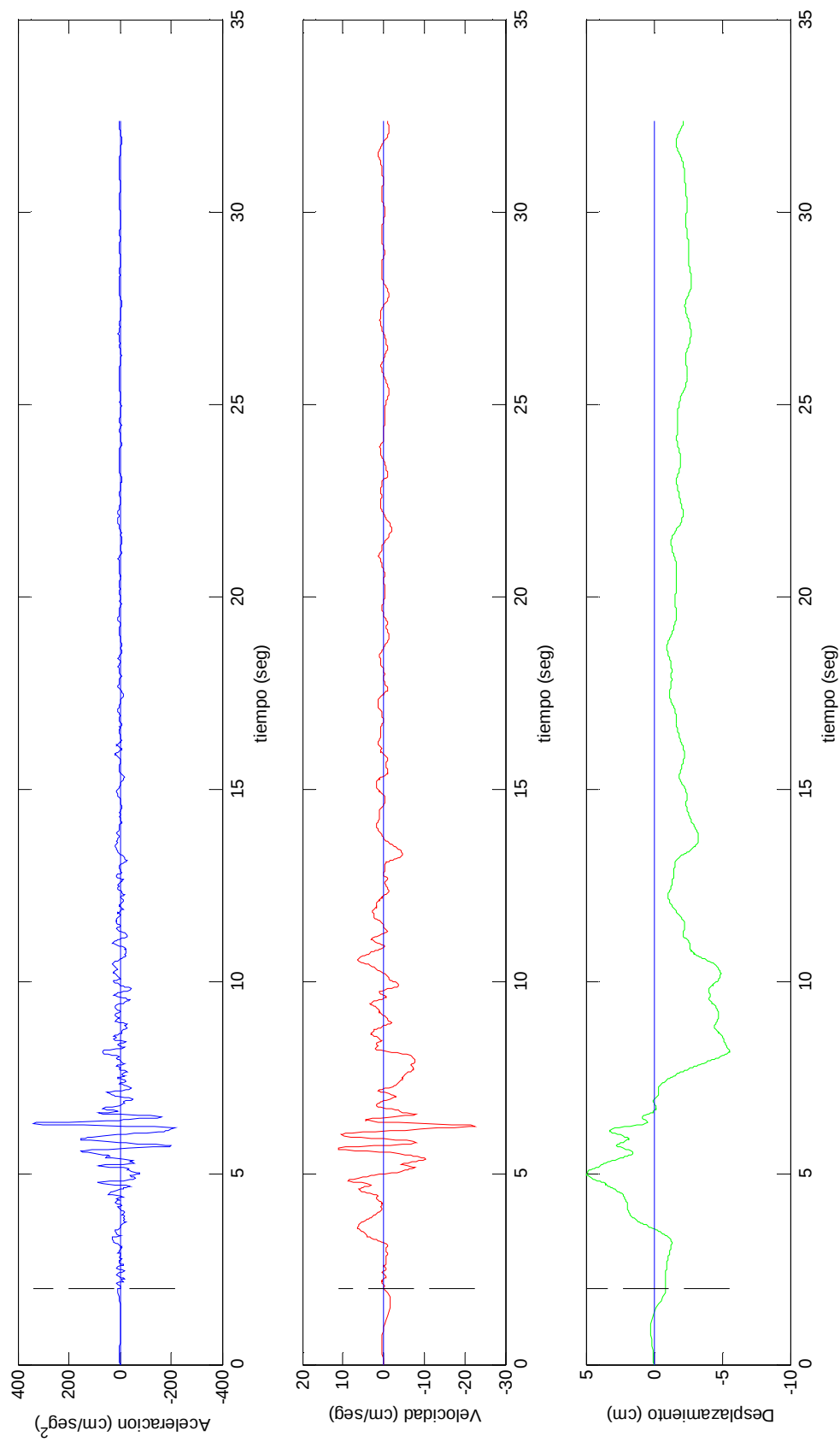


Figura A.8 Registro Temblor, componente S25W, 27-junio-1966. Corregido.

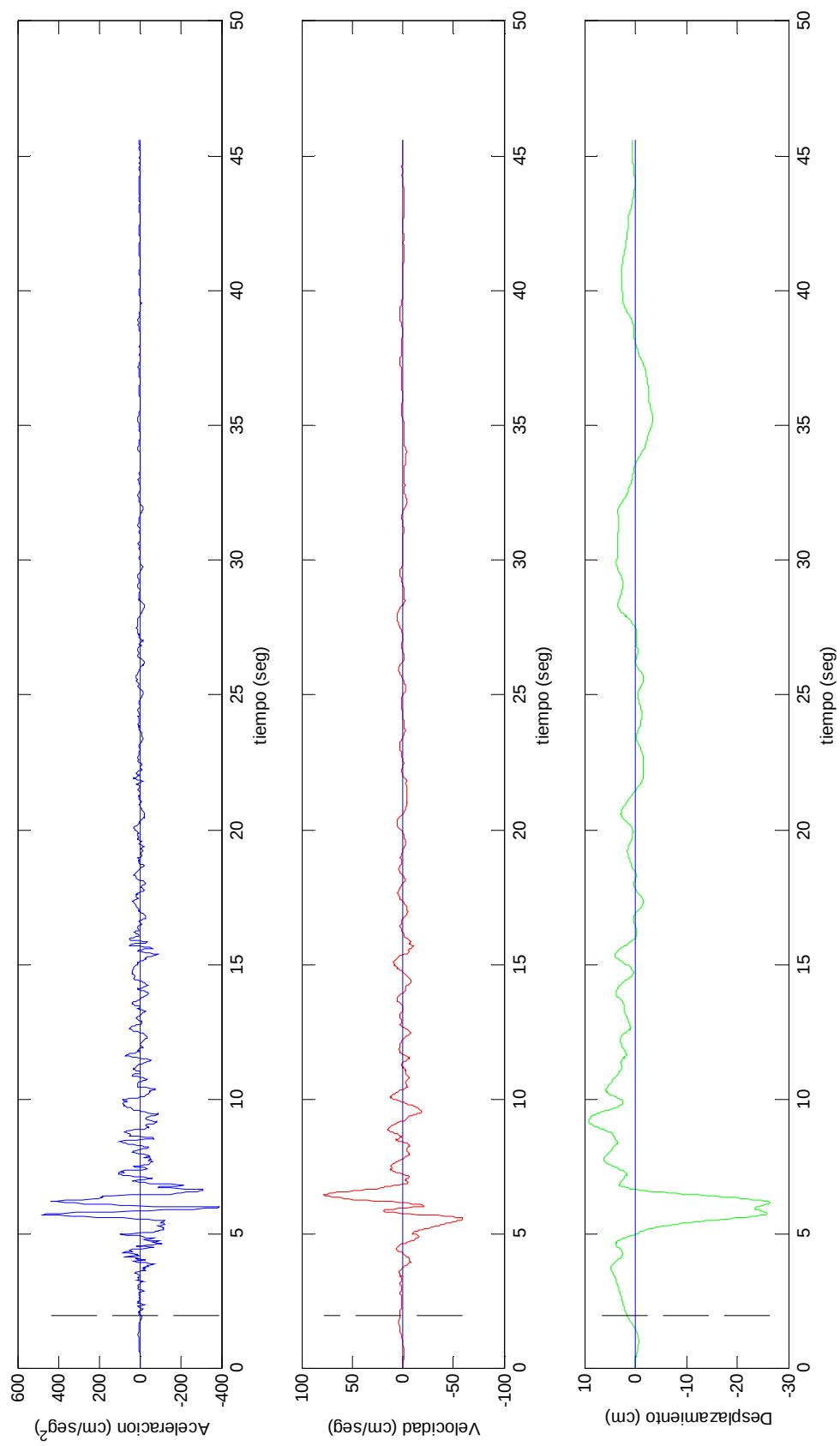


Figura A.9 Registro Cholame N.2, componente N65E, 27-junio-1966. Corregido.

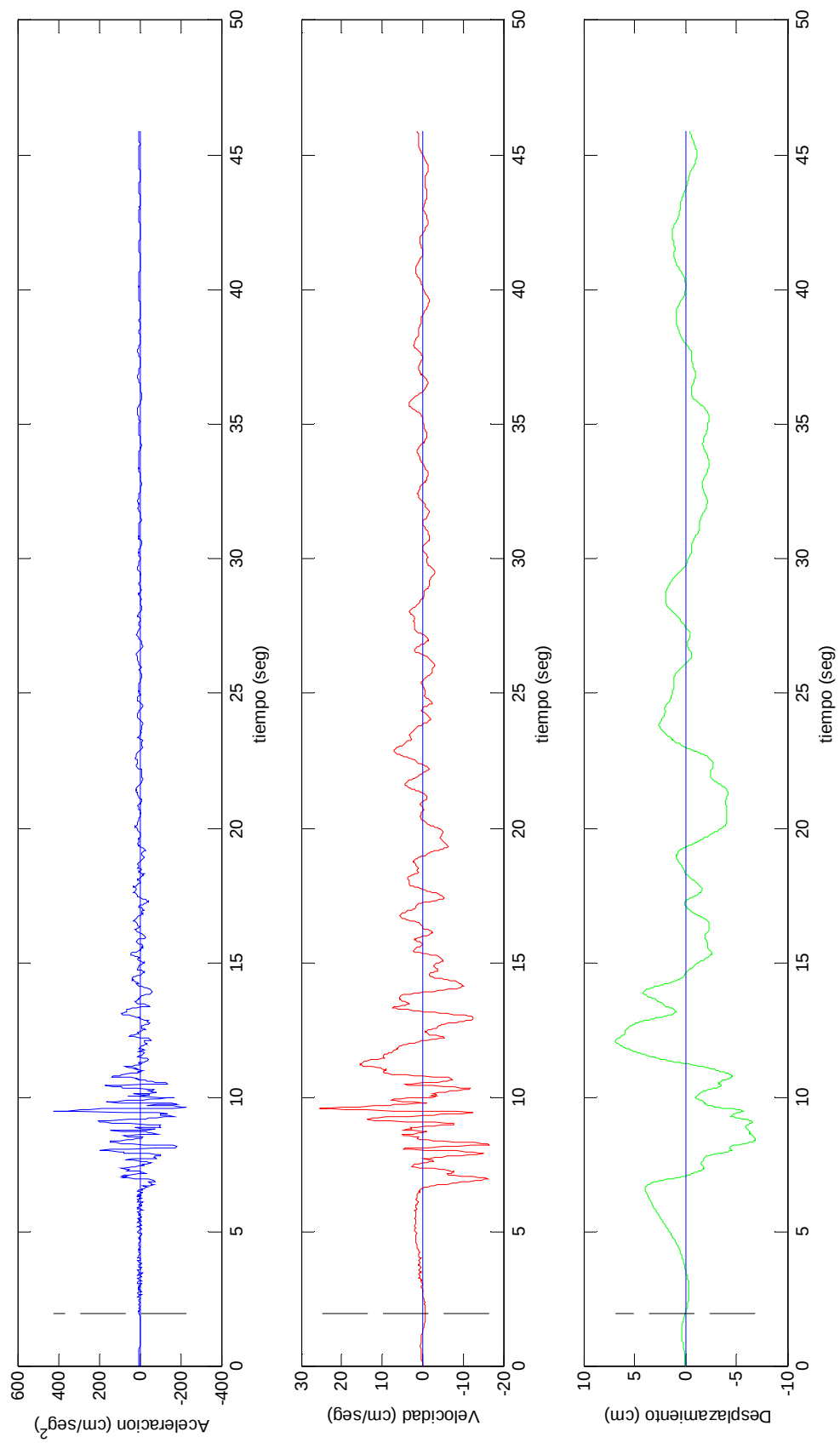


Figura A.10 Registro Cholame N.5, componente N85E, 27-junio-1966. Corregido.

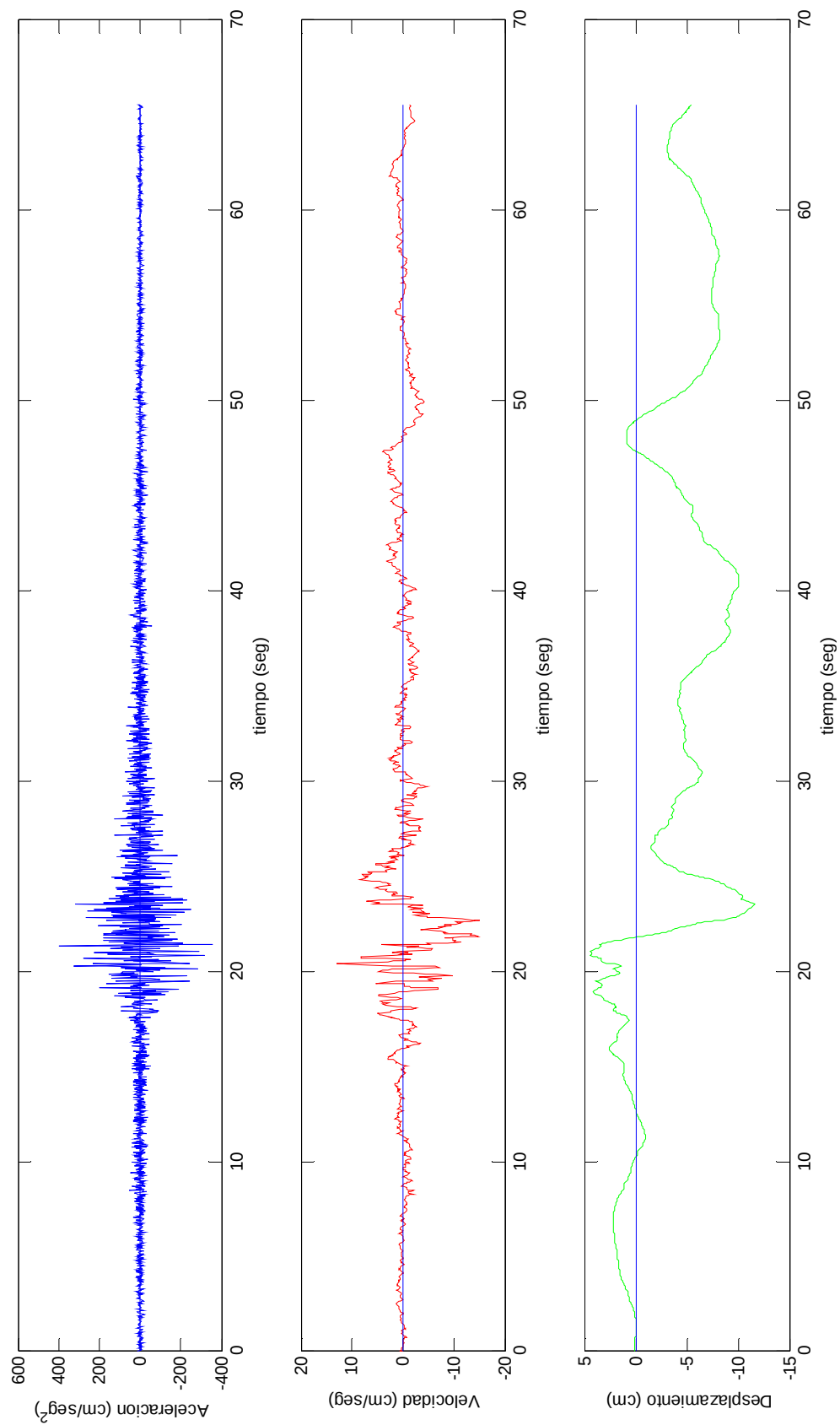


Figura A.11 Registro Lima, componente N08E, 17-octubre-1966. Corregido.

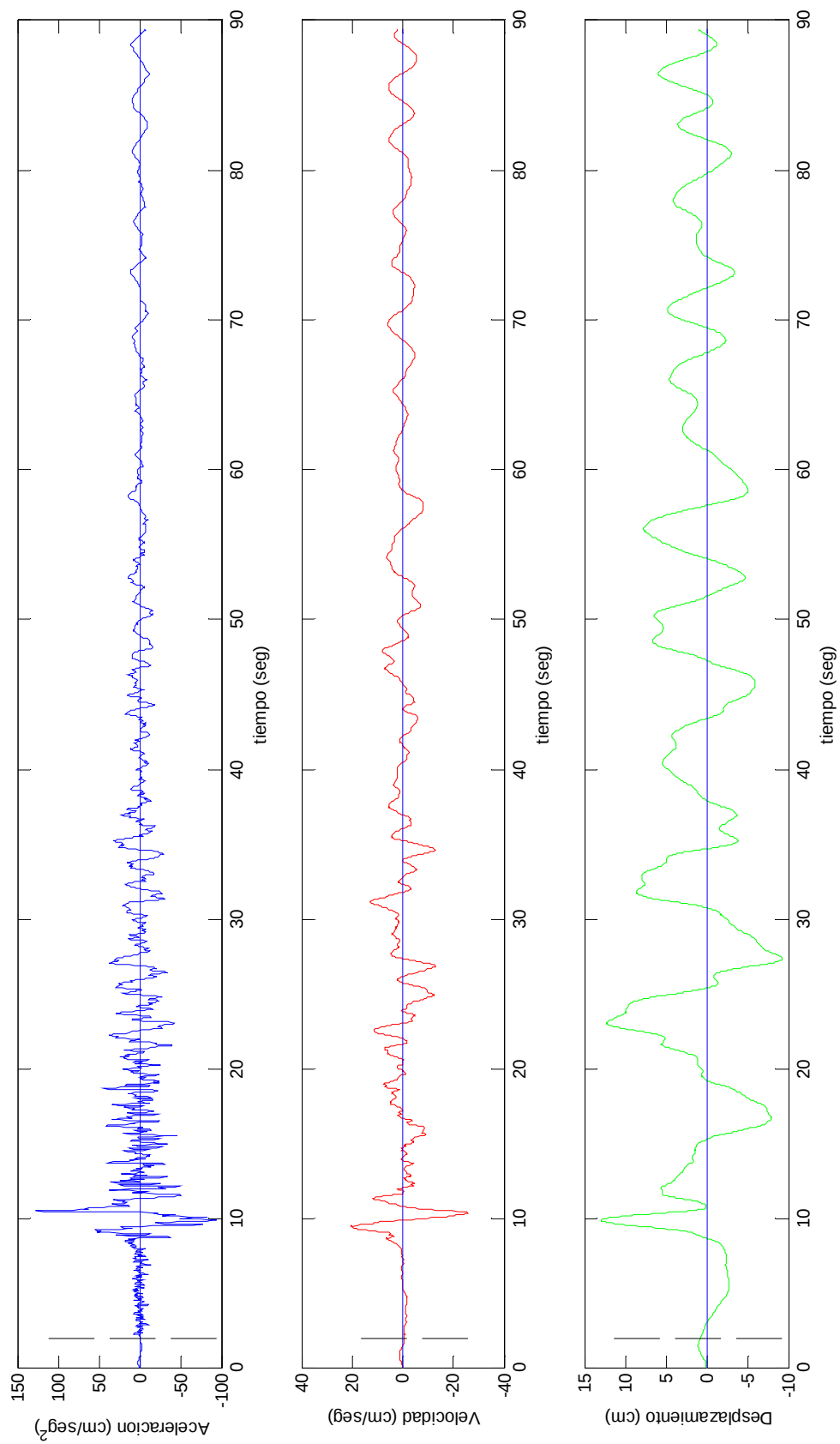


Figura A.12 Registro El Centro, componente S00W, 8-abril-1968. Corregido.

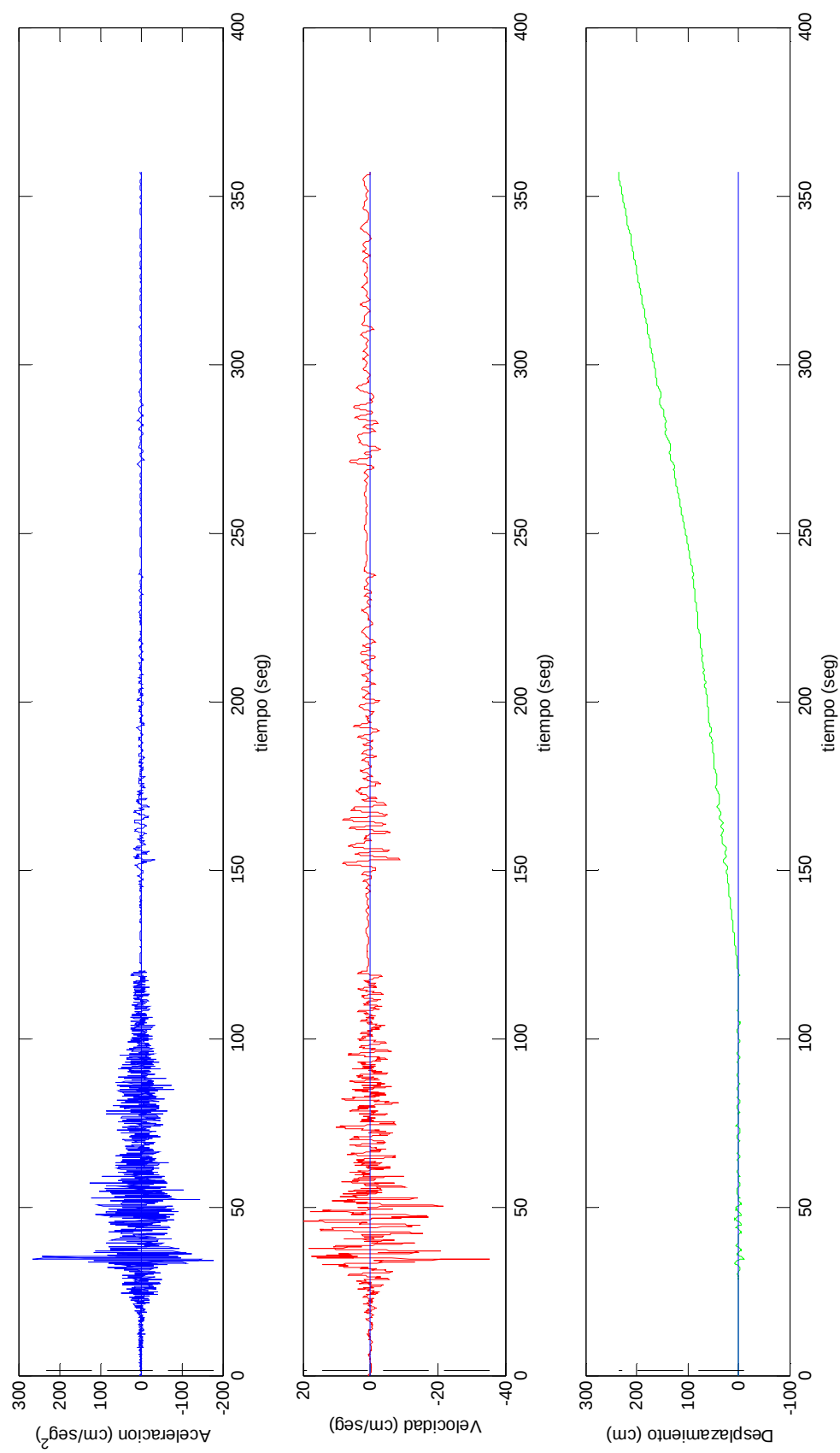


Figura A.13 Registro Hachinohe, componente N00E, 16-mayo-1968. Corregido.

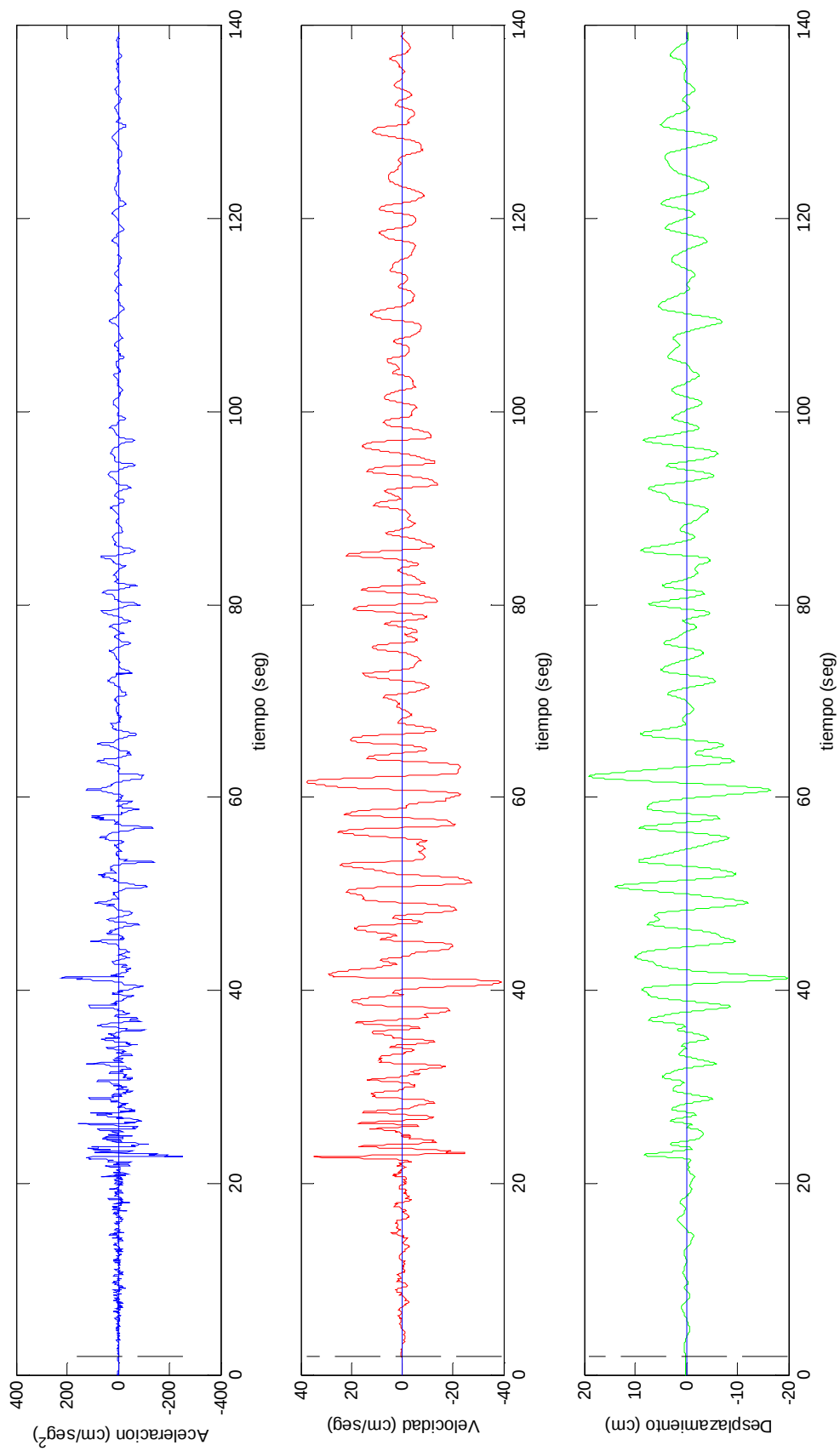


Figura A.14 Registro Aomori, componente N00E, 16-mayo-1968. Corregido.

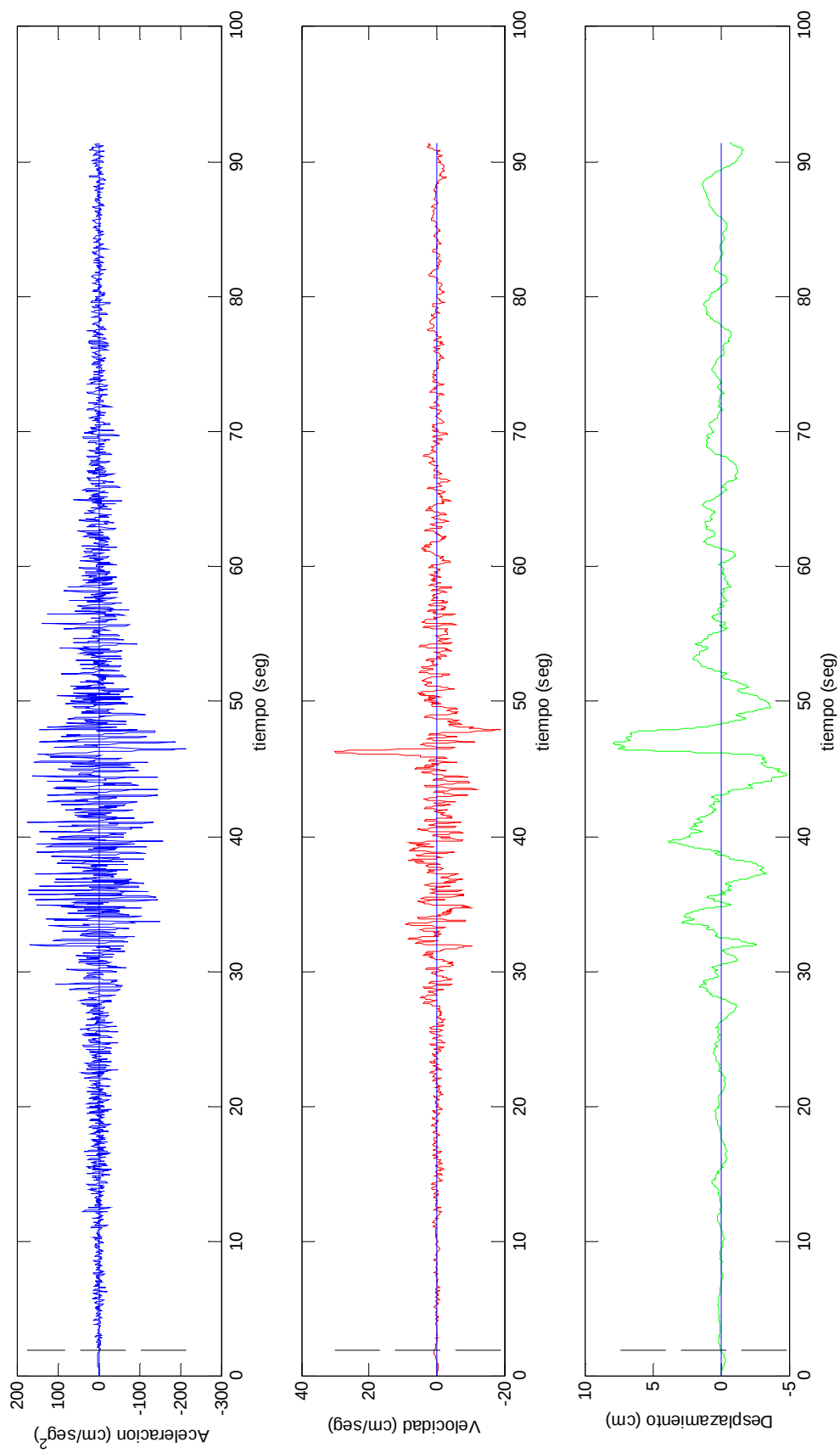


Figura A.15 Registro Muroran, componente N00E, 16-mayo-1968. Corregido.

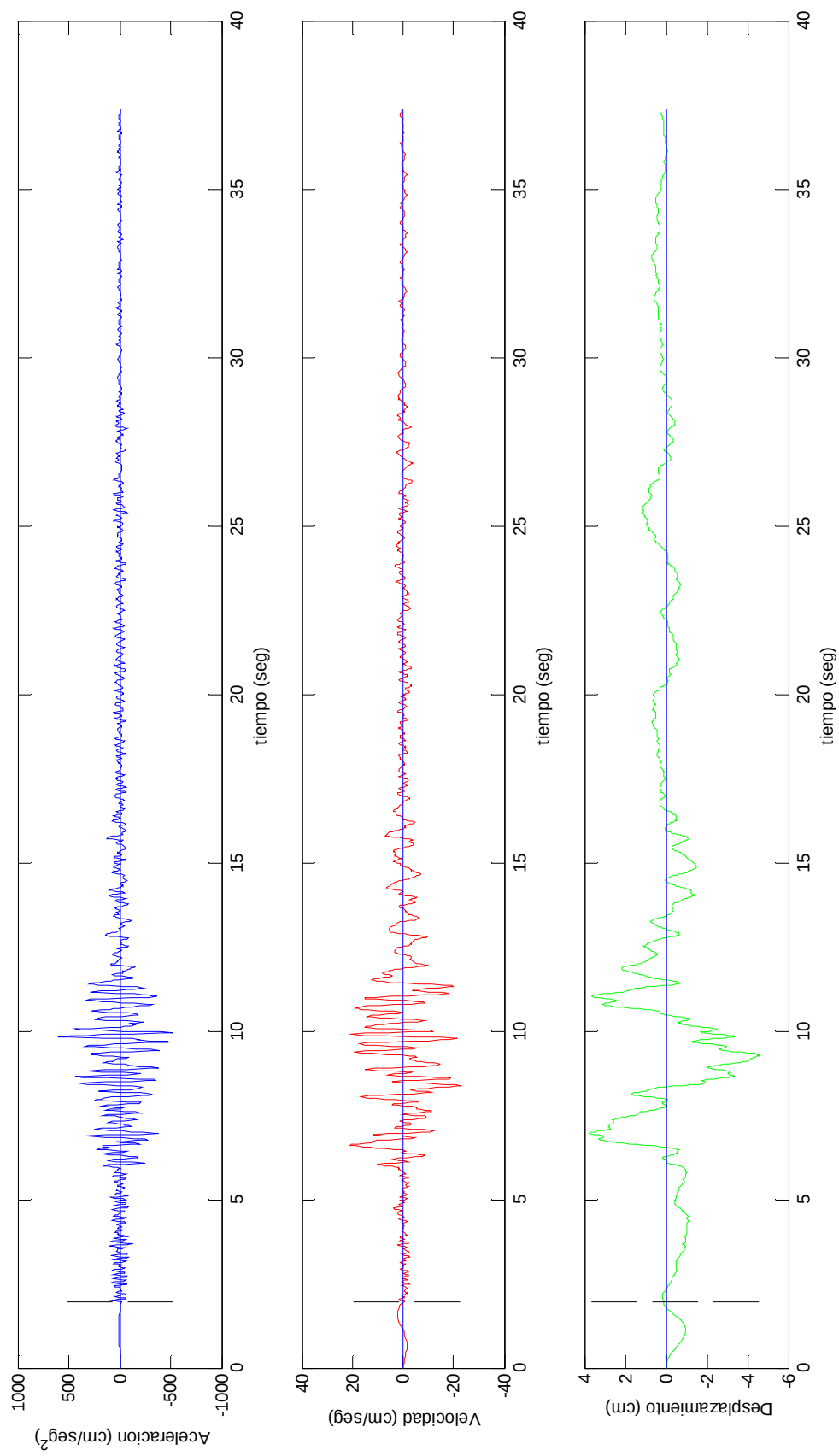


Figura A.16 Registro Itajima Bridge, componente Longitudinal, 6-agosto-1968. Corregido.

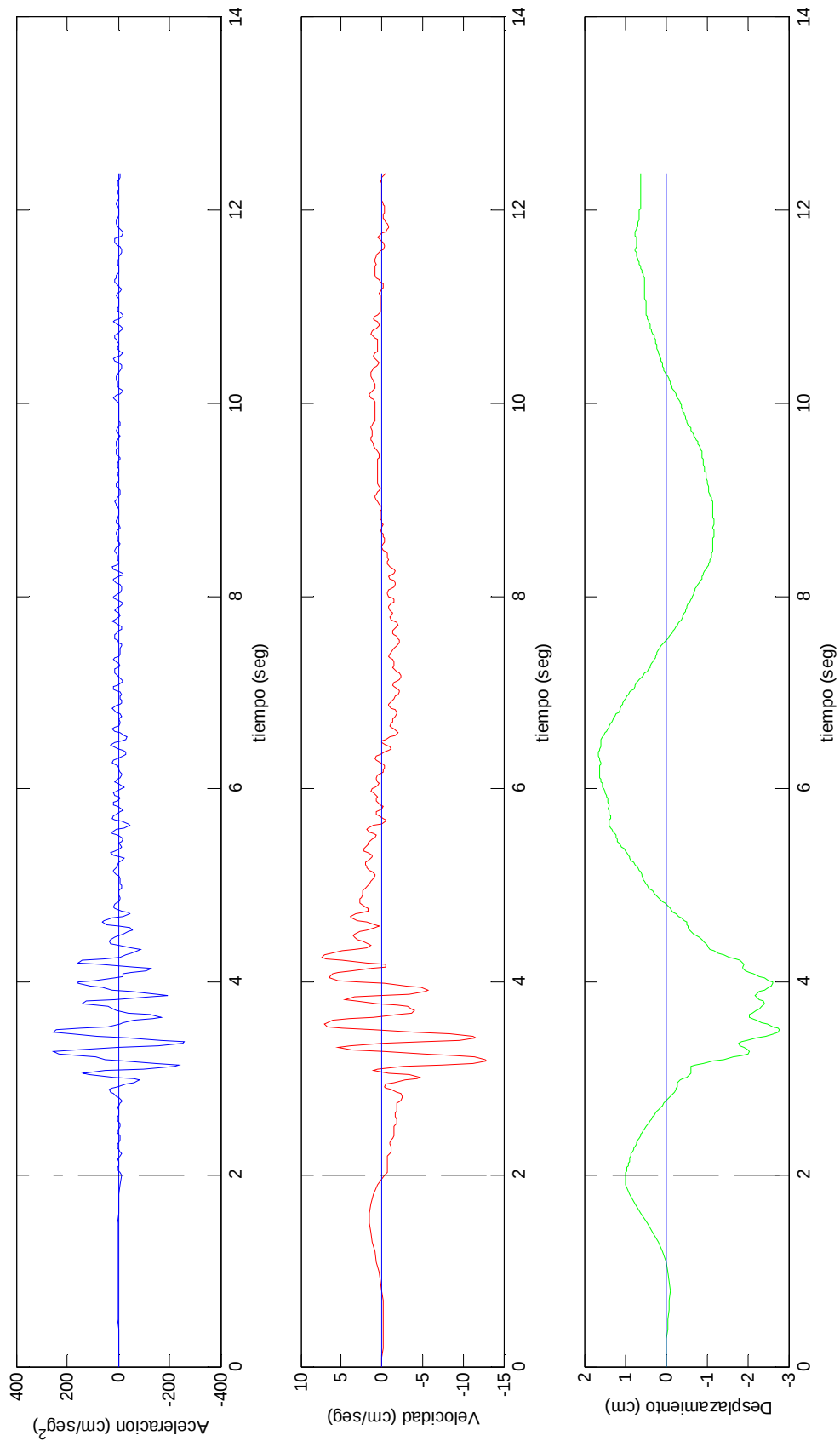


Figura A.17 Registro Itajima Bridge, componente Longitudinal, 21-septiembre-1968. Corregido.

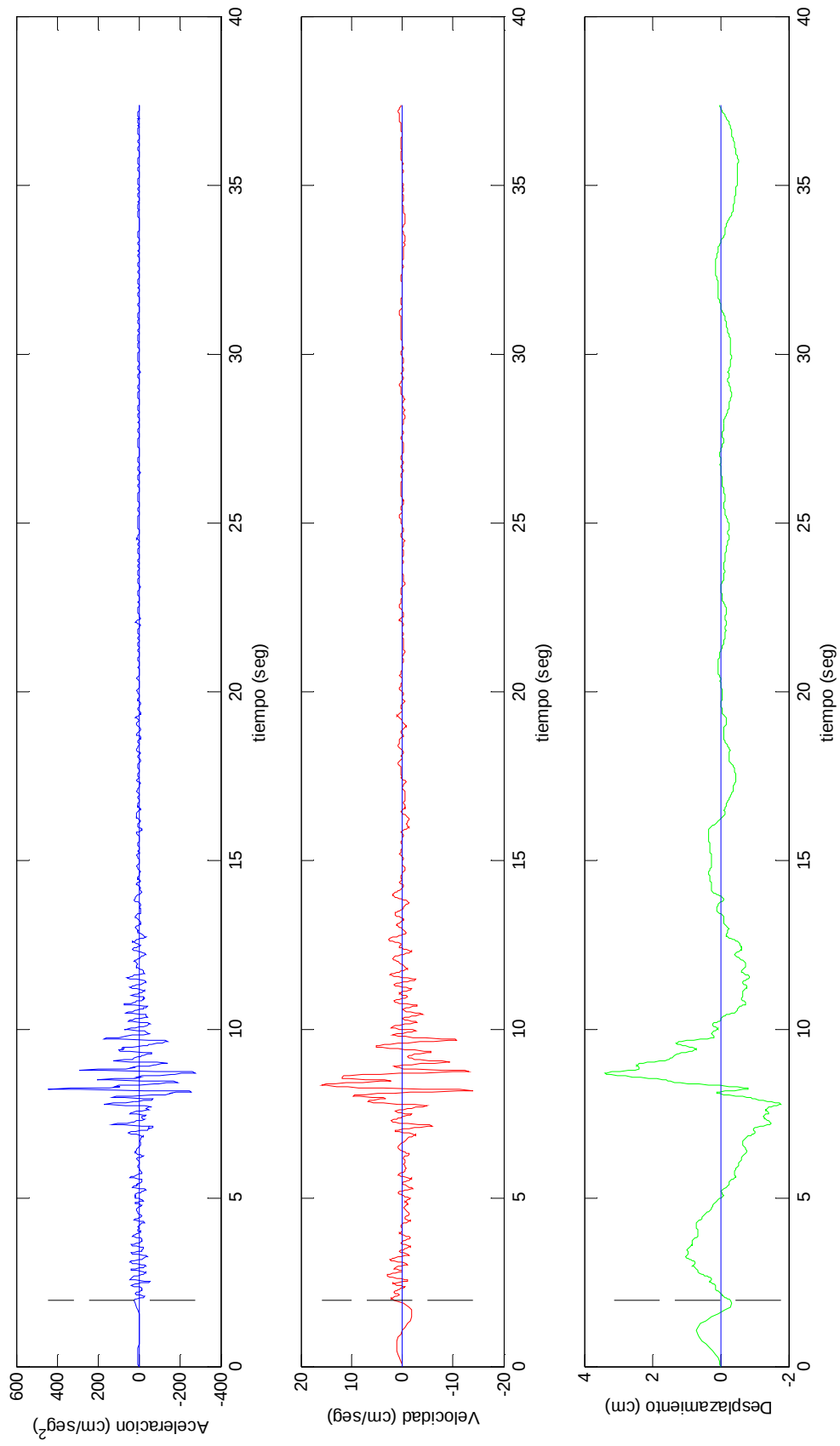


Figura A.18 Registro Toyohama Bridge, componente Longitudinal, 5-enero-1971. Corregido.

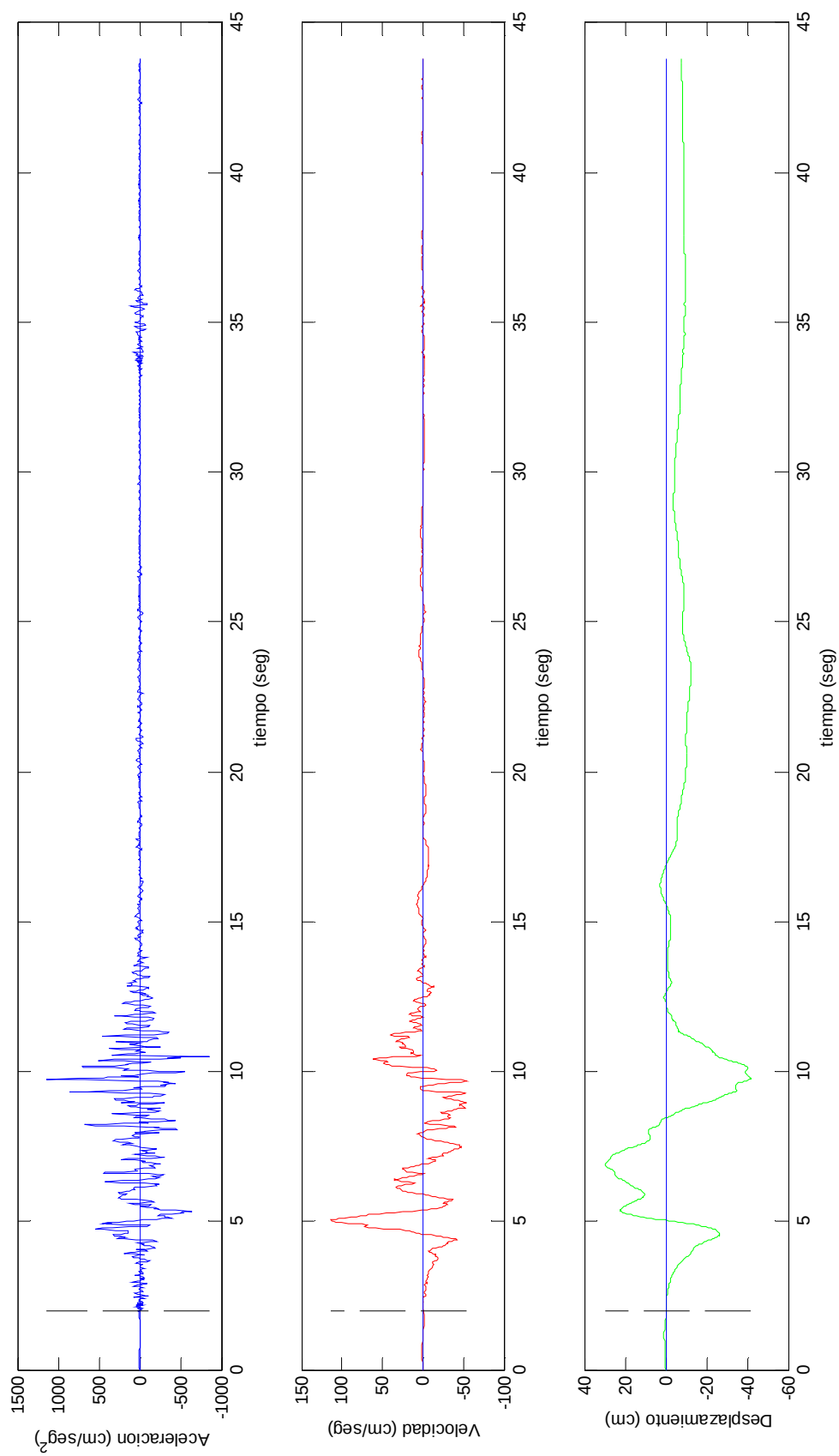


Figura A.19 Registro Pacoima, componente S16E, 9-febrero-1971. Corregido.

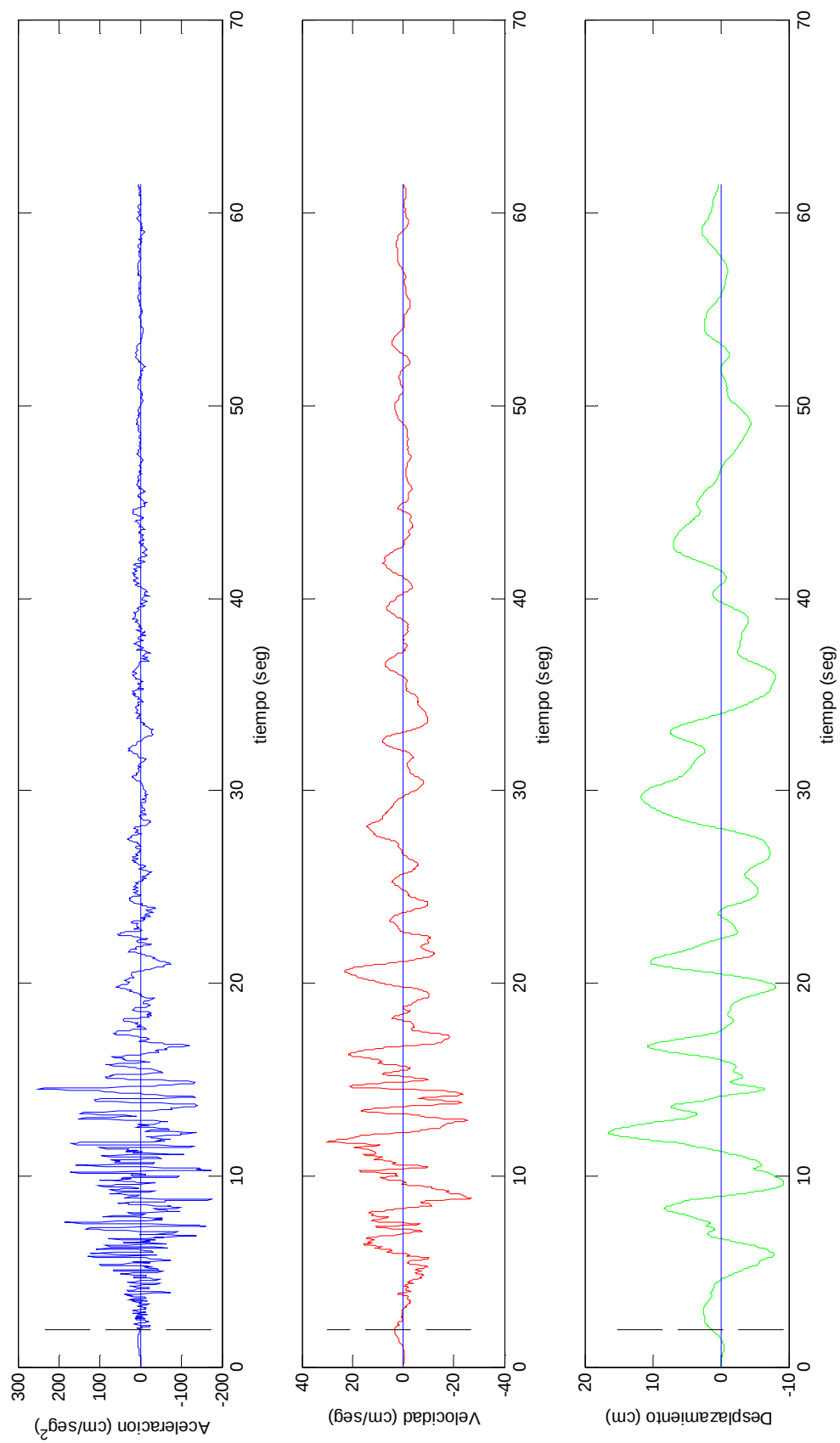


Figura A.20 Registro Orion L.A., componente N00W, 9-febrero-1971. Corregido.

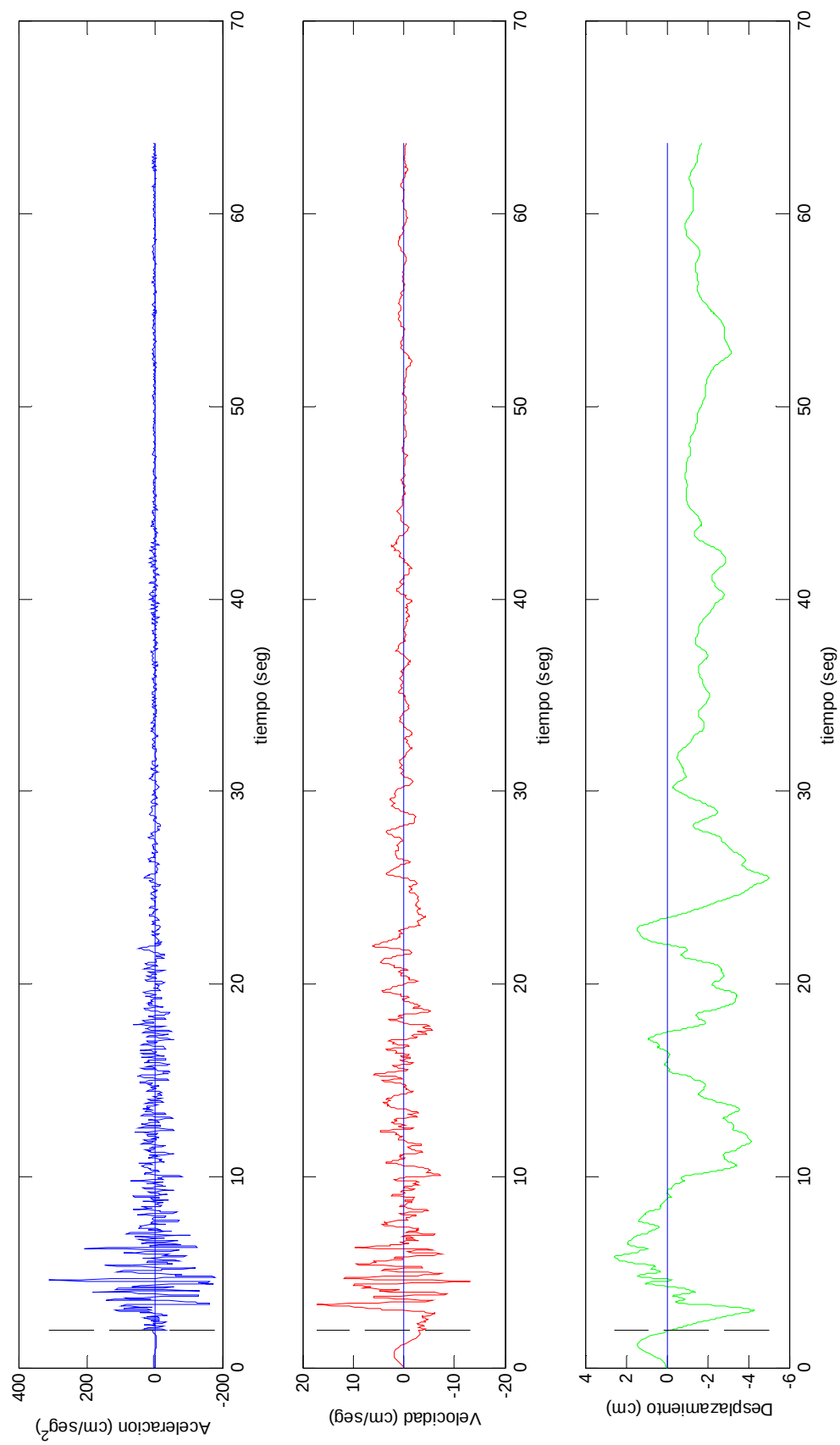


Figura A.21 Registro Castaic, componente N21E, 9-febrero-1971. Corregido.

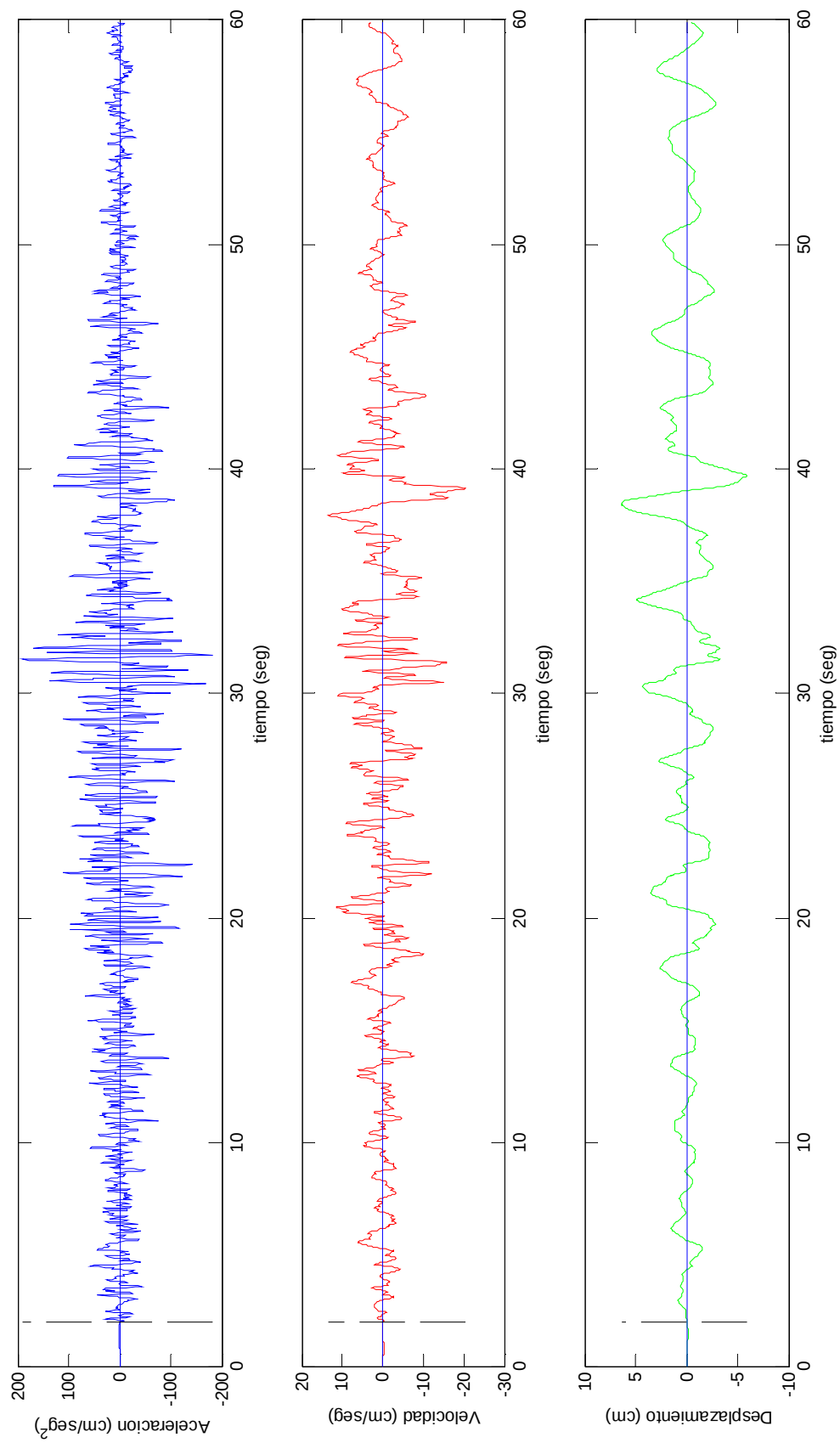


Figura A.22 Registro San Juan, componente S90E, 23-noviembre-1977. Corregido.

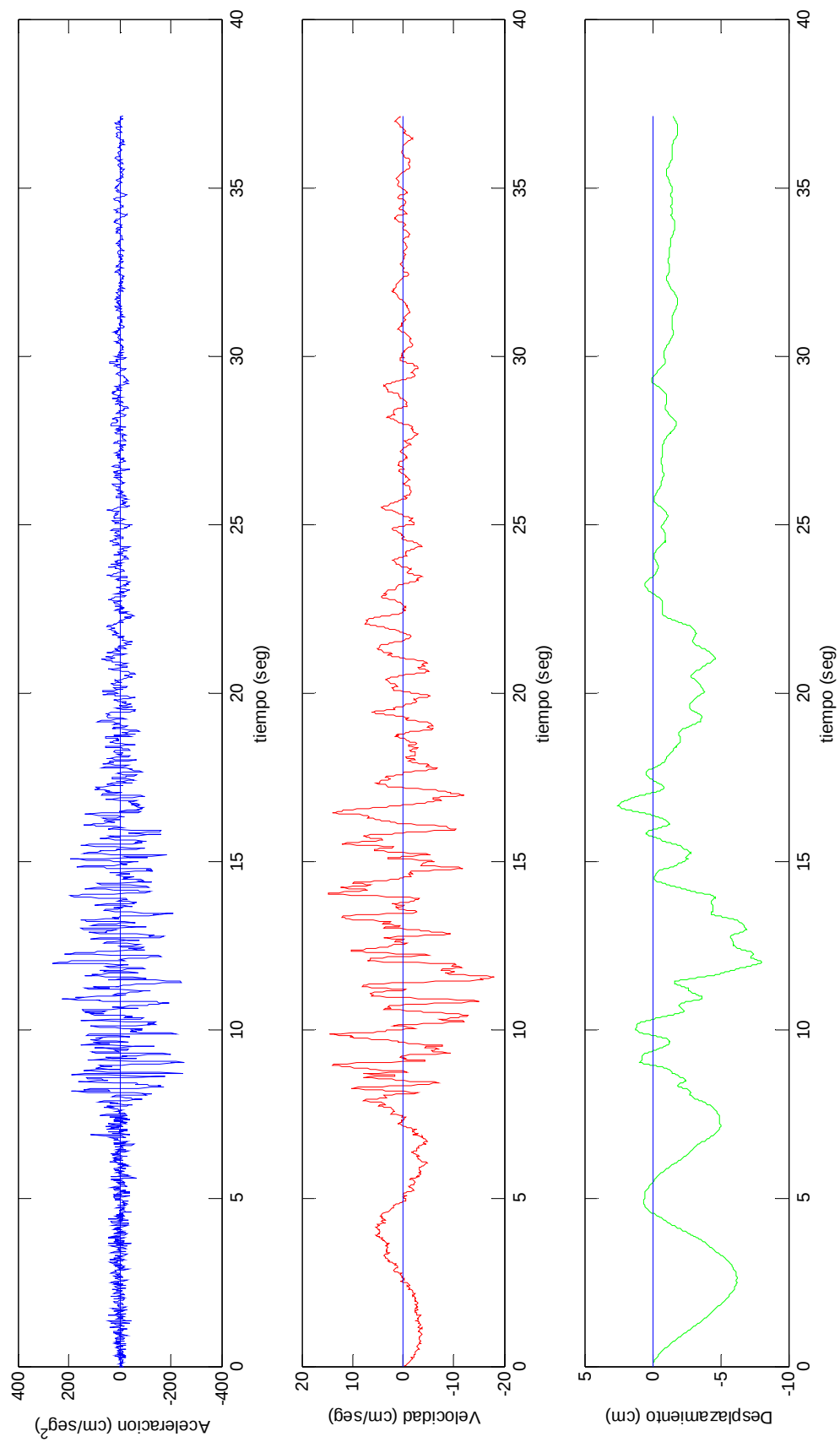


Figura A.23 Registro Ventanas, componente transversal, 7-noviembre-1981. Corregido.

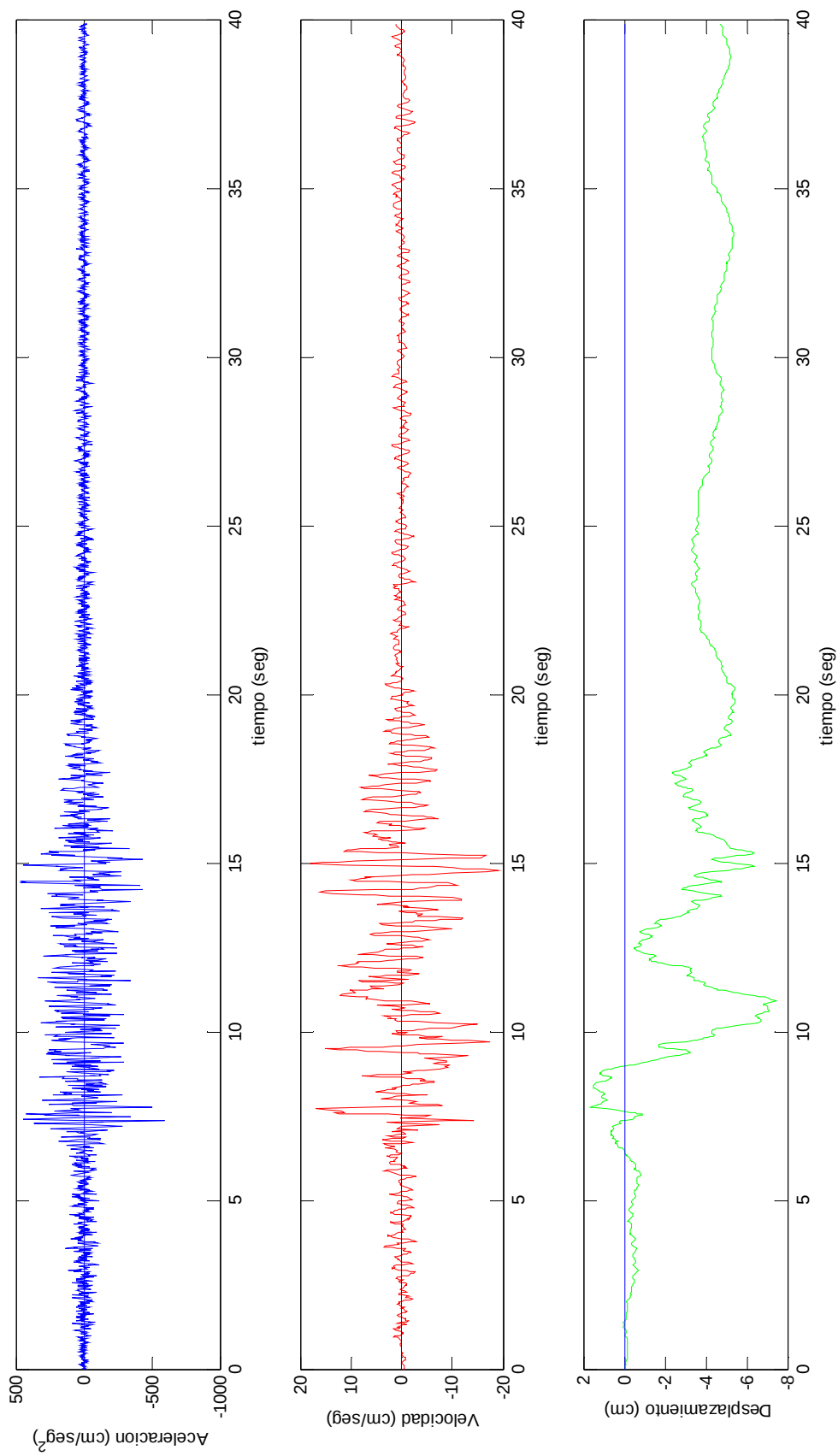


Figura A.24 Registro Papudo, componente longitudinal, 7-noviembre-1981. Corregido.

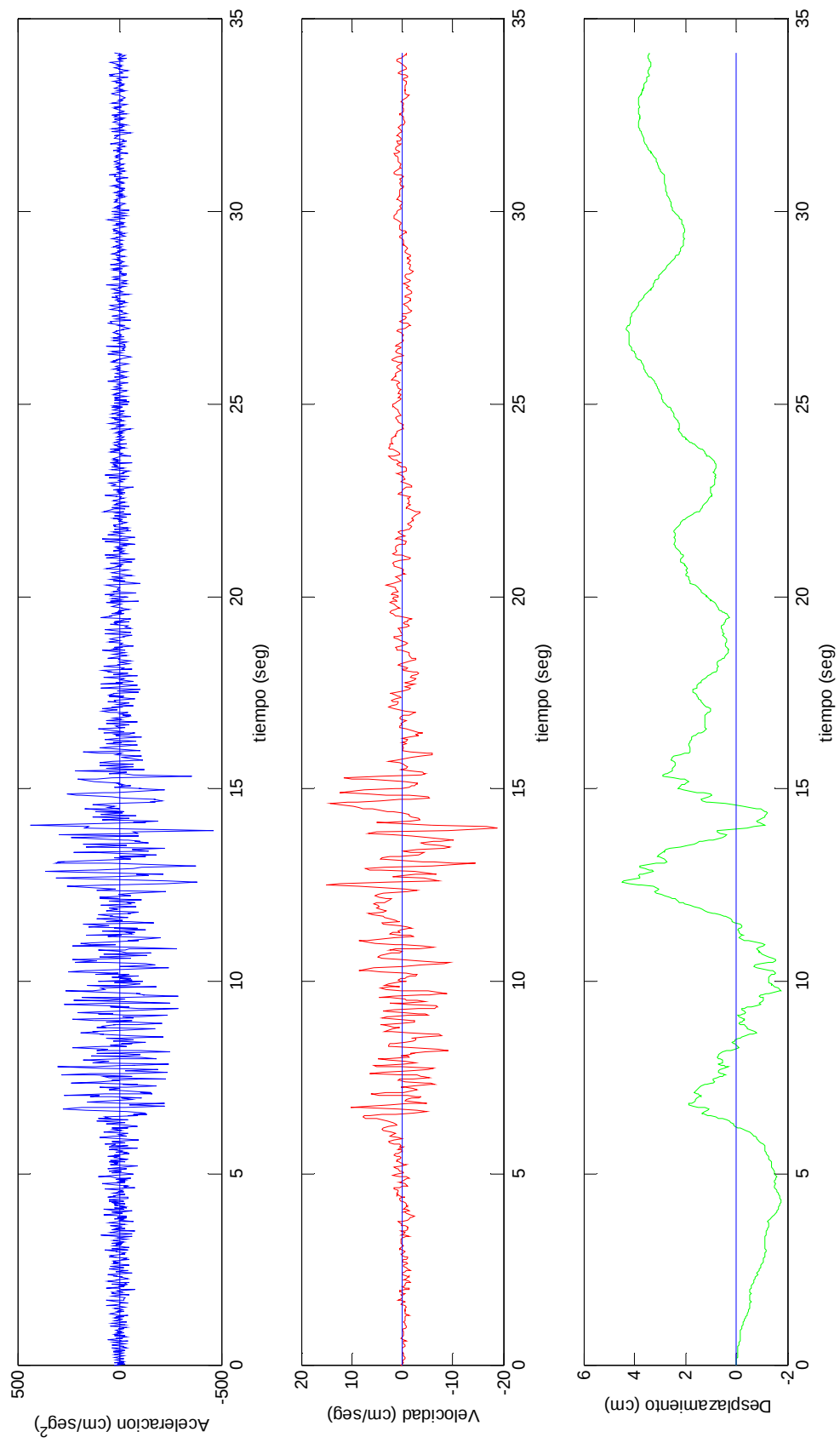


Figura A.25 Registro La Ligua, componente longitudinal, 7-noviembre-1981. Corregido.

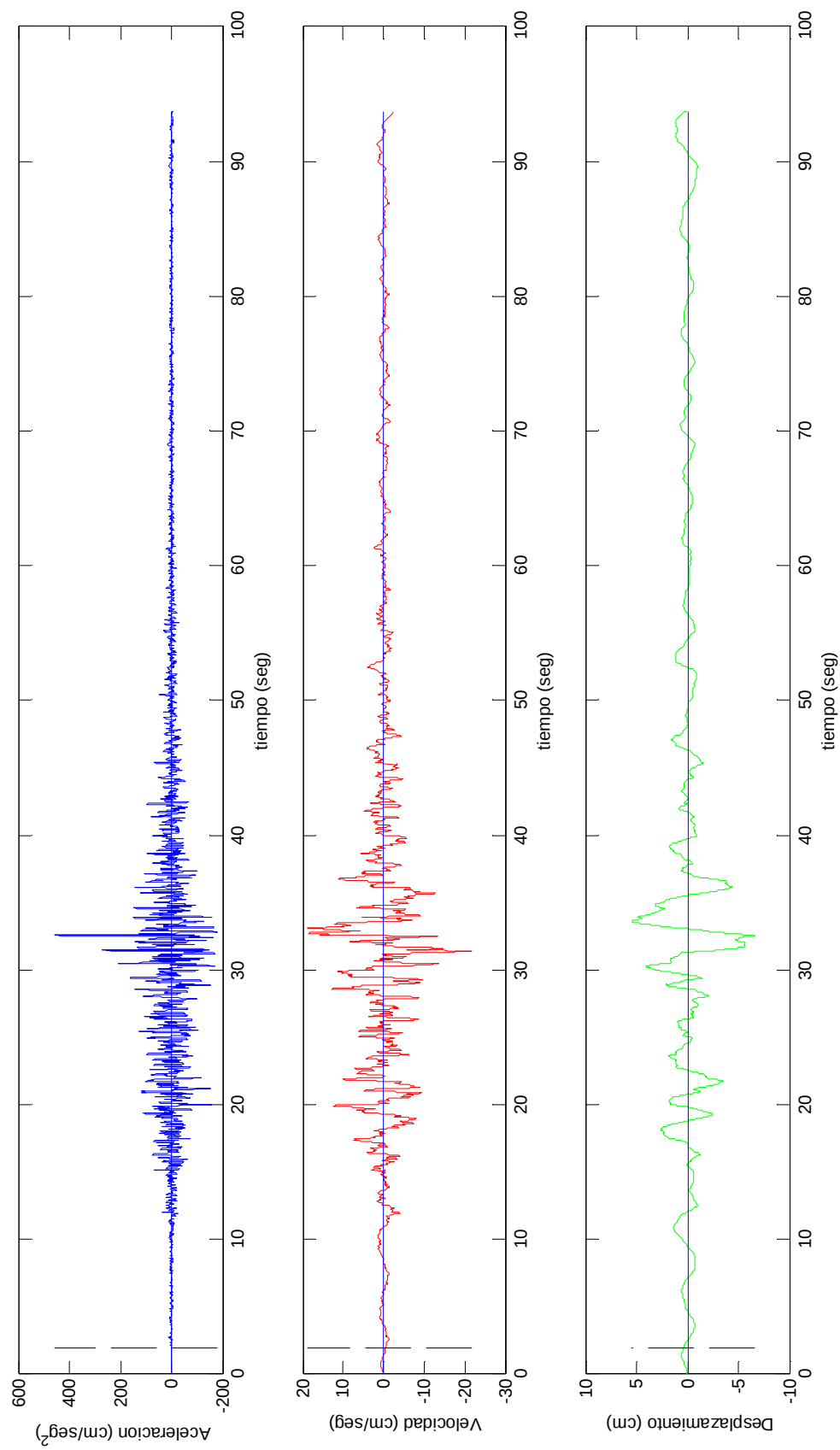


Figura A.26 Registro Rapel, componente N00E, 3-marzo-1985. Corregido.

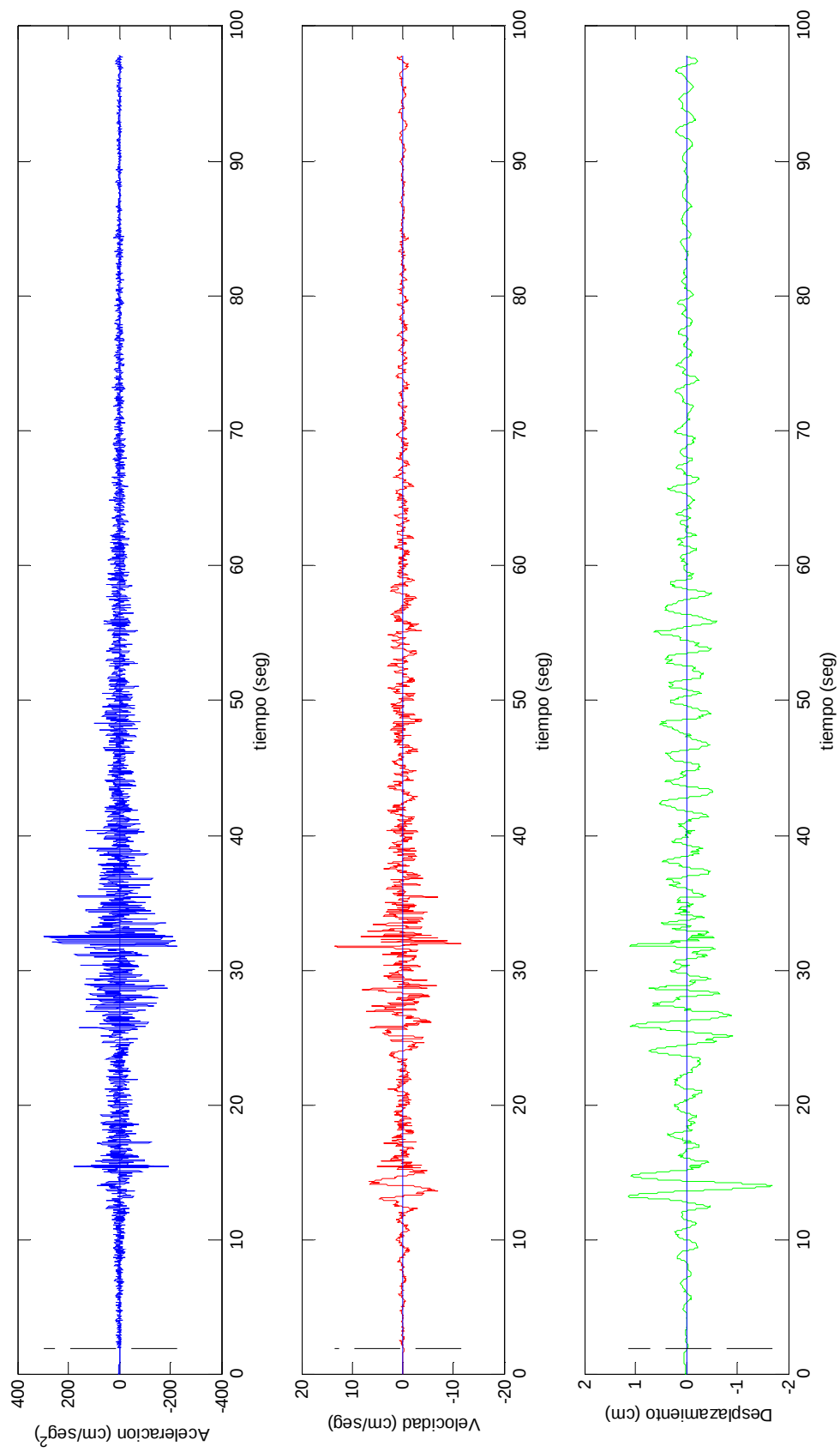


Figura A.27 Registro Zapallar, componente N90E, 3-marzo-1985. Corregido.

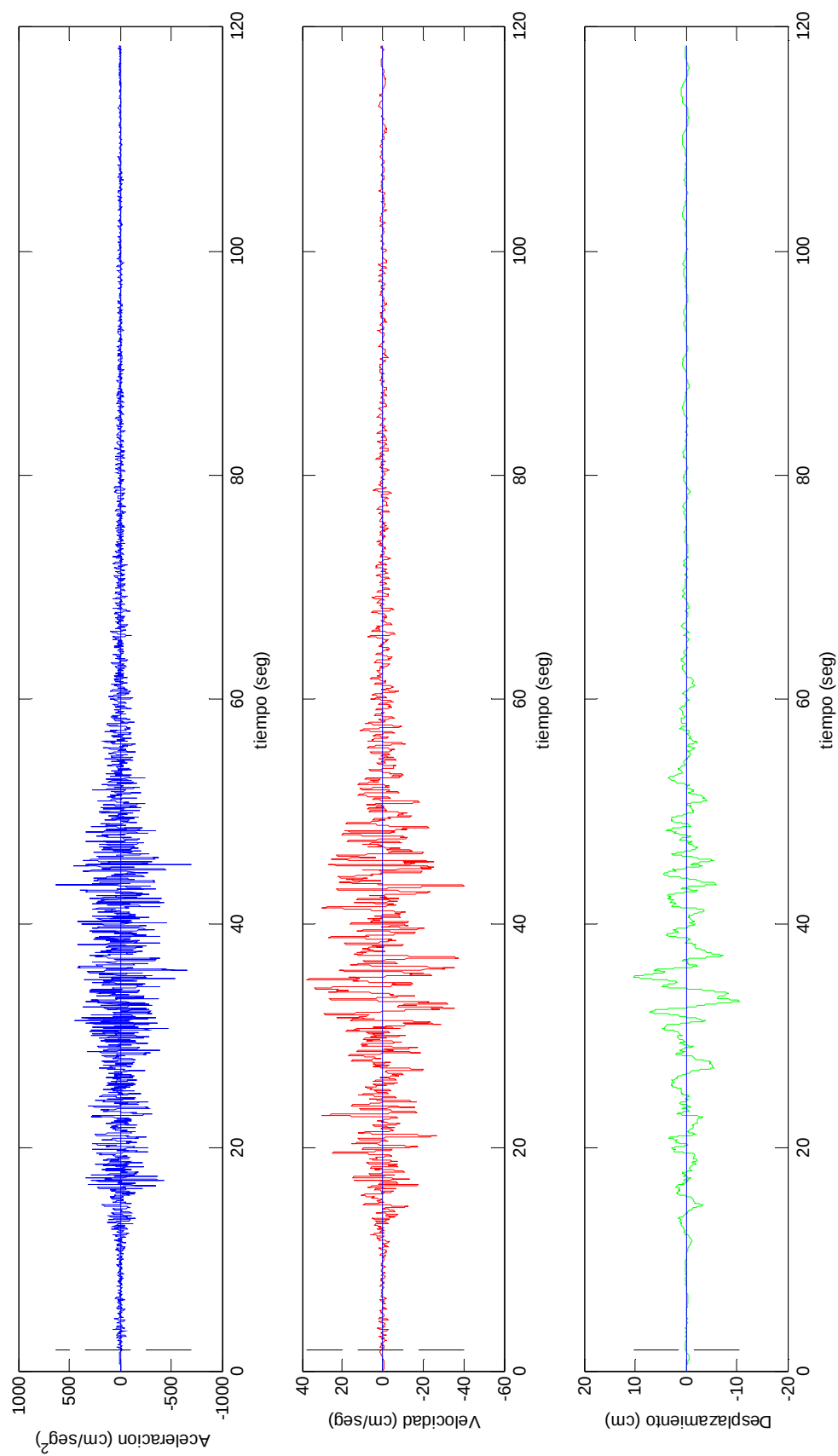


Figura A.28 Registro Lloleo, componente N10E, 3-marzo-1985. Corregido.

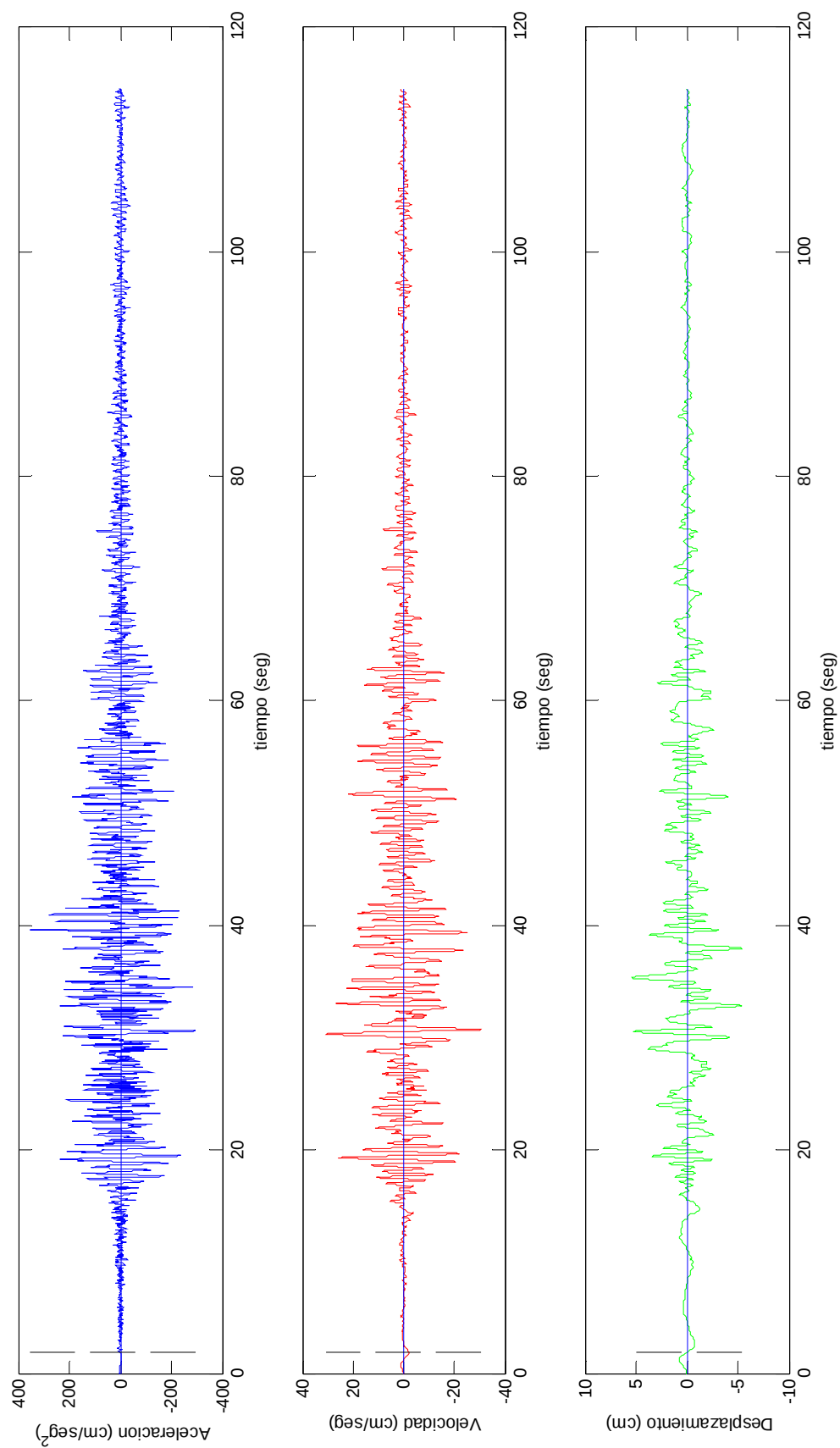


Figura A.29 Registro Viña Del Mar, componente S20W, 3-marzo-1985. Corregido.

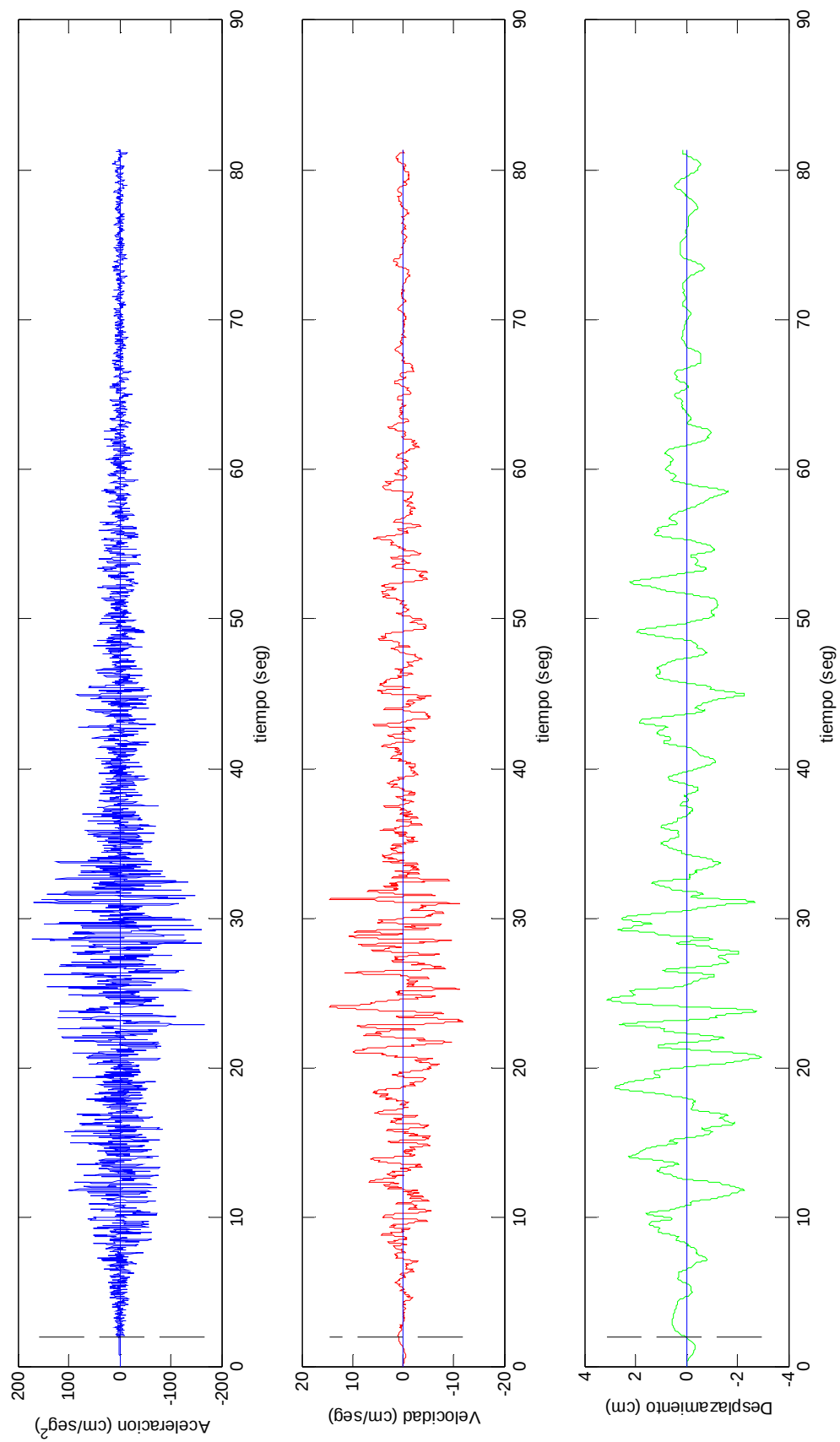


Figura A.30 Registro Valparaíso, U.F.S.M, componente N70E, 3-marzo-1985. Corregido.

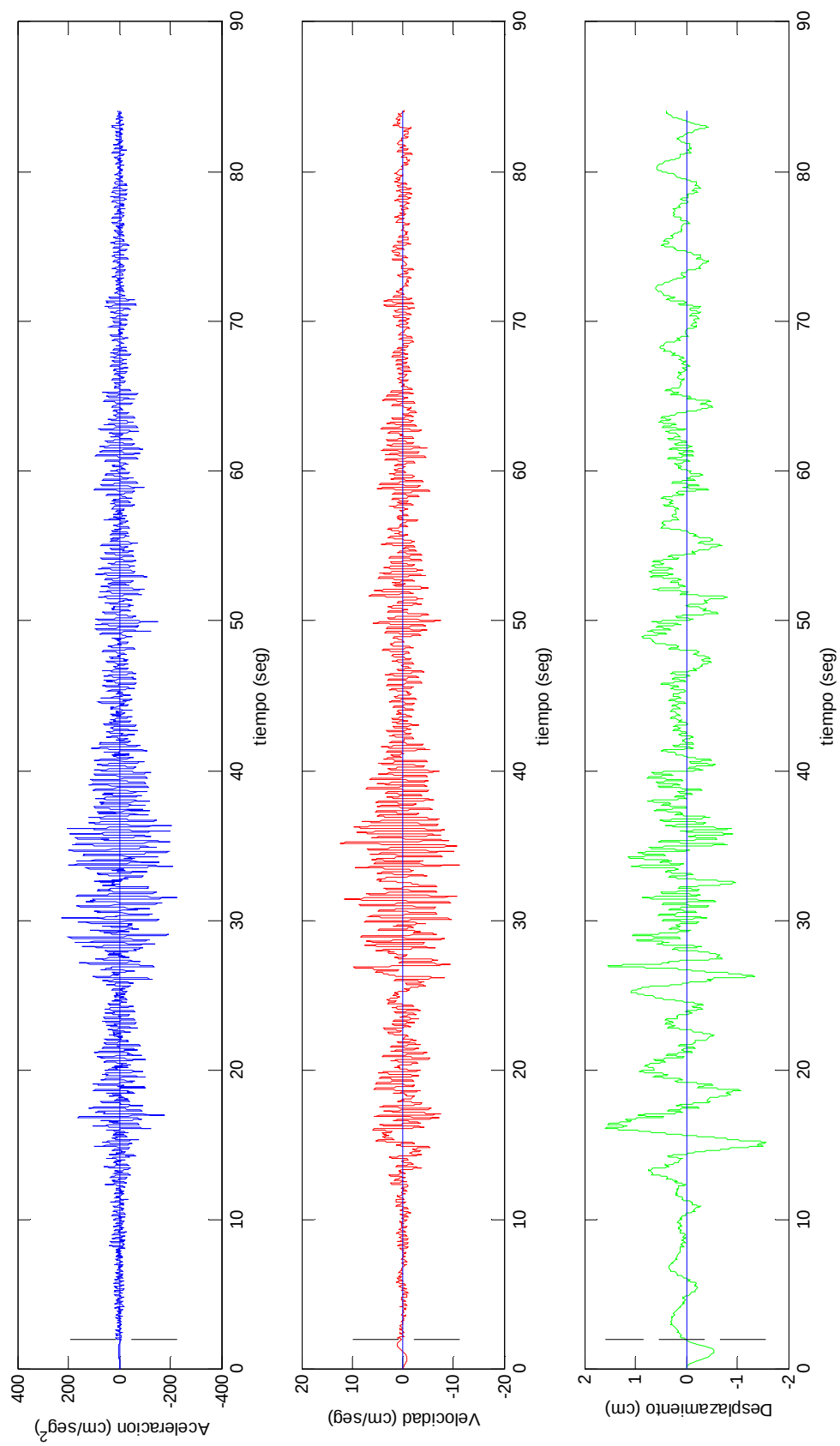


Figura A.31 Registro Papudo, componente S40E, 3-marzo-1985. Corregido.

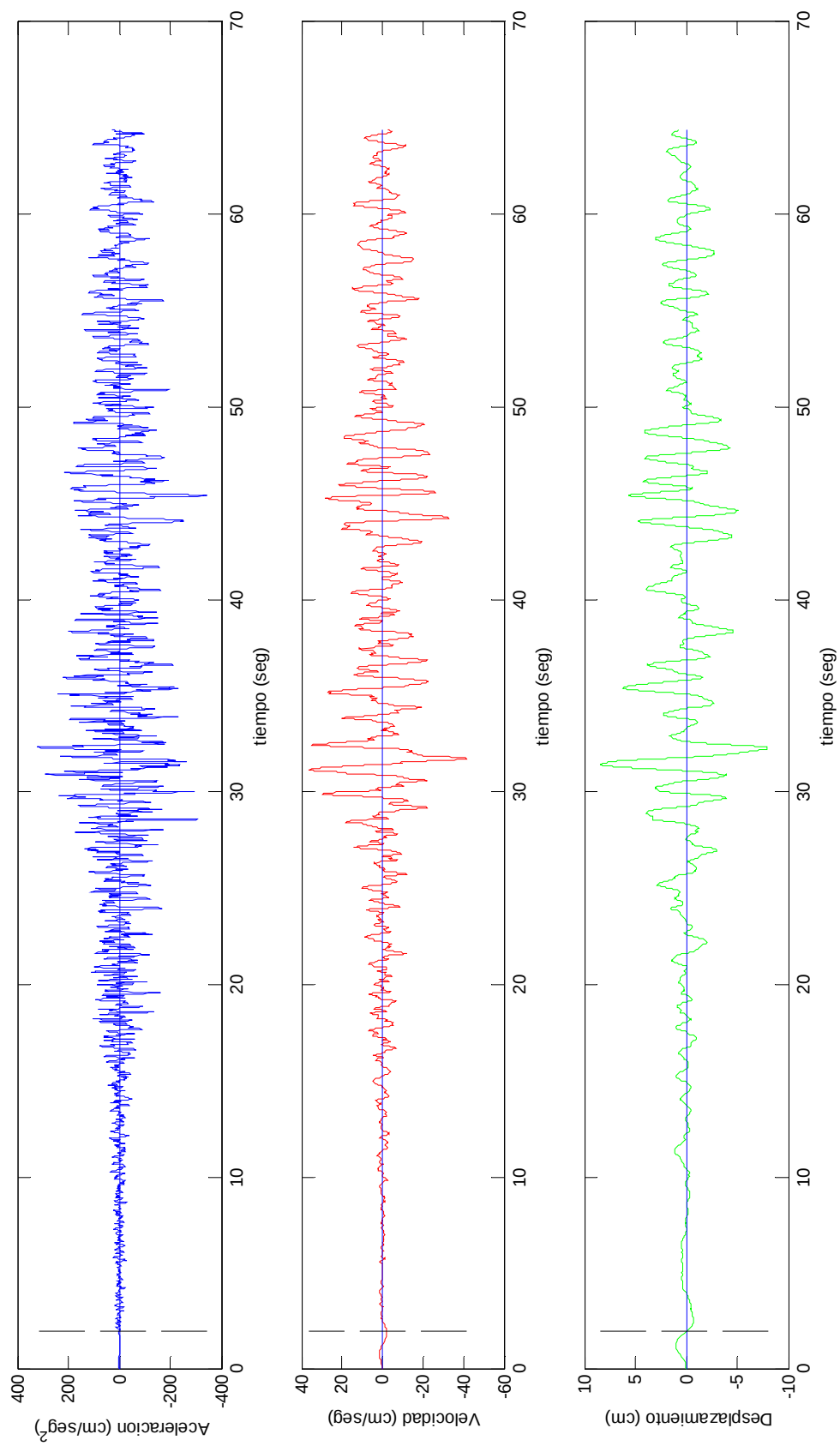


Figura A.32 Registro Llaylay, componente S10W, 3-marzo-1985. Corregido.

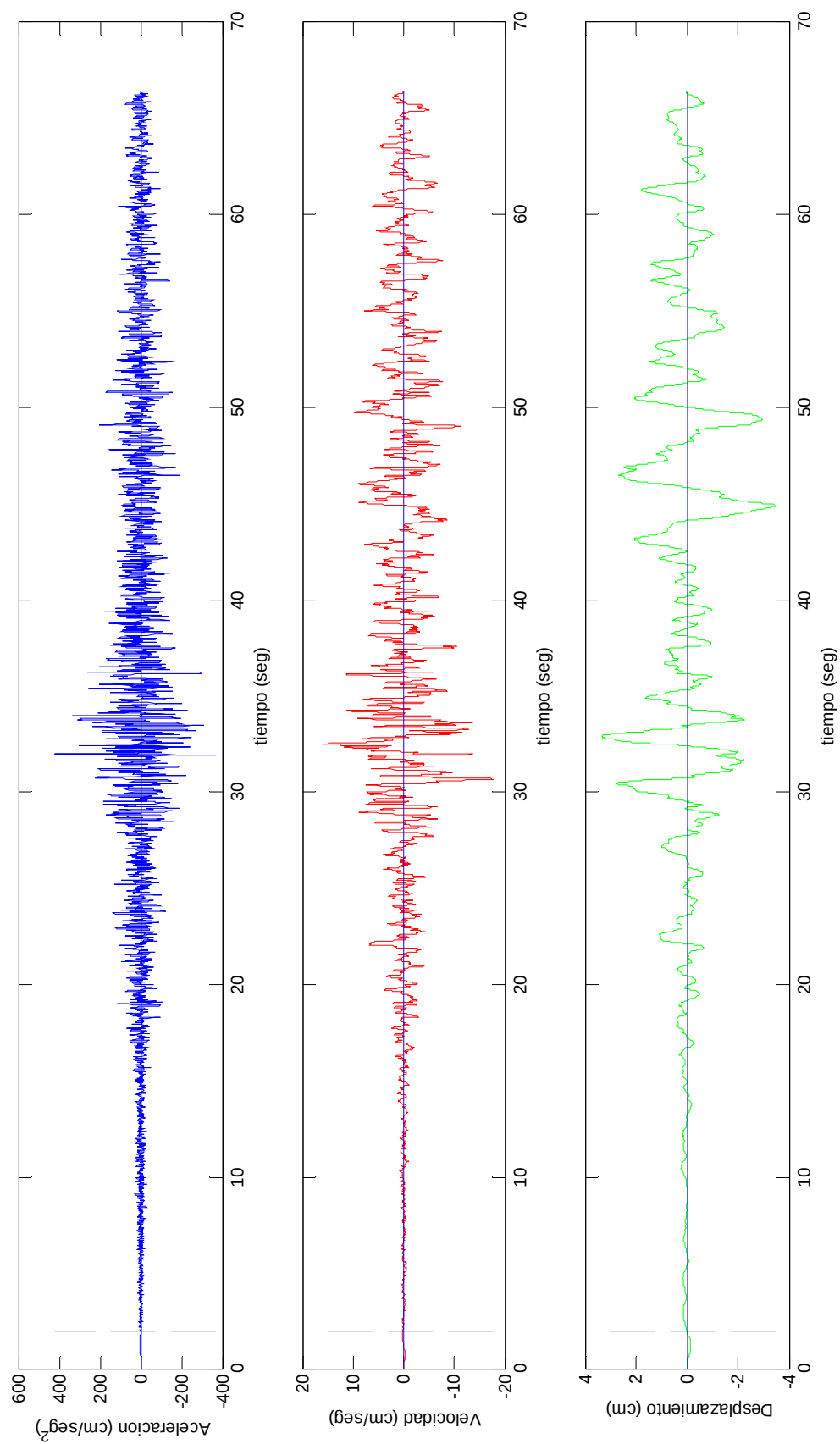


Figura A.33 Registro San Felipe, componente N80E, 3-marzo-1985. Corregido.

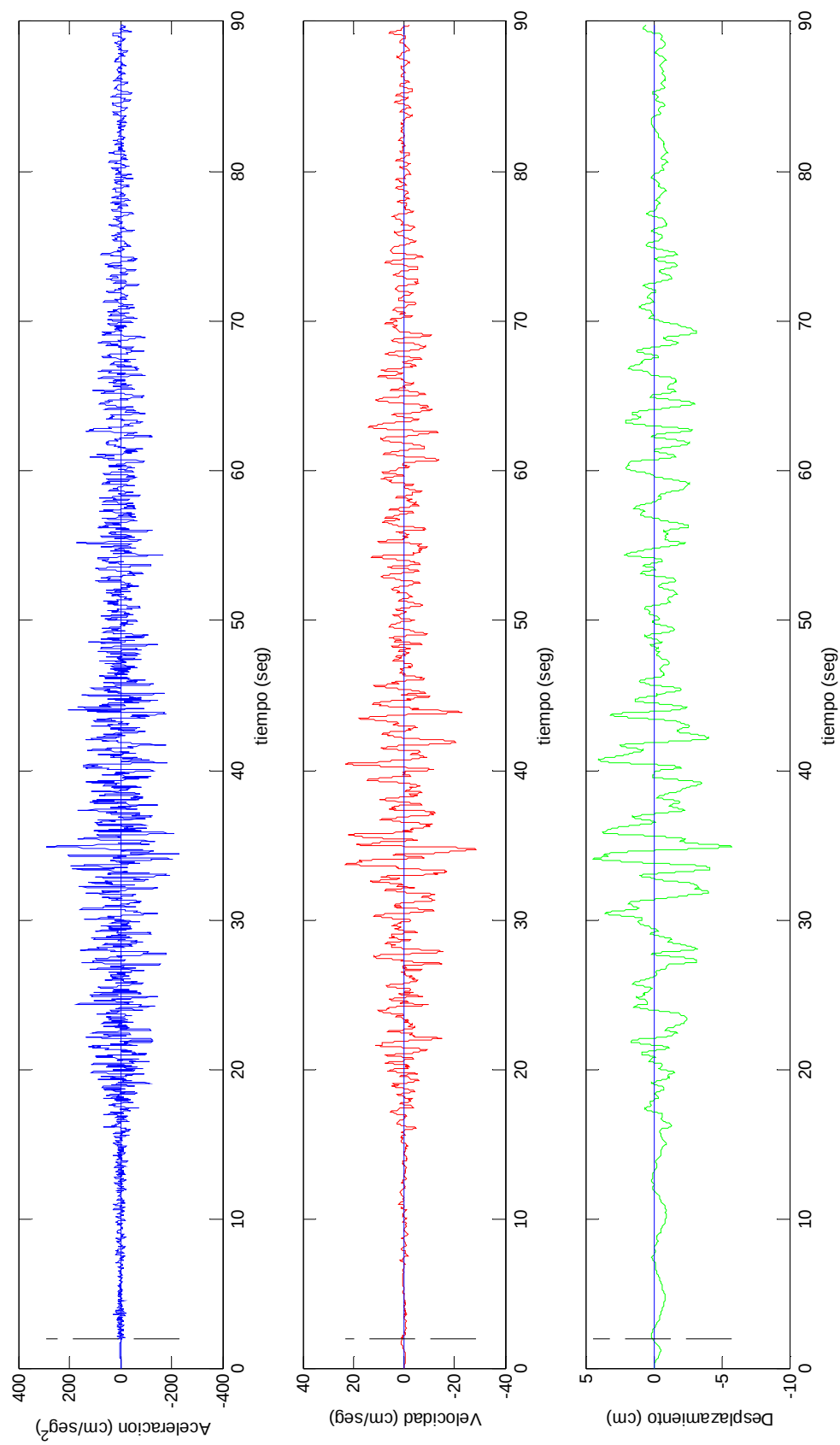


Figura A.34 Registro El almendral, componente N50E, 3-marzo-1985. Corregido.

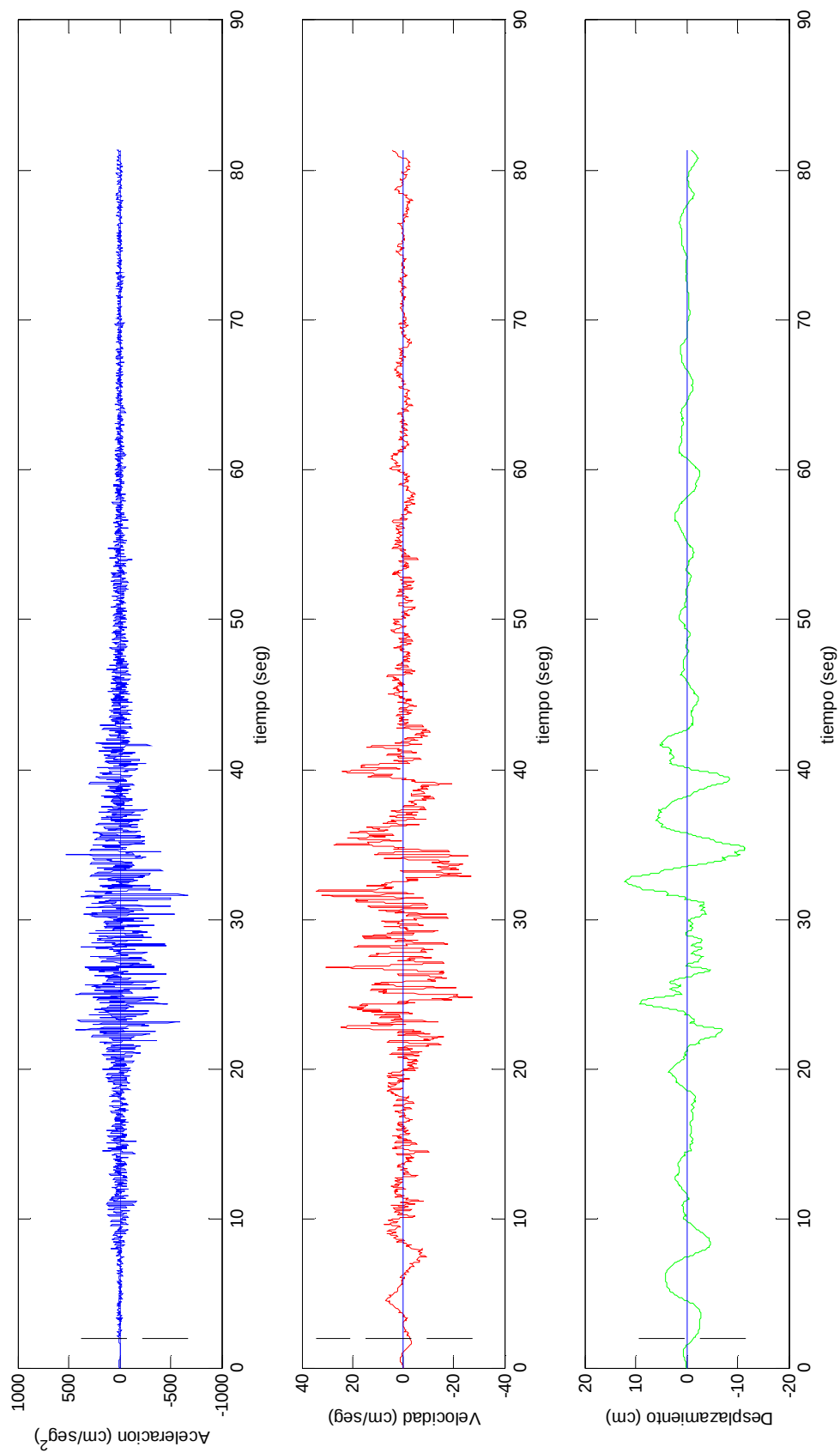


Figura A.35 Registro Melipilla, componente N00E, 3-marzo-1985. Corregido.

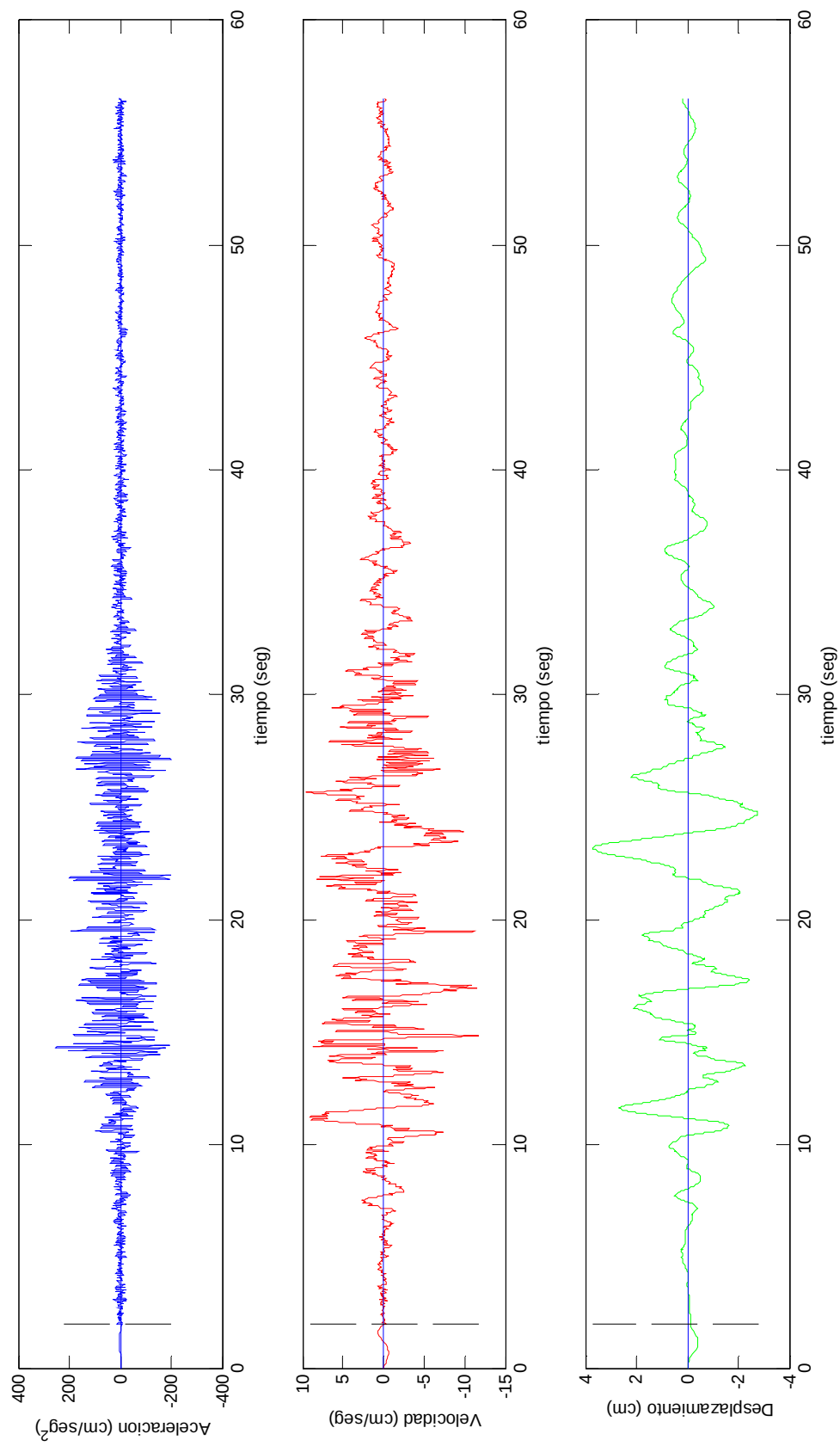


Figura A.36 Registro Pichilemu, componente N00E, 3-marzo-1985. Corregido.

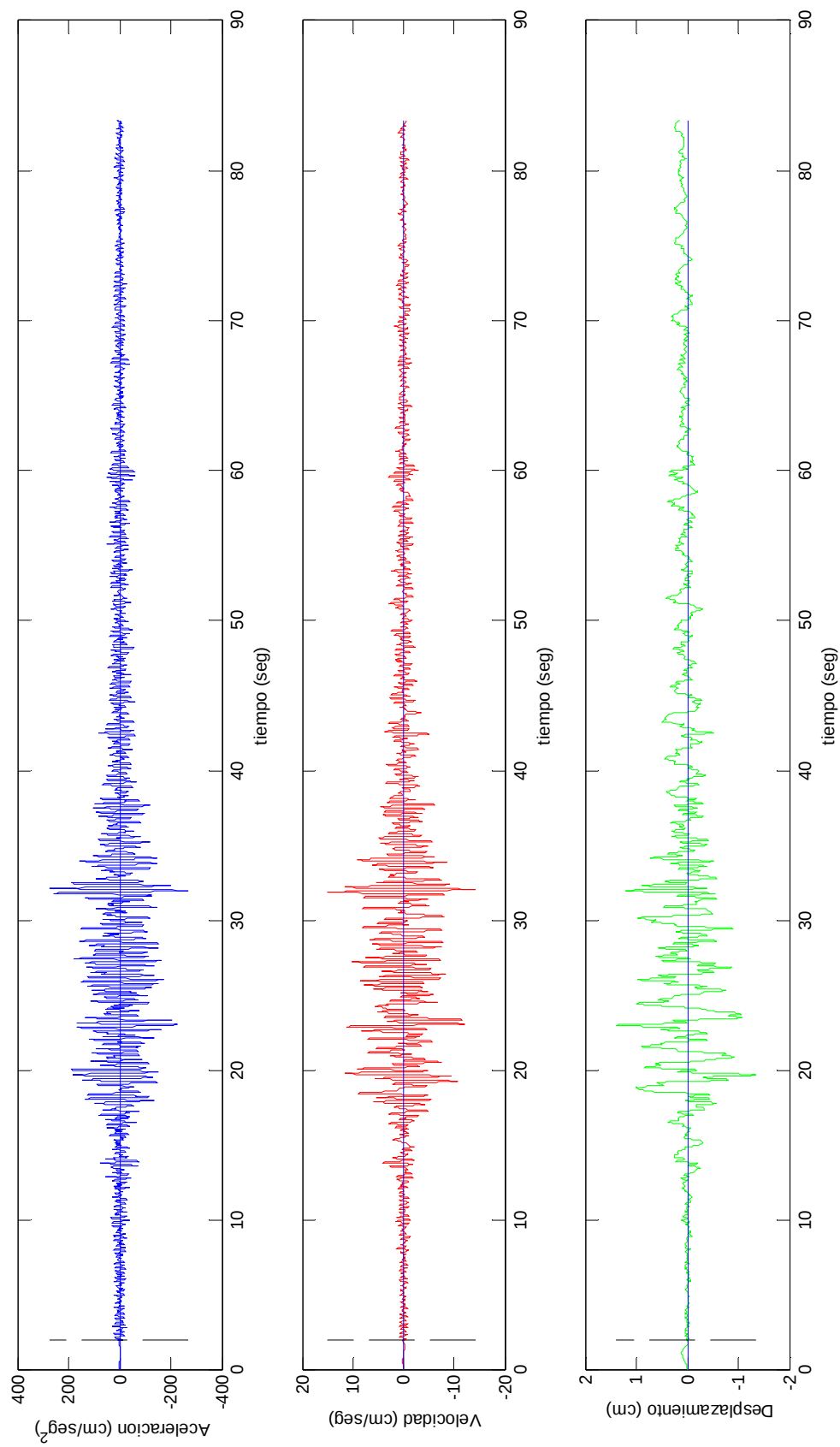


Figura A.37 Registro Iloca, componente N90E, 3-marzo-1985. Corregido.

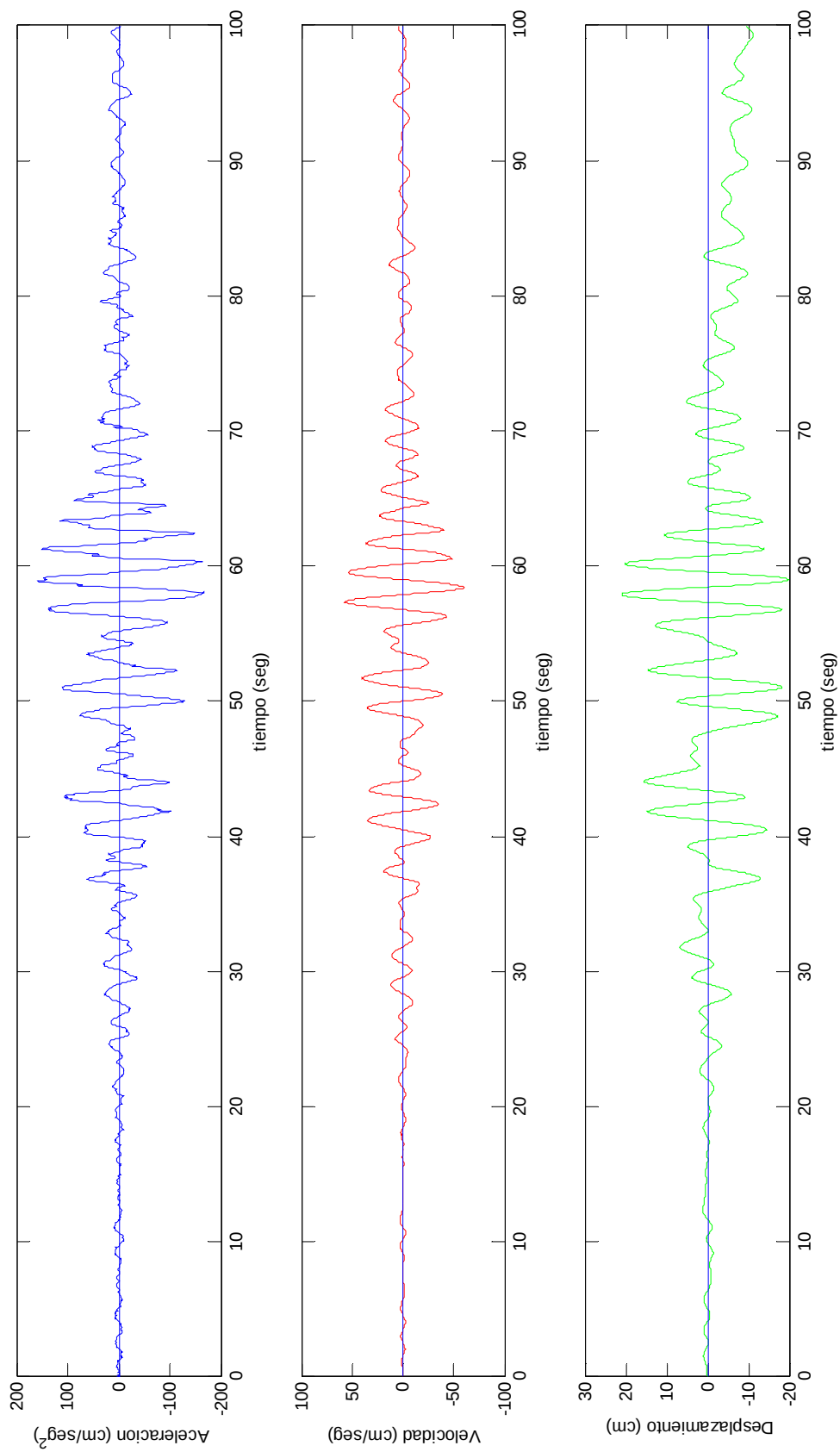


Figura A.38 Registro Sct, componente N90E, 19-septiembre-1985. Corregido.

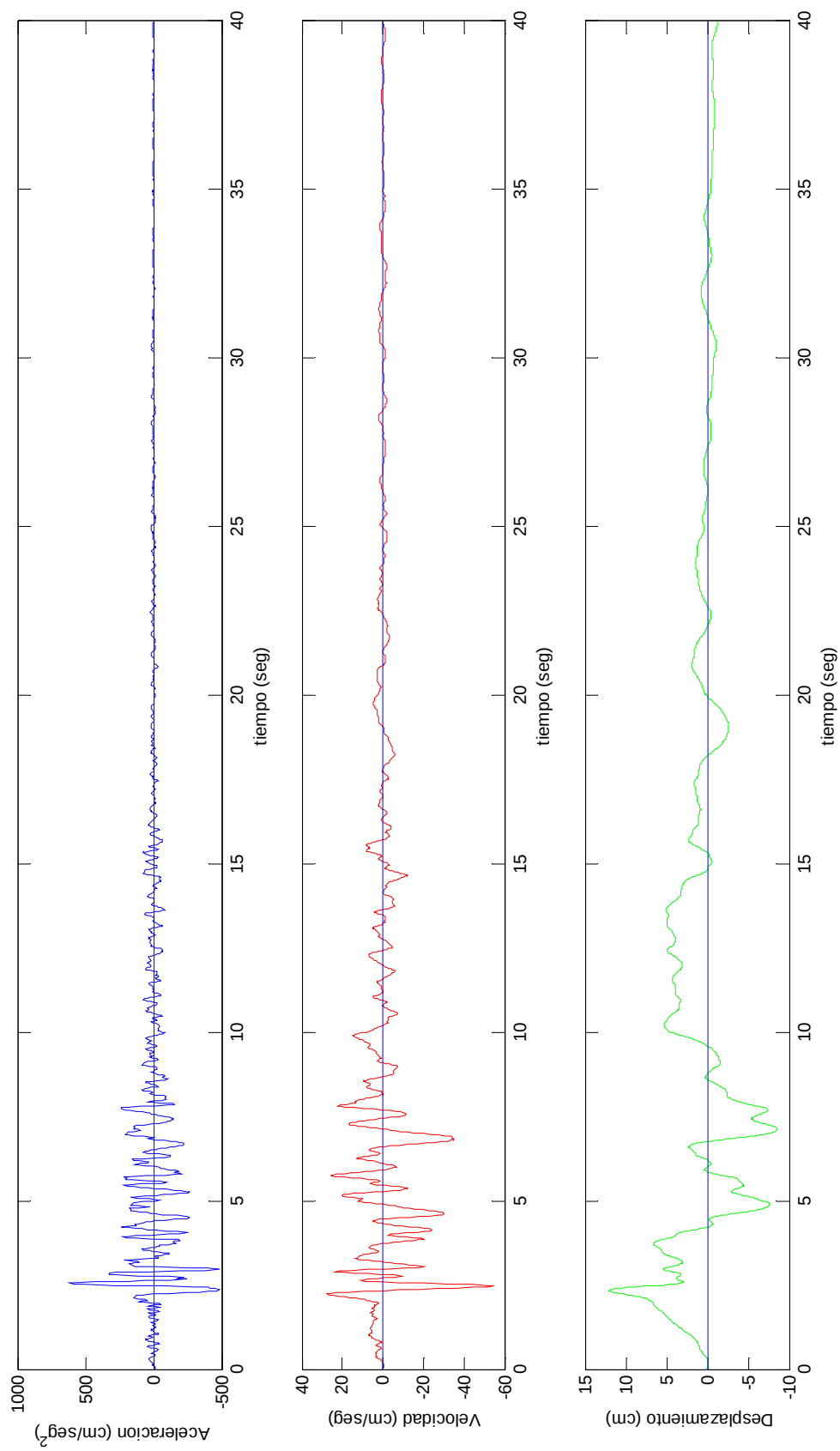


Figura A.39 Registro Corralitos, componente N00E, 18-octubre-1989. Corregido.

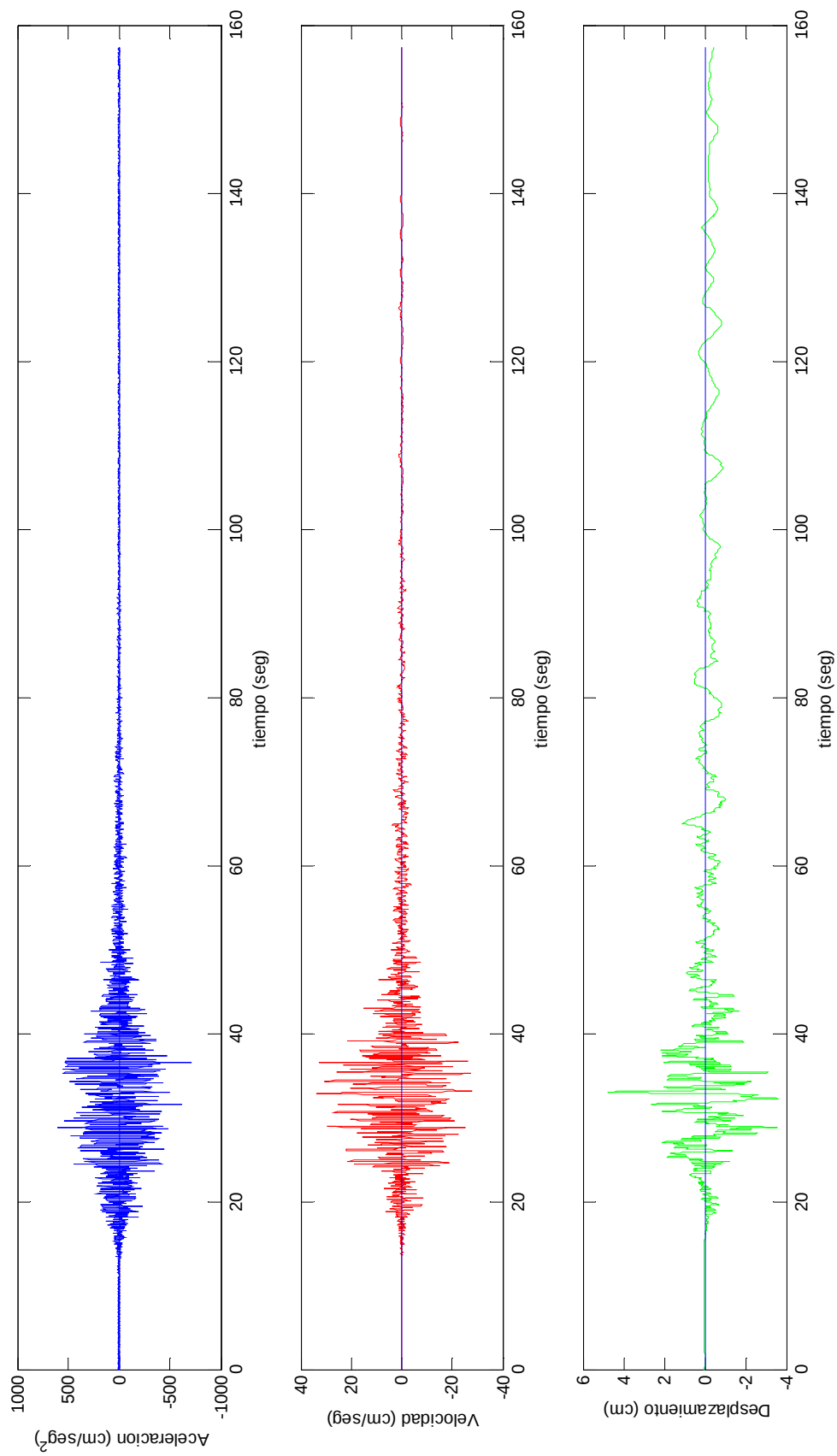


Figura A.40 Registro Ksr Kushiro J.M.A., componente N63E, 15-enero-1993. Corregido.

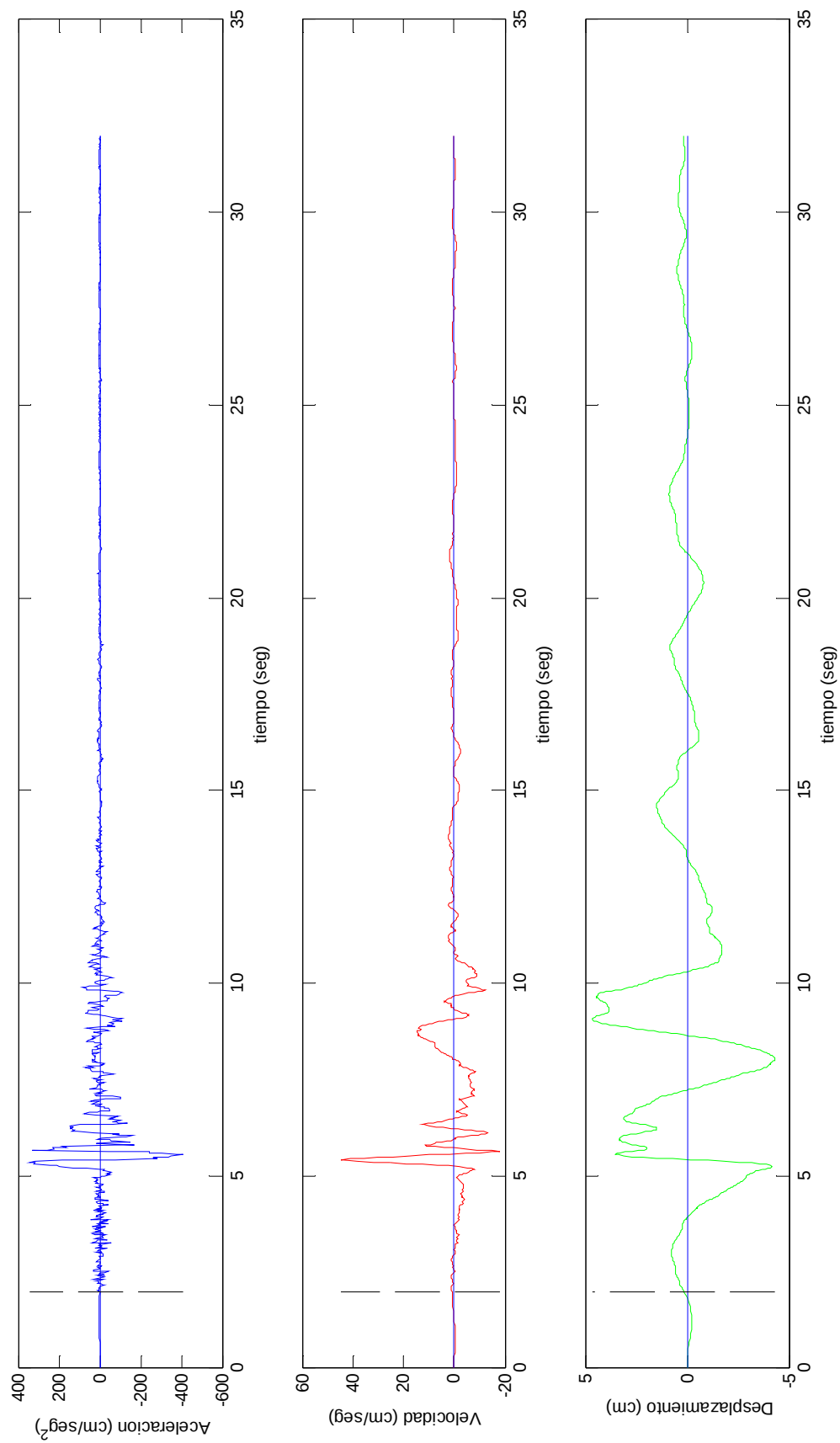


Figura A.41 Registro Pacoima Dam, componente S05E, 17-enero-1994. Corregido.

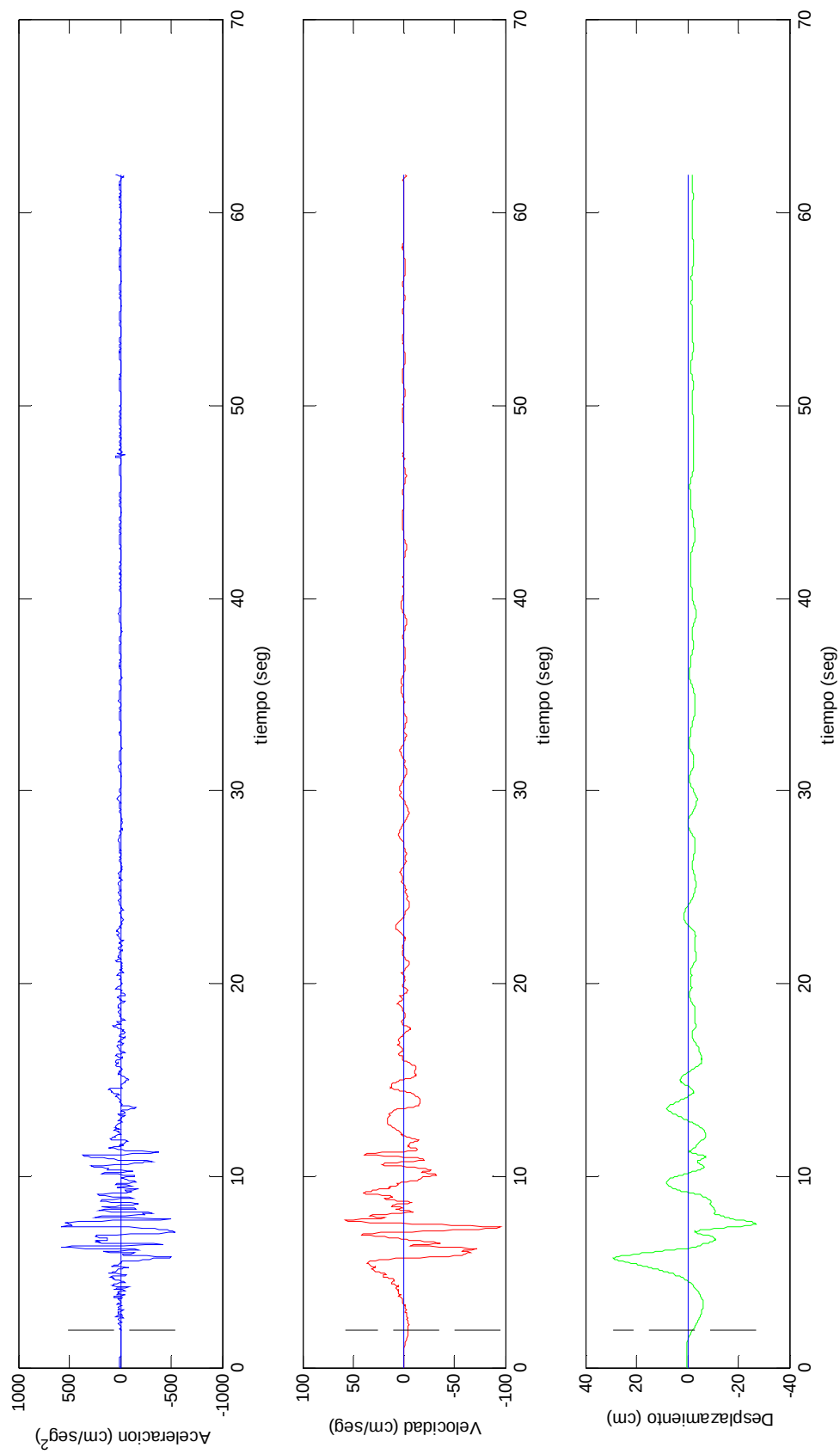


Figura A.42 Registro Newhall, componente N00E, 17-enero-1994. Corregido.

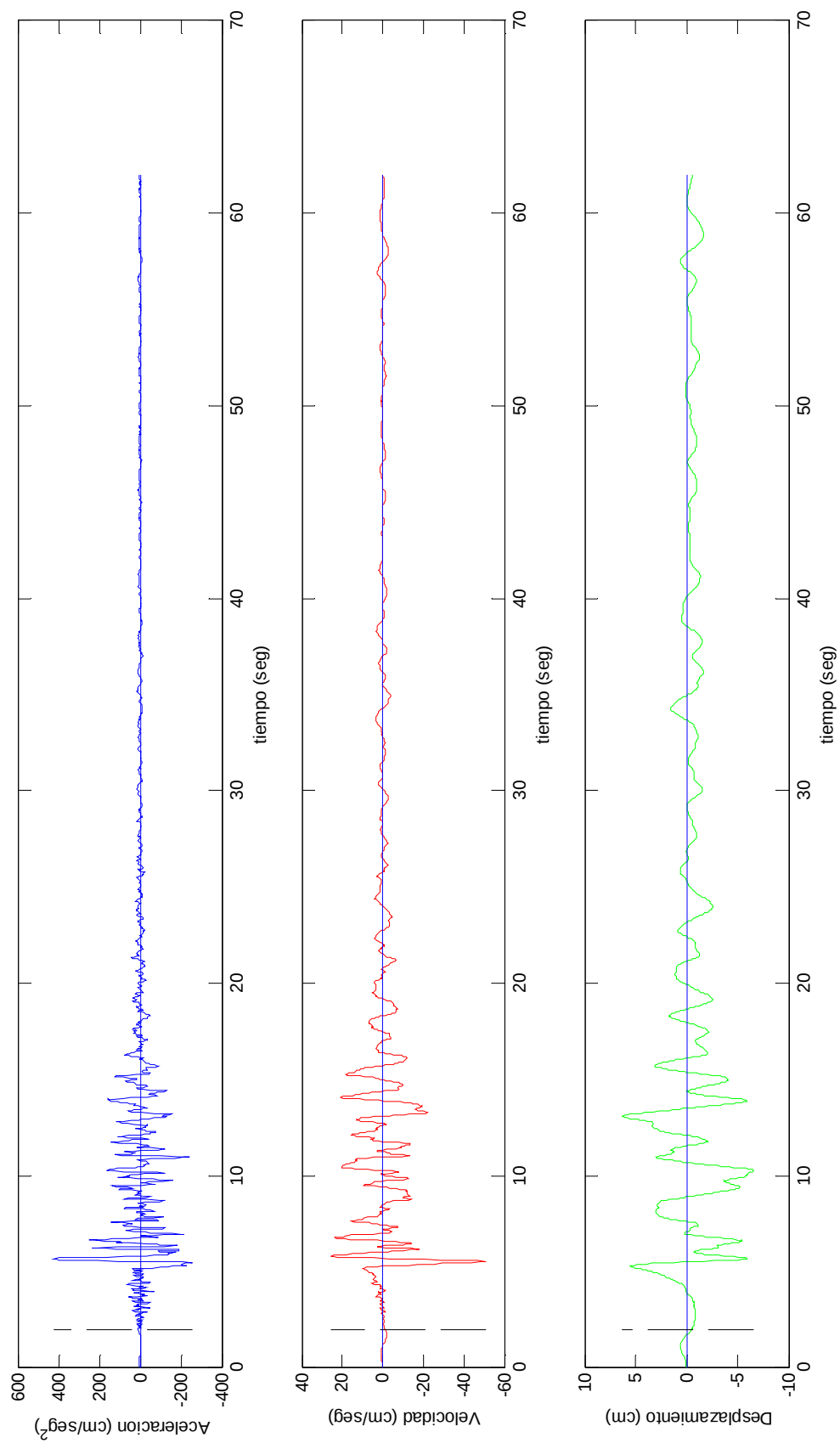


Figura A.43 Registro Pacoima Kagel, componente N00E, 17-enero-1994. Corregido.

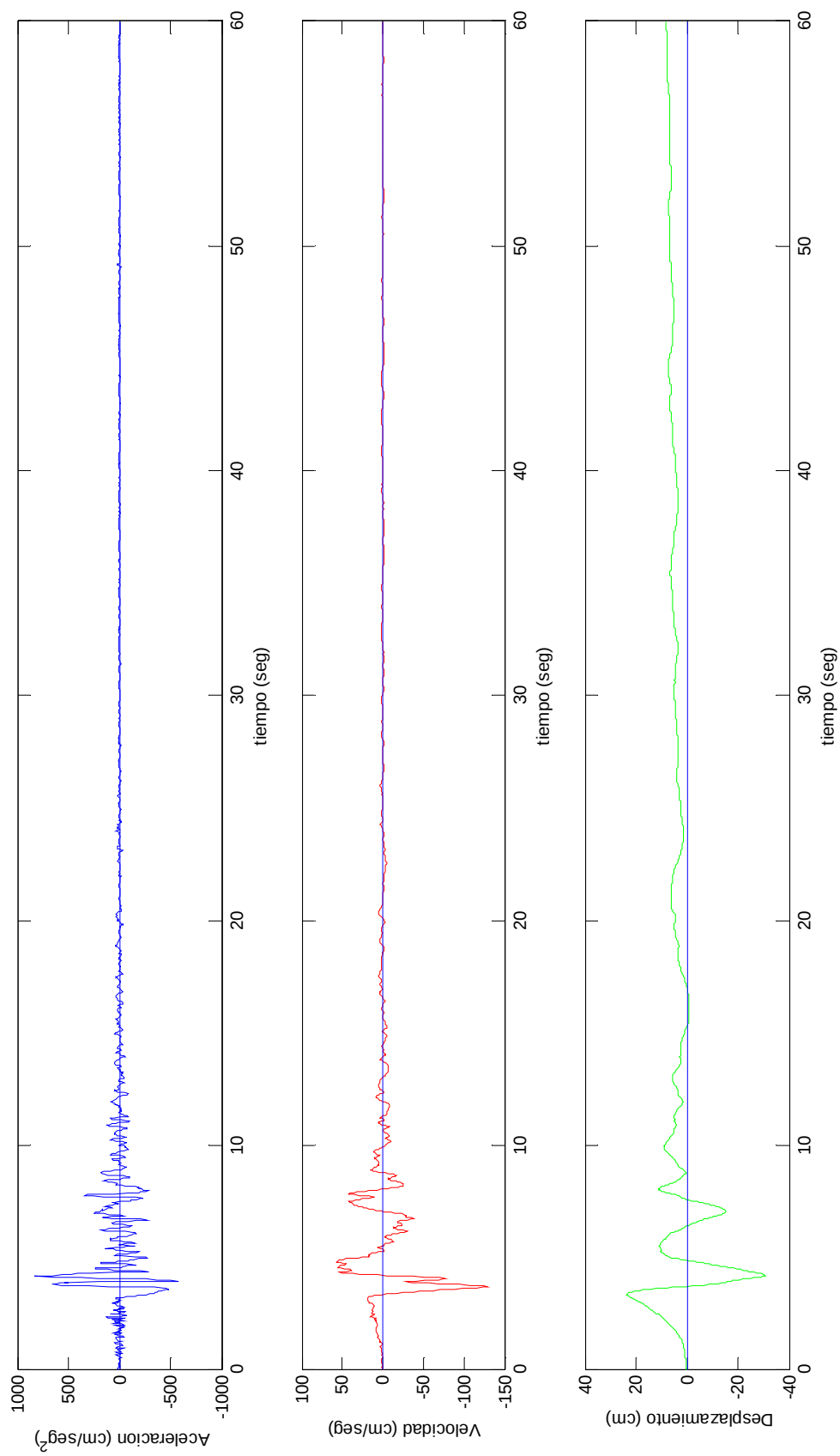


Figura A.44 Registro Sylmar, componente N00E, 17-enero-1994. Corregido.

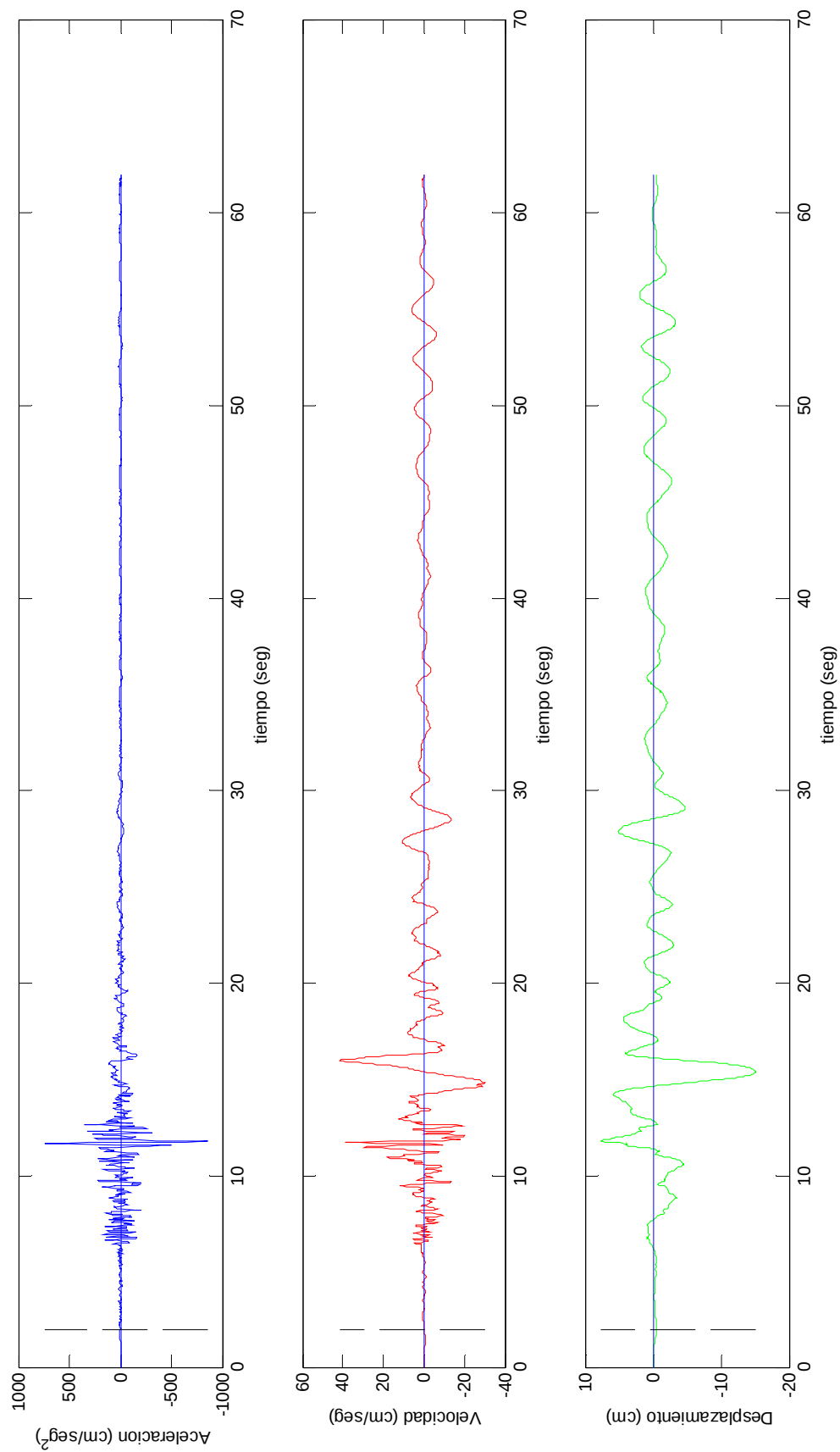


Figura A.45 Registro Santa Monica, componente N90E, 17-enero-1994. Corregido.

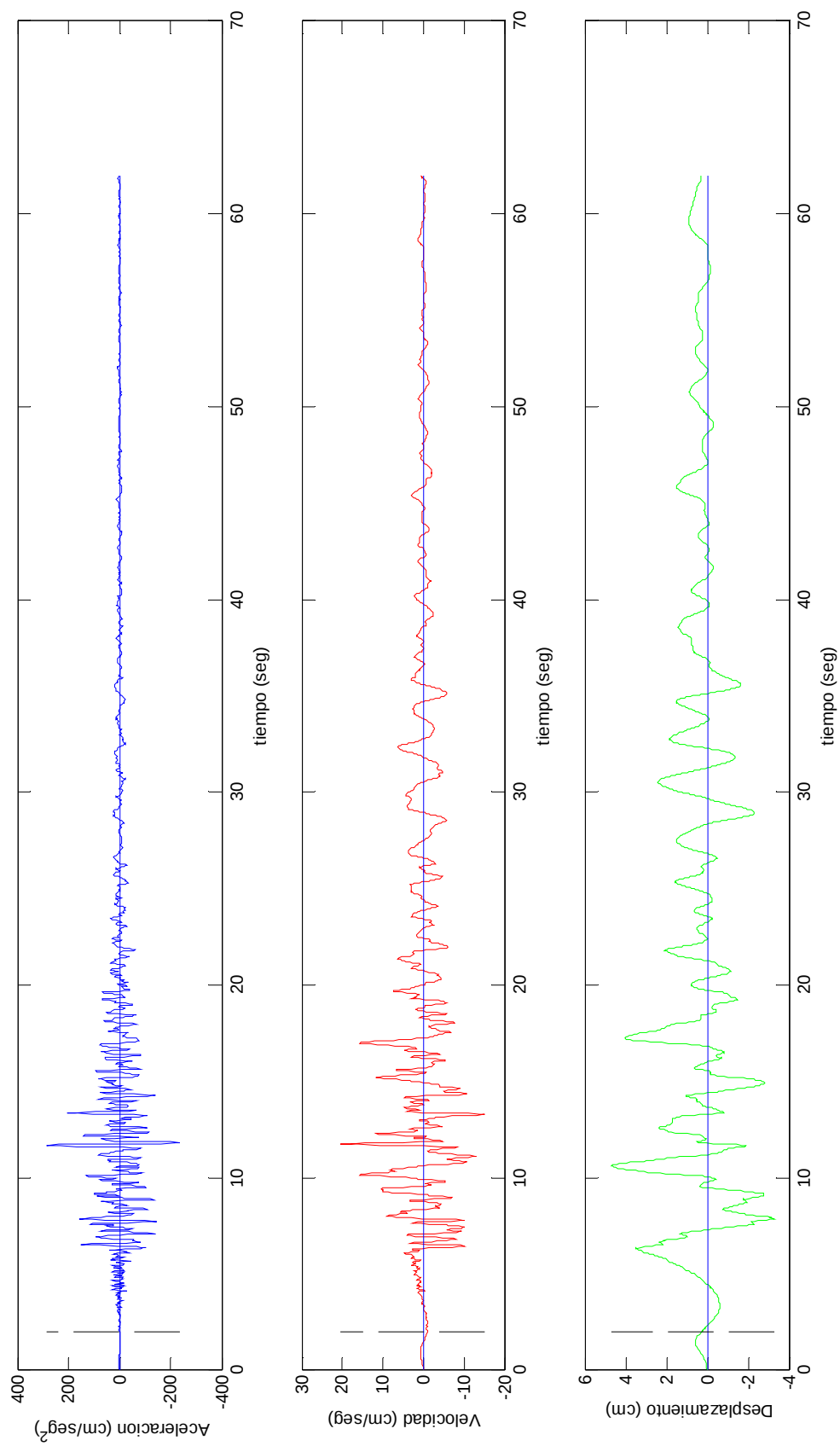


Figura A.46 Registro Moorpark, componente S00E, 17-enero-1994. Corregido.

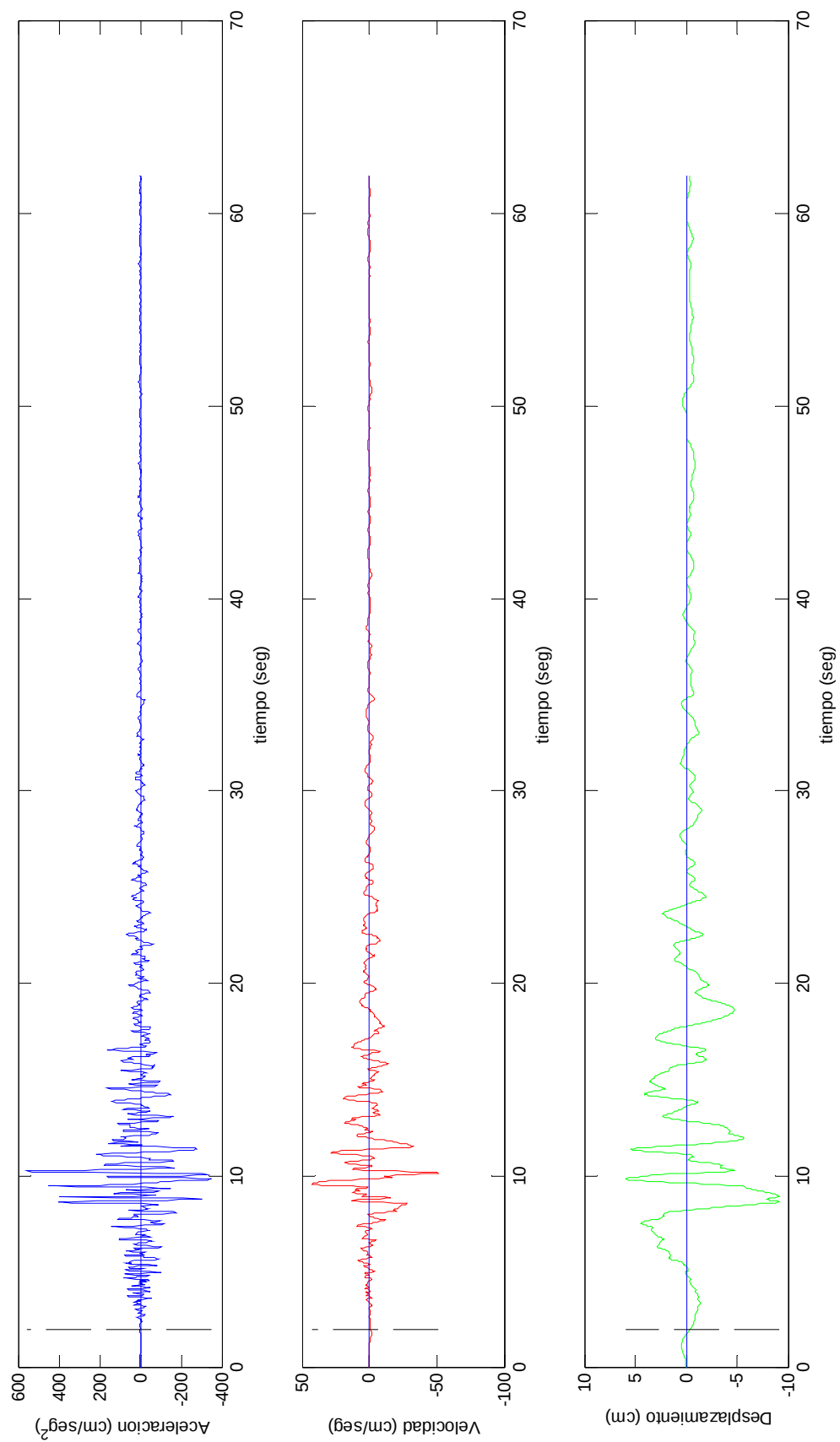


Figura A.47 Registro Castaic, componente N90E, 17-enero-1994. Corregido.

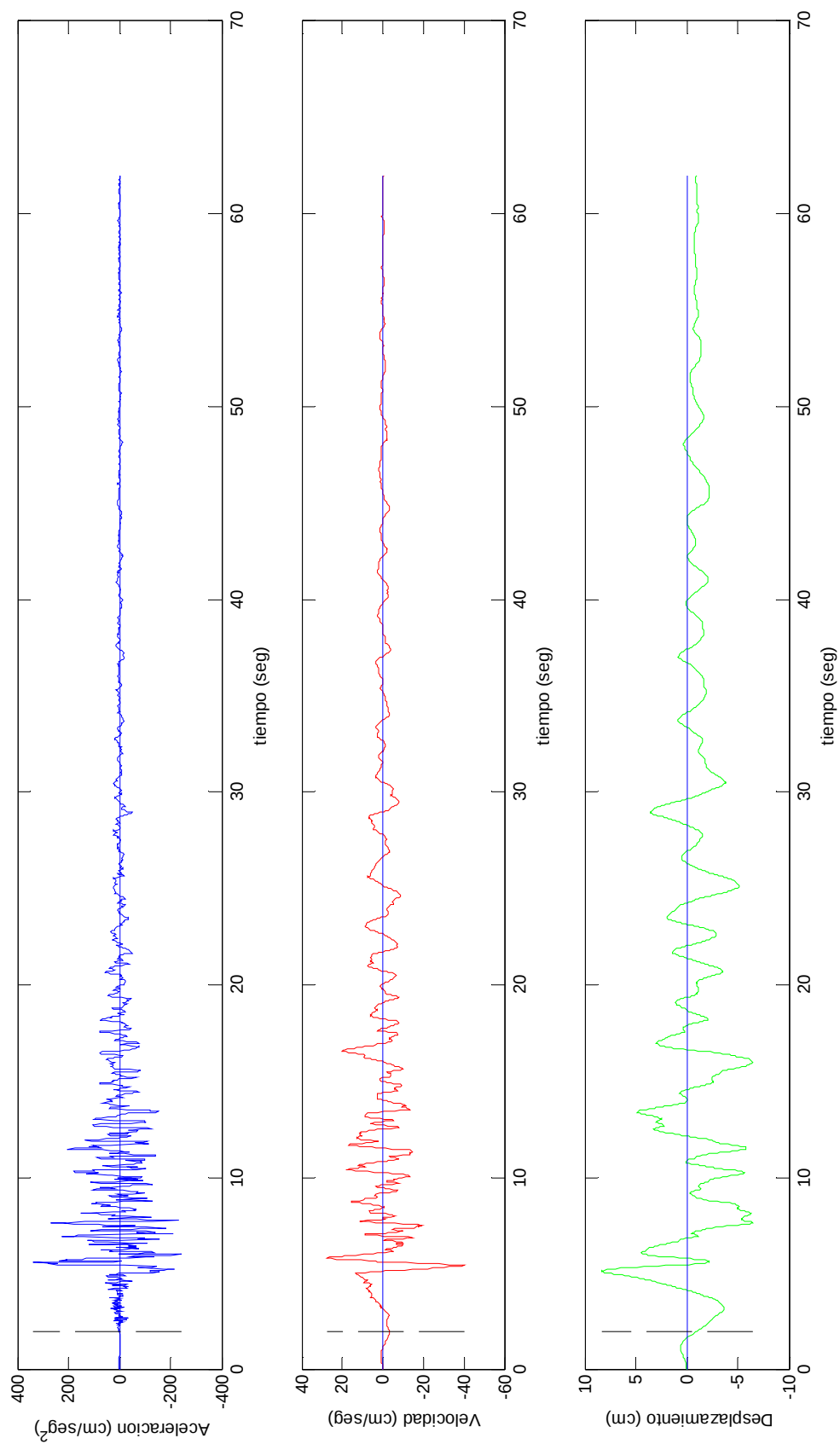


Figura A.48 Registro Arleta, componente N90E, 17-enero-1994. Corregido.

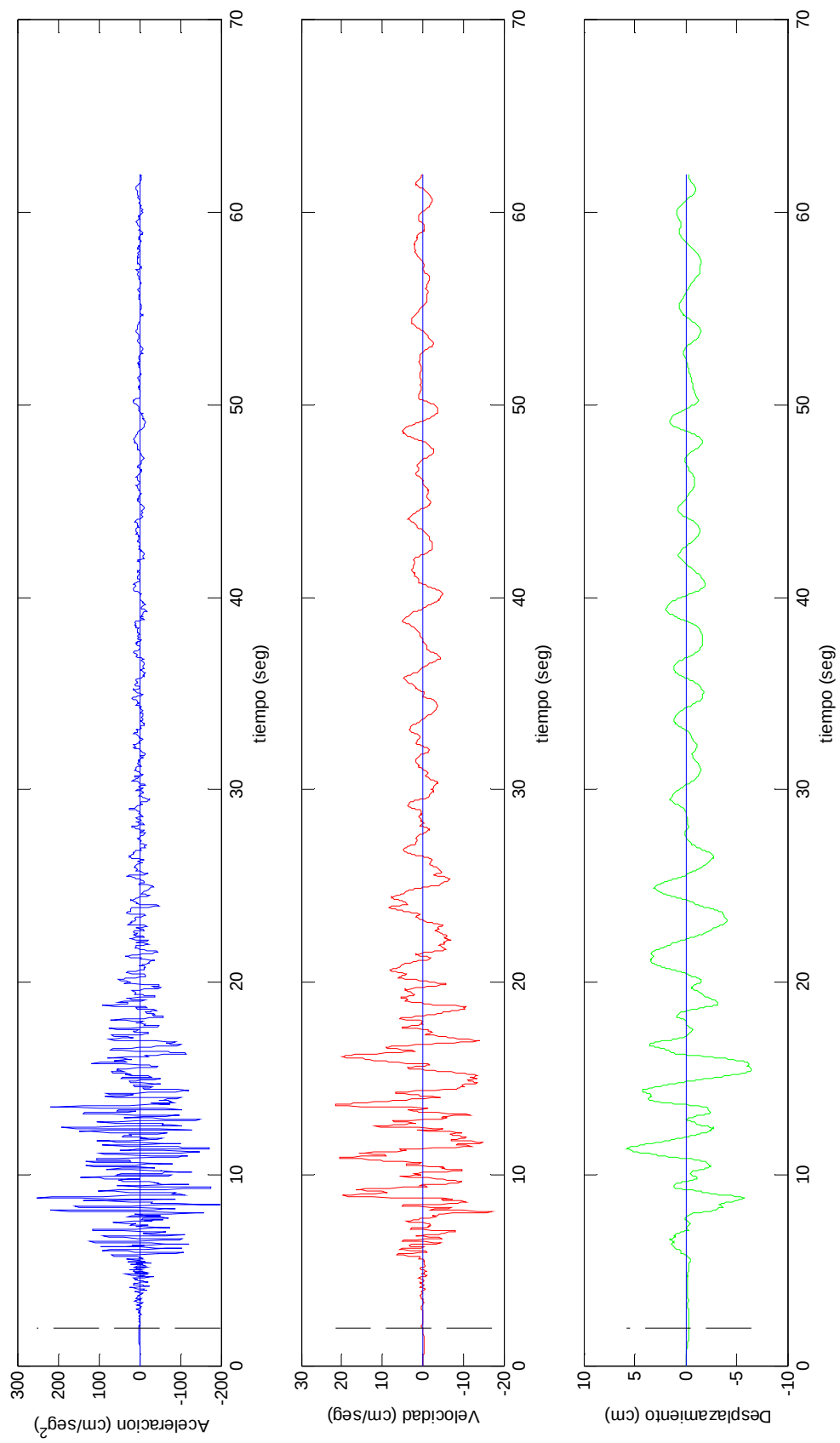


Figura A.49 Registro Century City L.A., componente N90E, 17-enero-1994. Corregido.

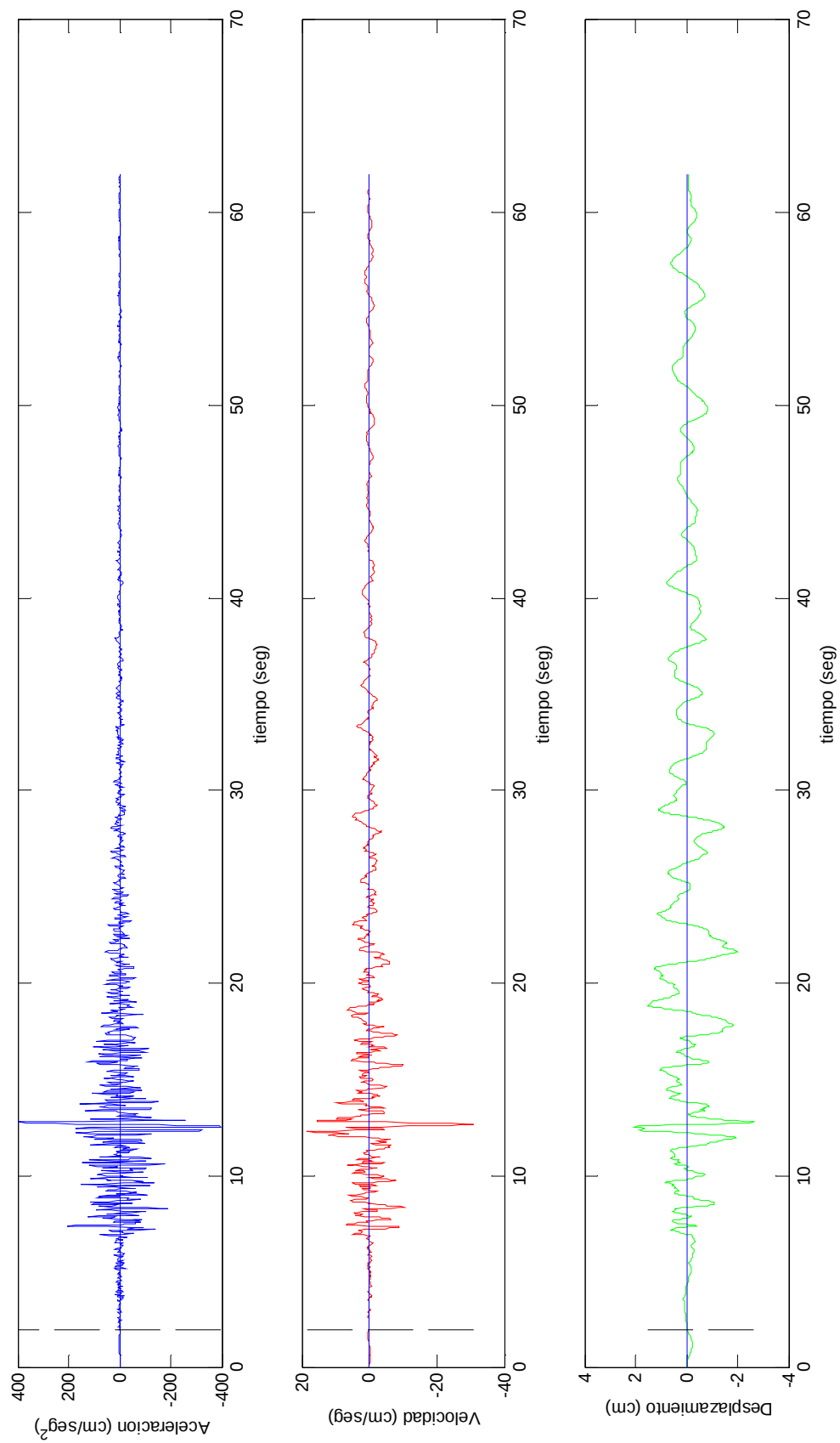


Figura A.50 Registro Obregon Park L.A., componente N00E, 17-enero-1994. Corregido.

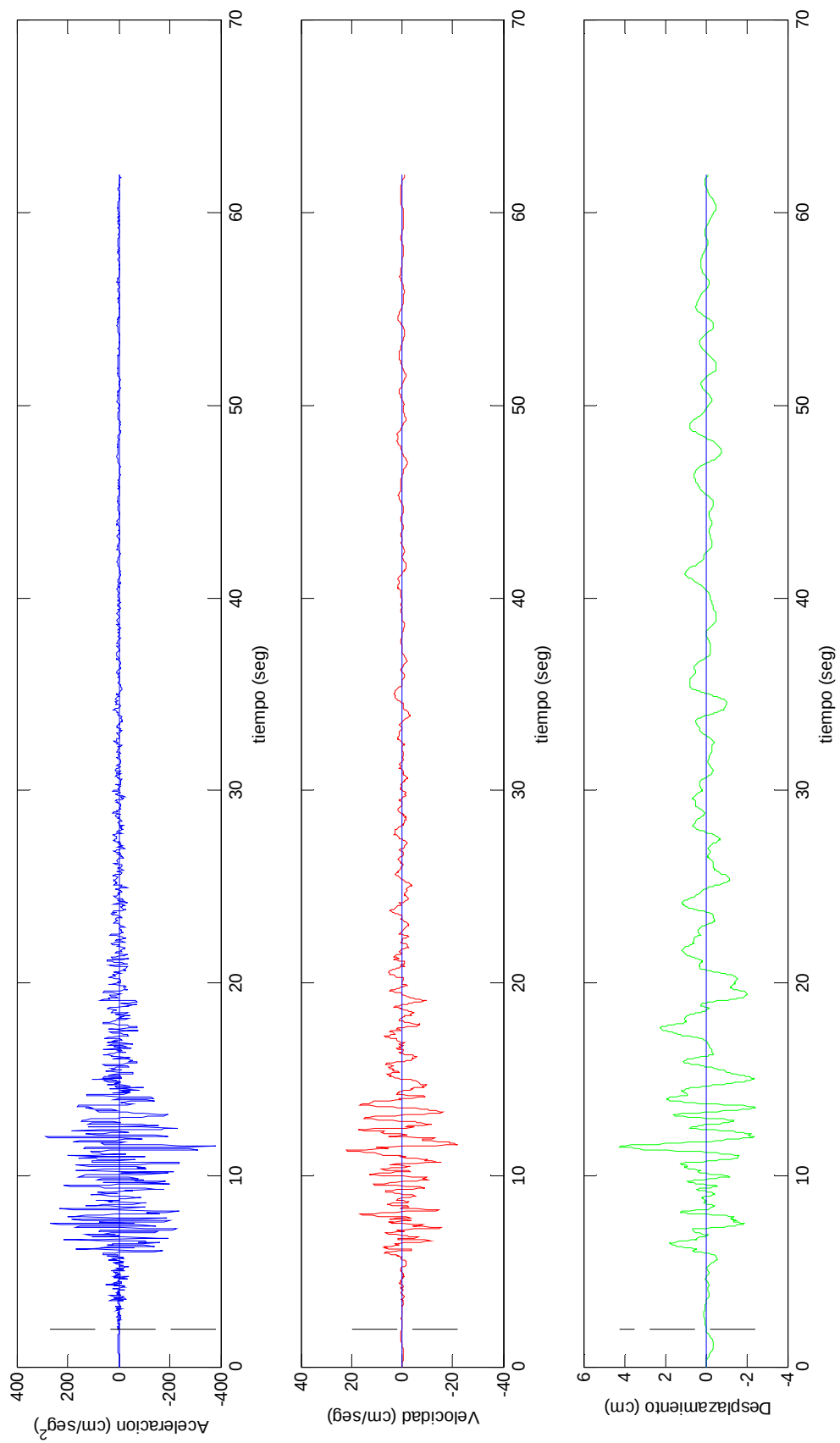


Figura A.51 Registro Hollywood L.A., componente N00E, 17-enero-1994. Corregido.

**ANEXO B: AJUSTE TRAPEZOIDAL PARA TODOS LOS CASOS
CONSIDERADOS EN ESTE ESTUDIO**

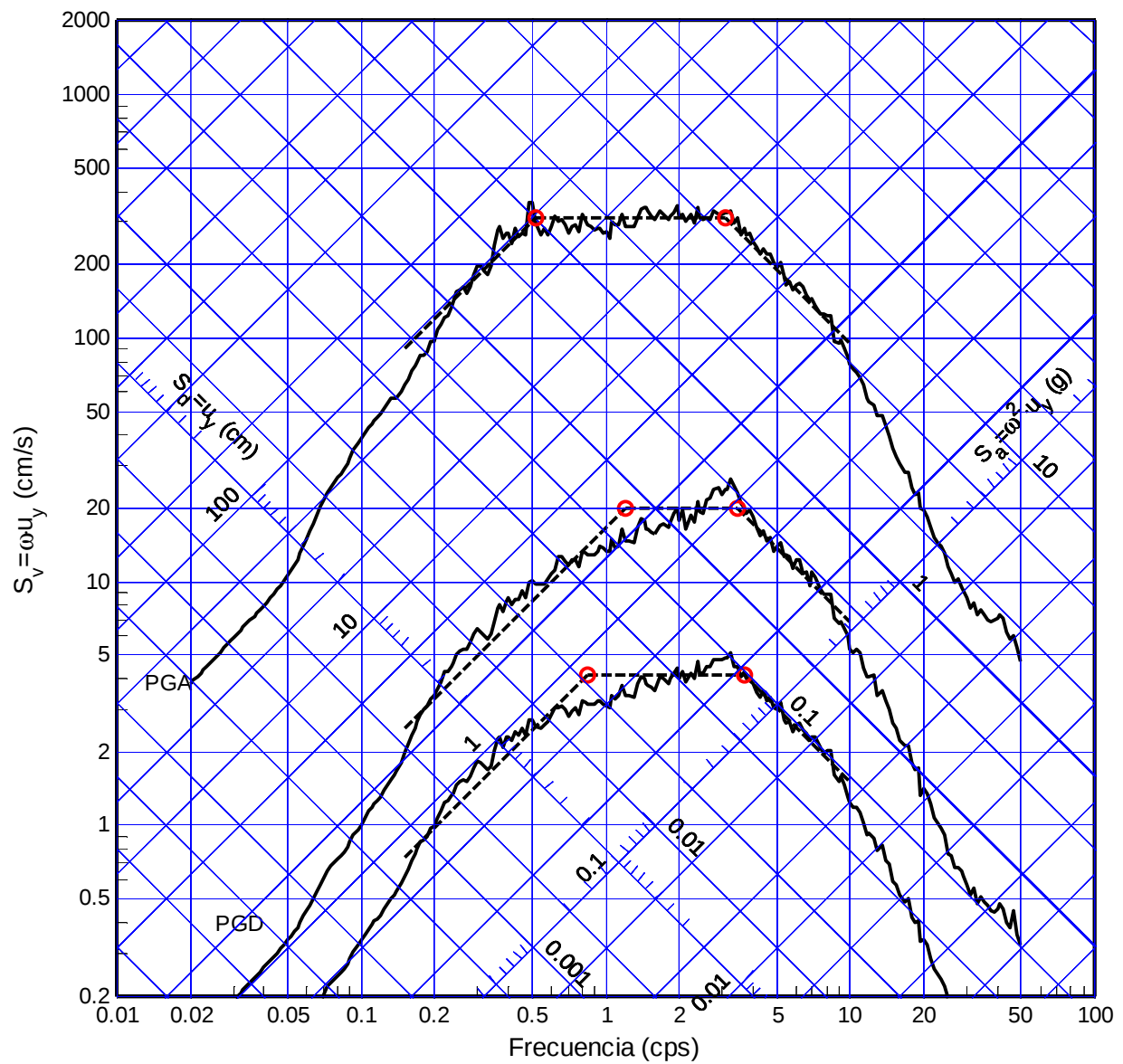


Figura B.1 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=0\%$

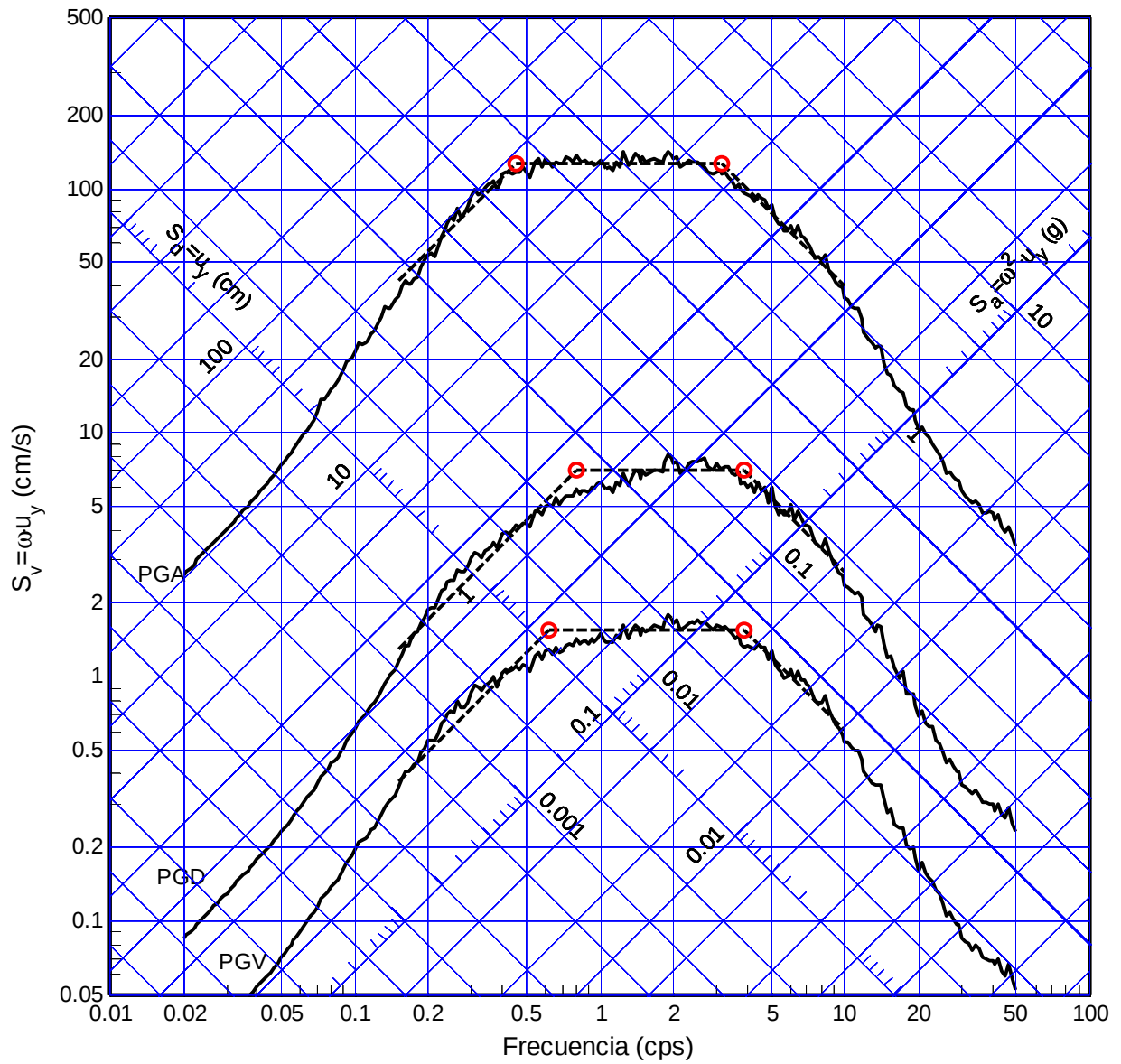


Figura B.2 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=0\%$

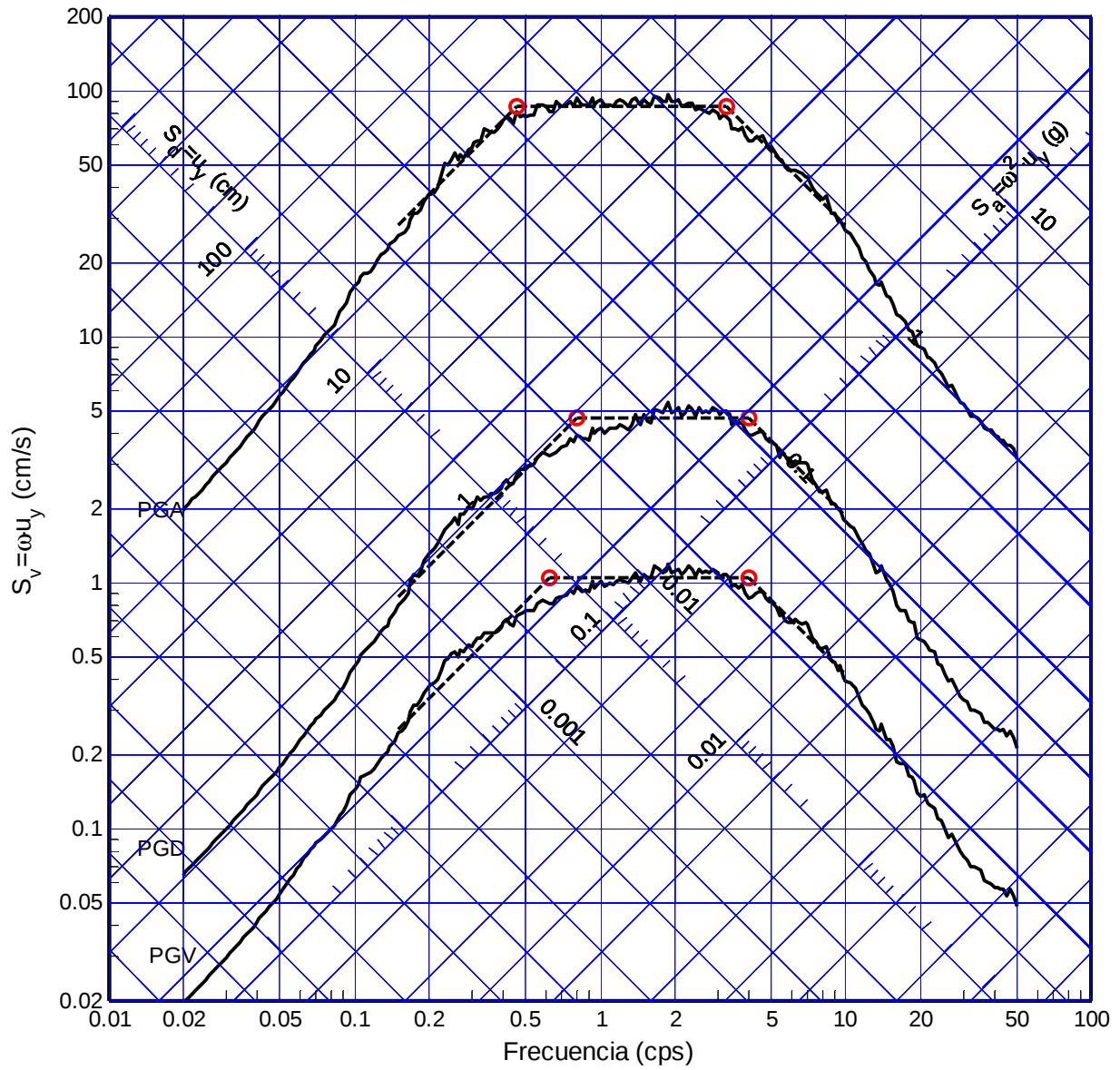


Figura B.3 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=0\%$

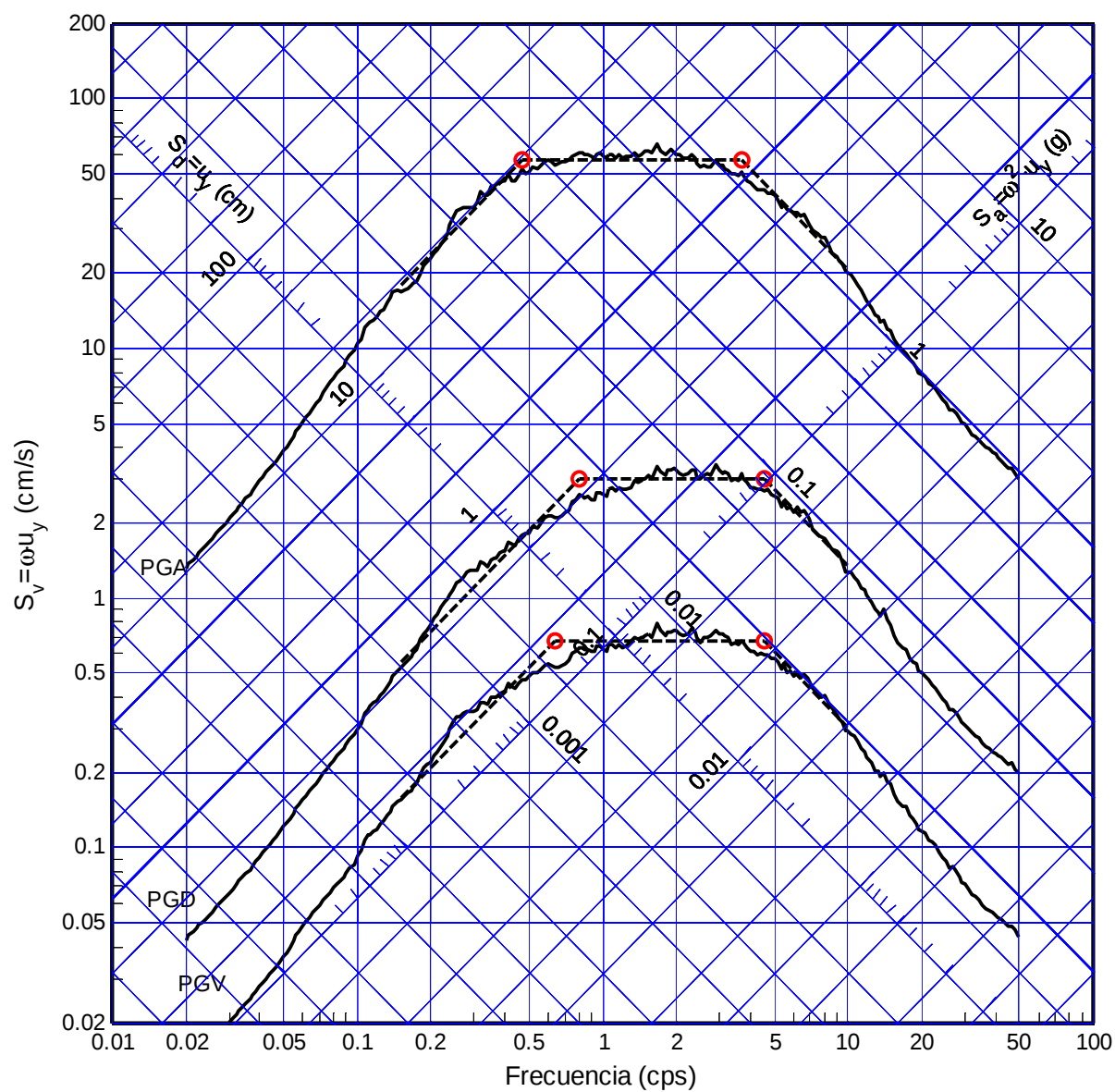


Figura B.4 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=0\%$

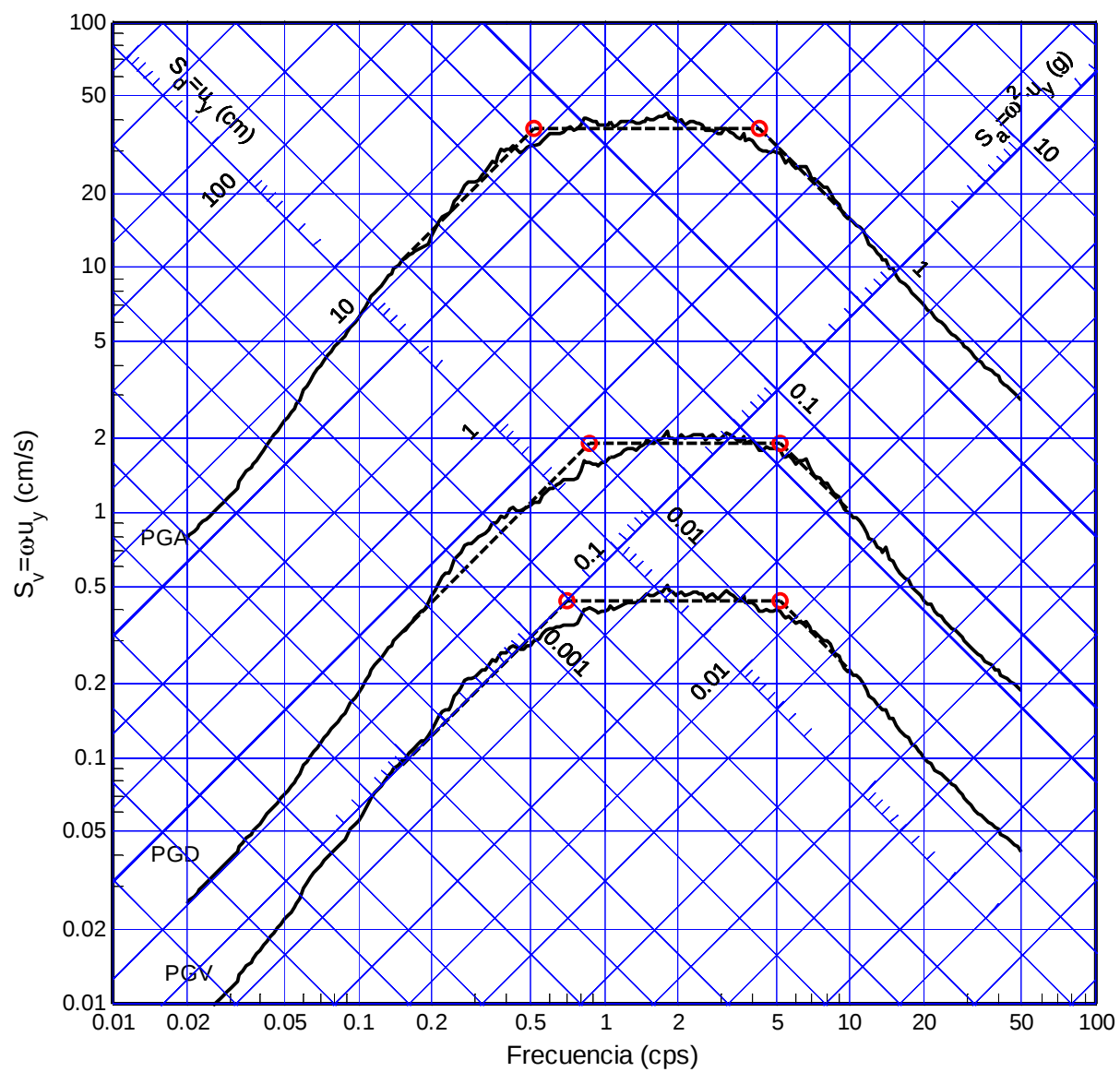


Figura B.5 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=0\%$

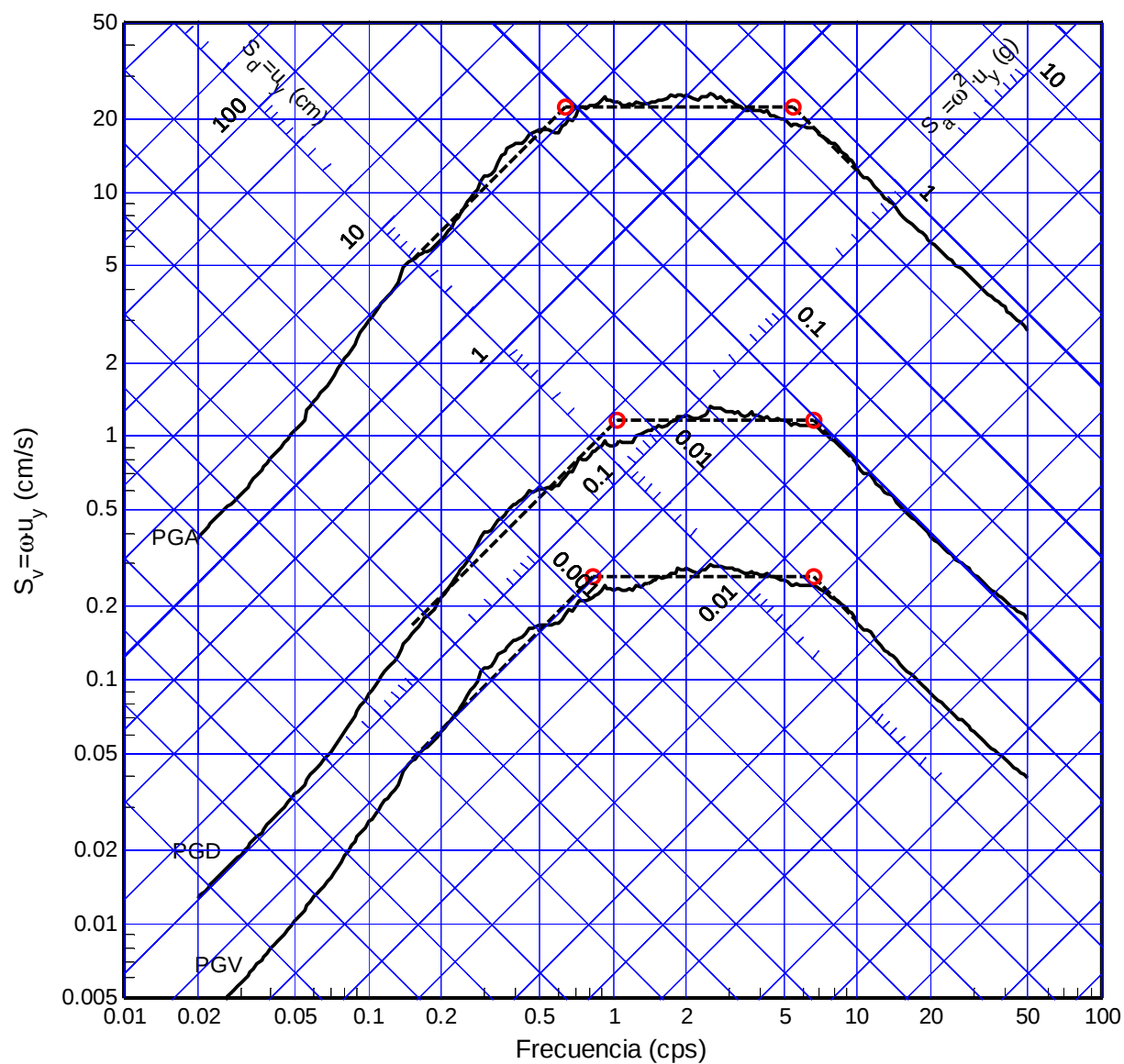


Figura B.6 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=0\%$

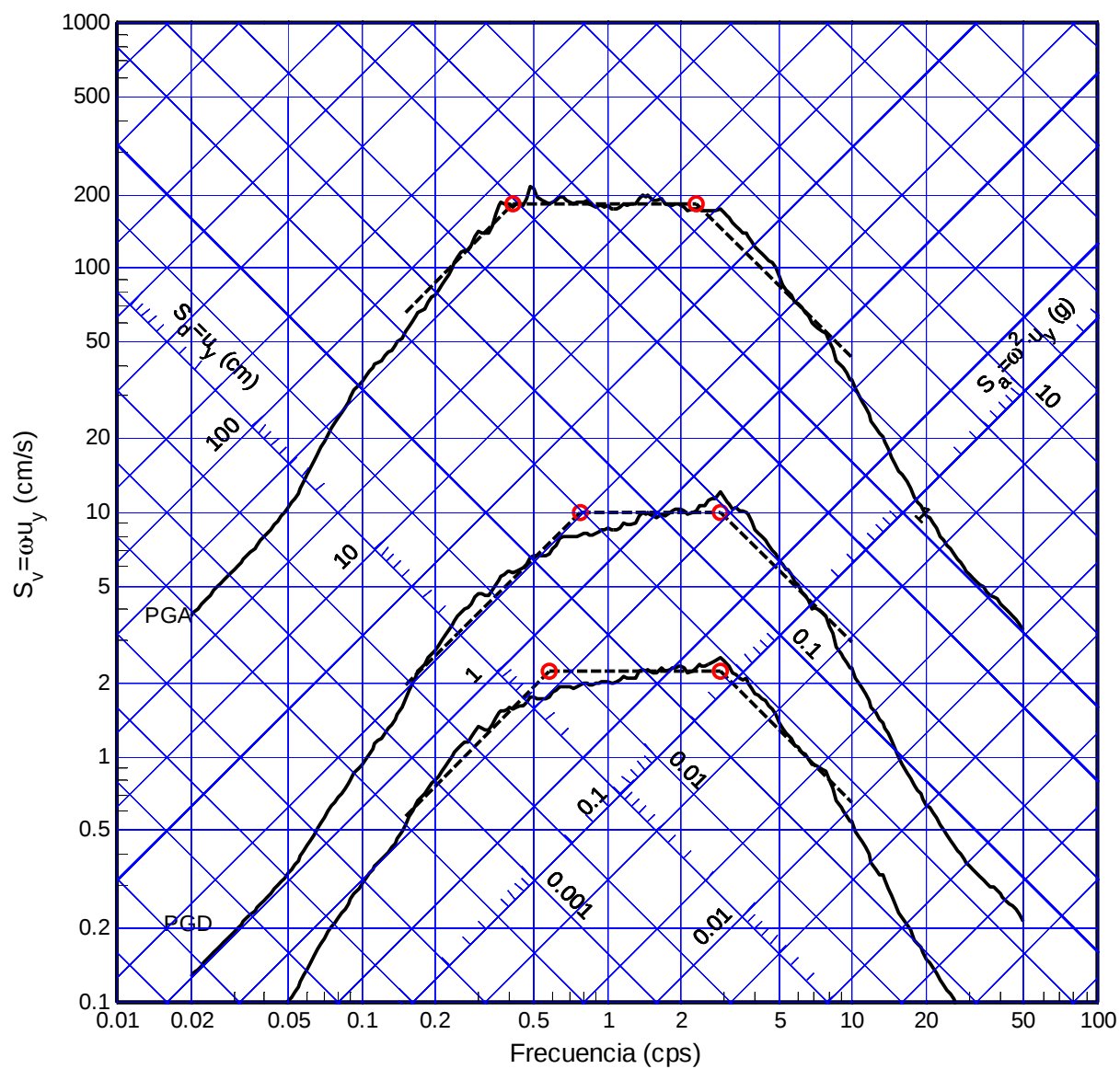


Figura B.7 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=2\%$

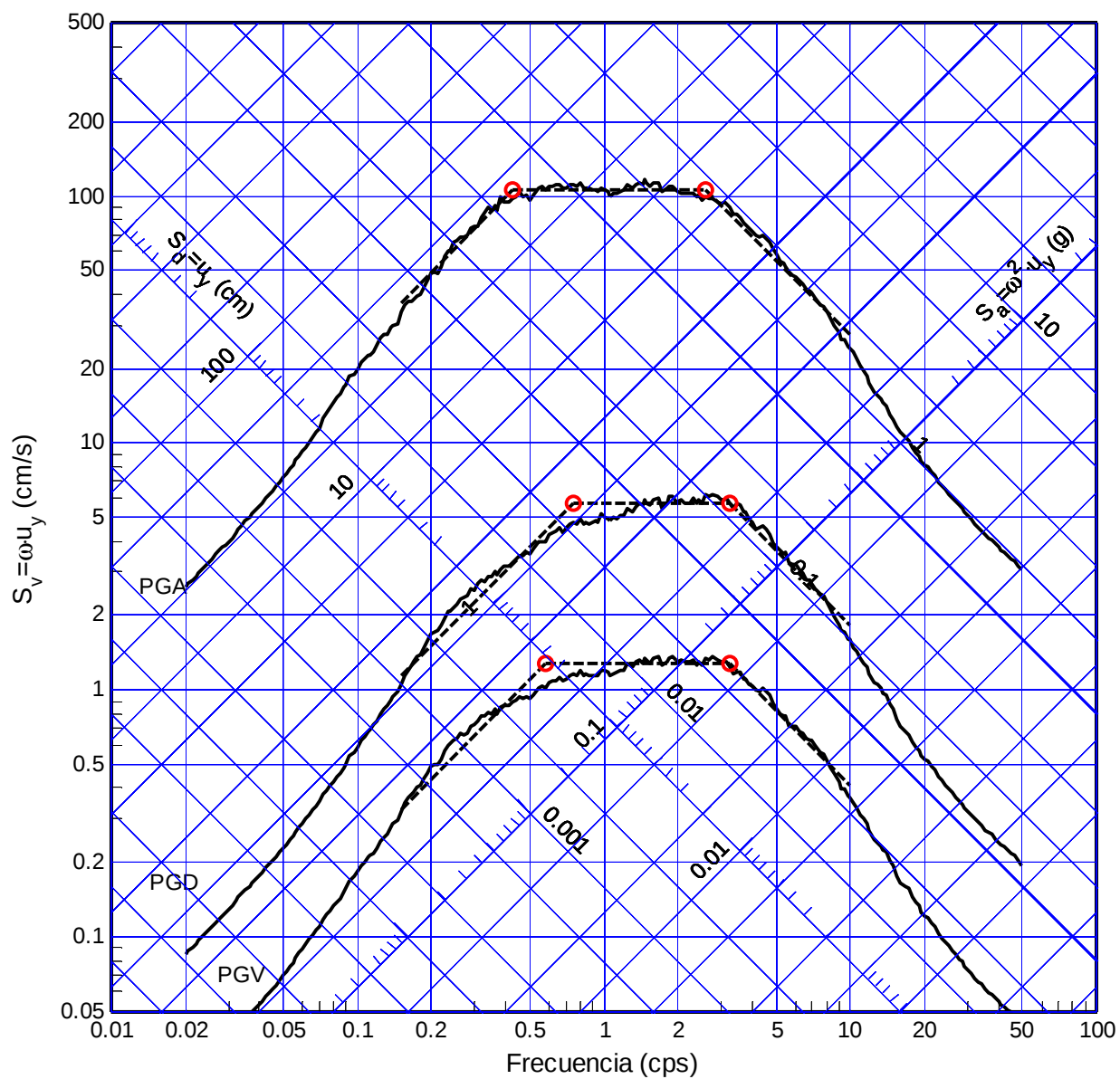


Figura B.8 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=2\%$

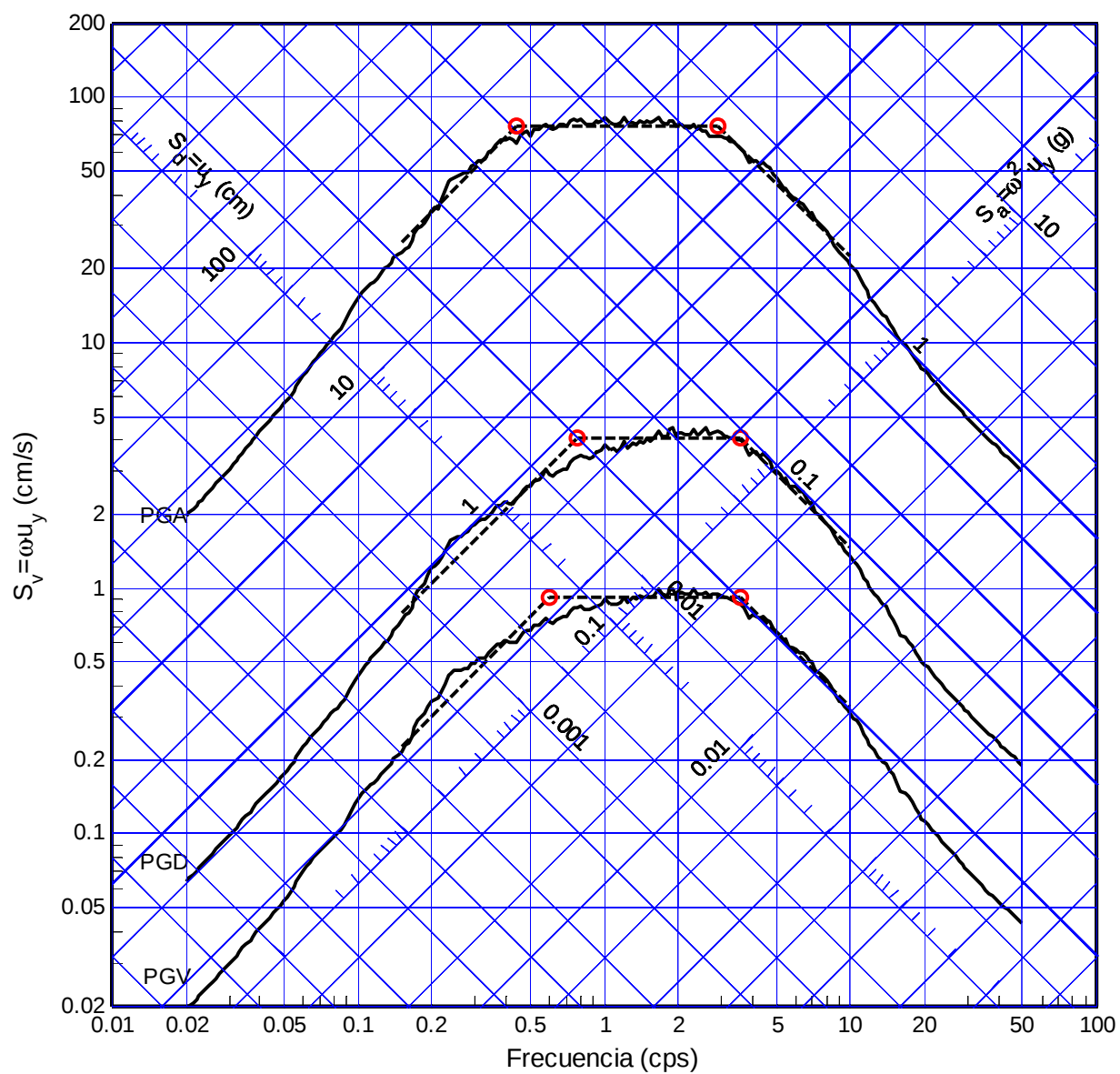


Figura B.9 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=2\%$

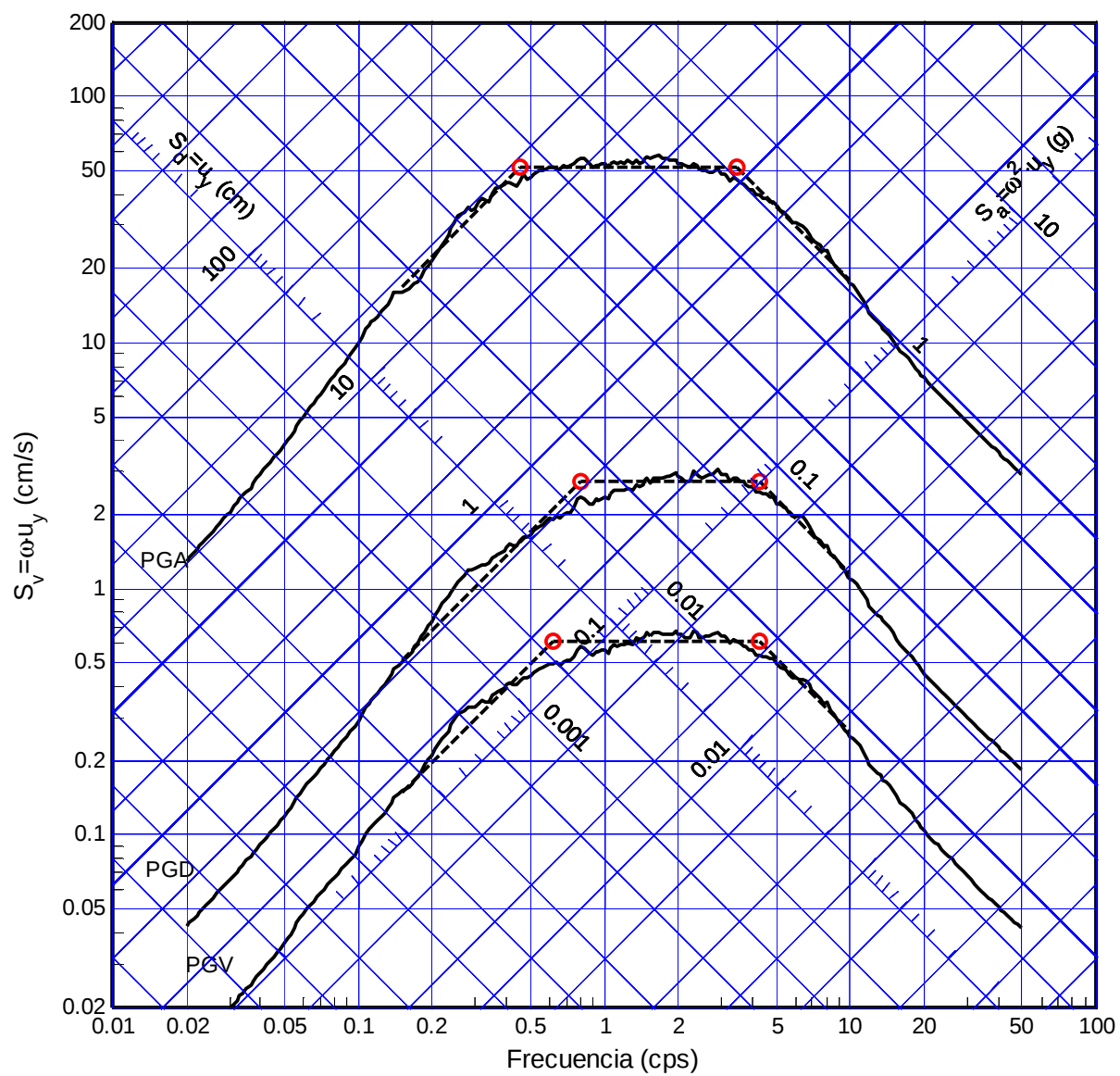


Figura B.10 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=2\%$

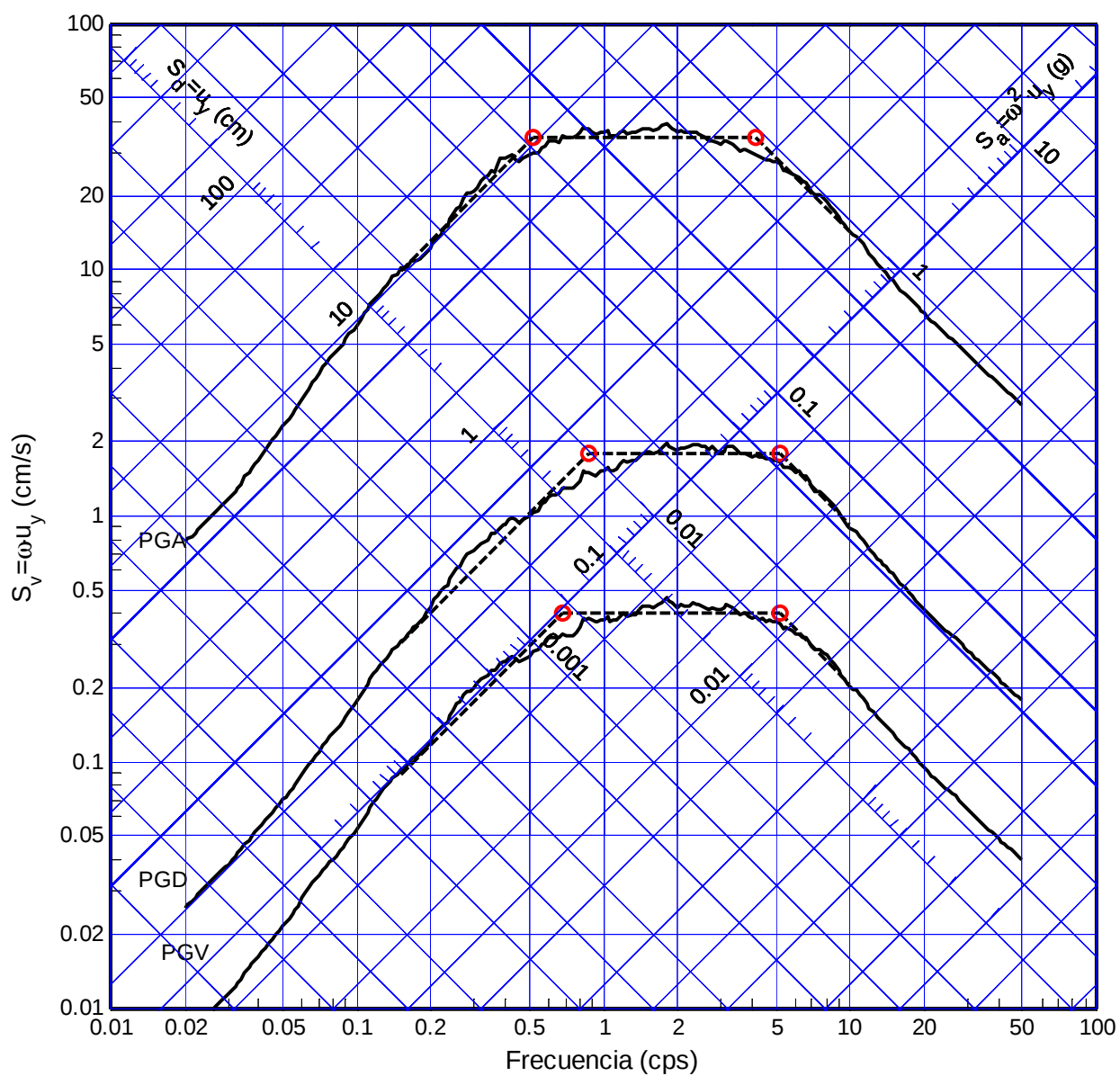


Figura B.11 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=2\%$

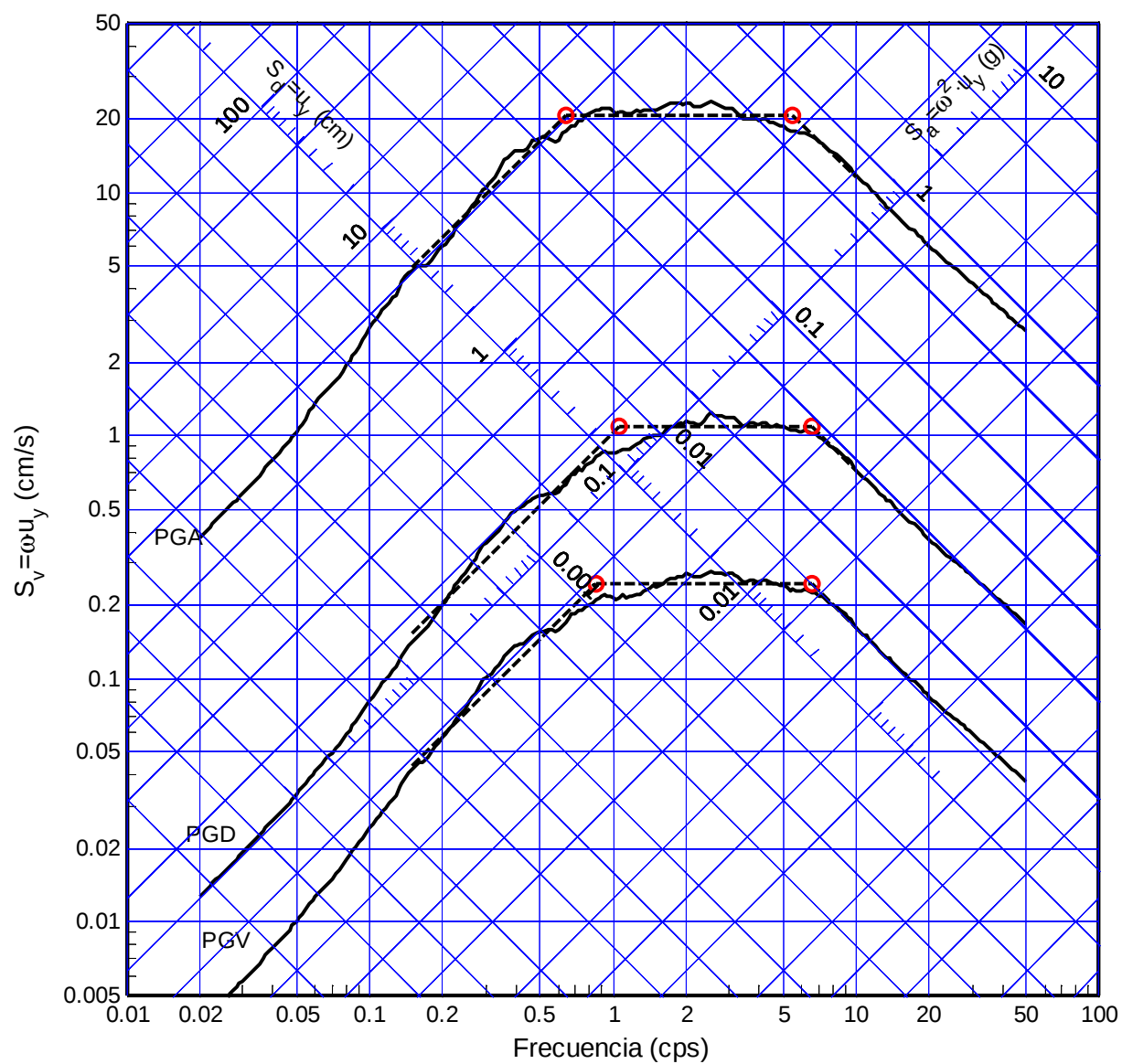


Figura B.12 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=2\%$

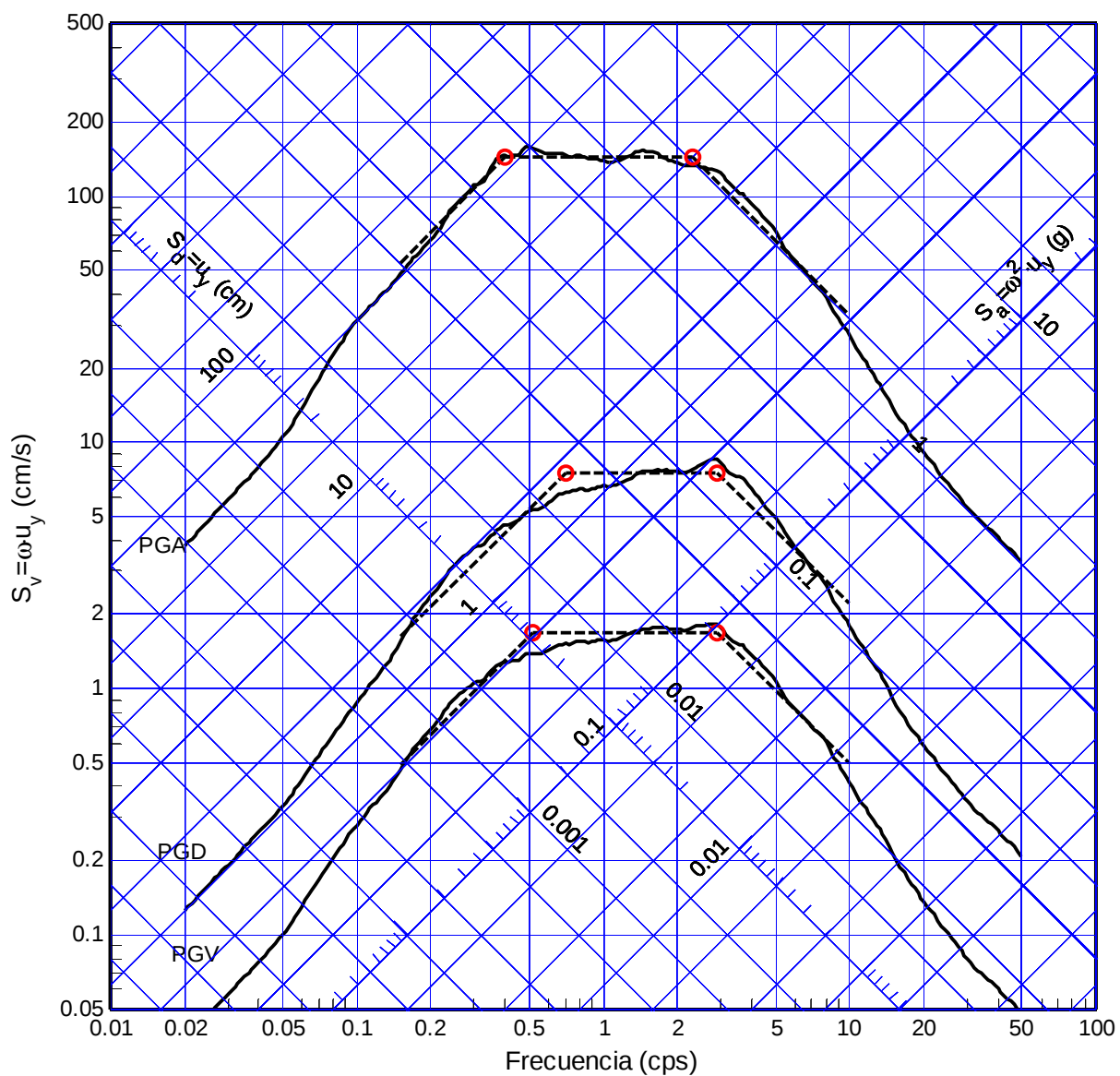


Figura B.13 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=5\%$

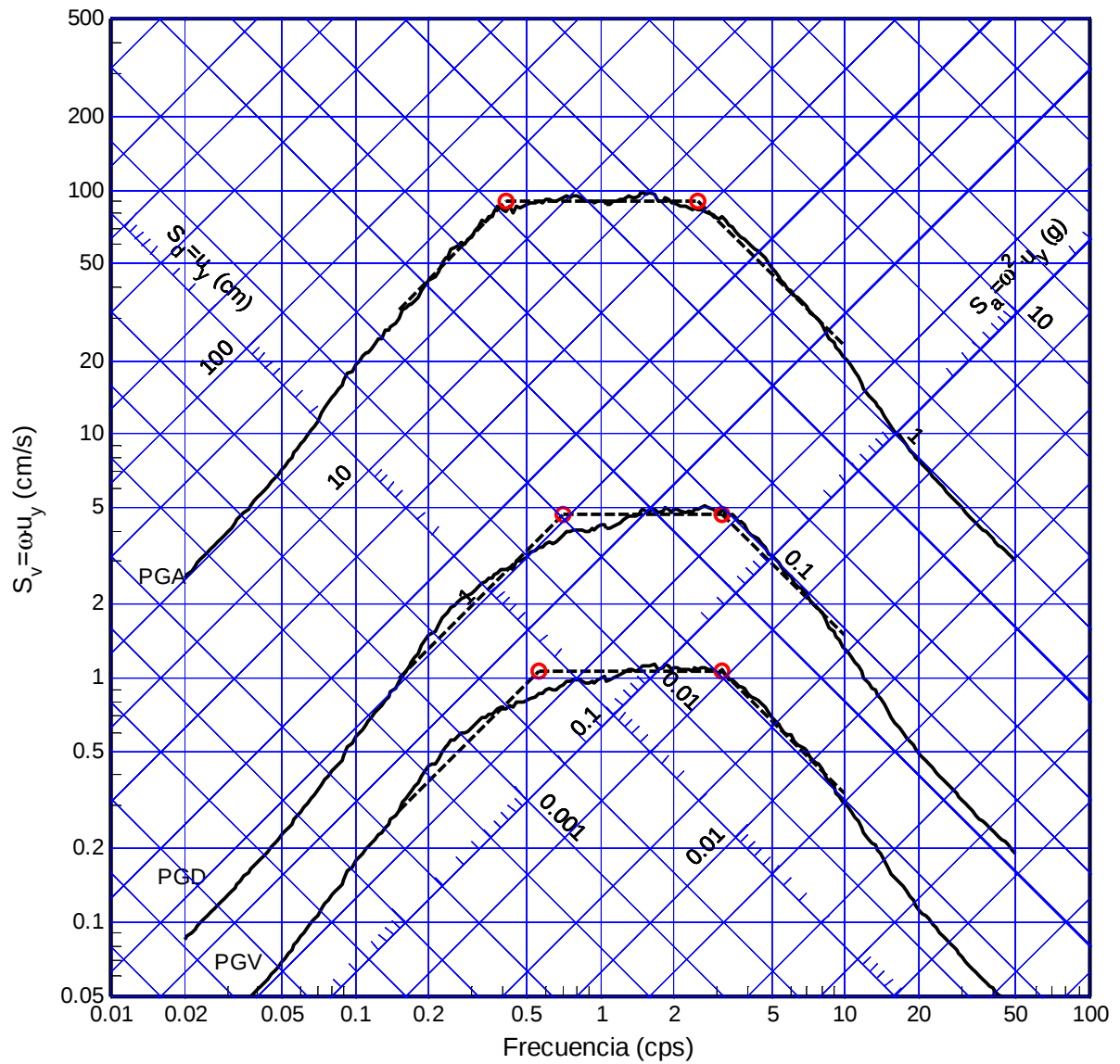


Figura B.14 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=5\%$

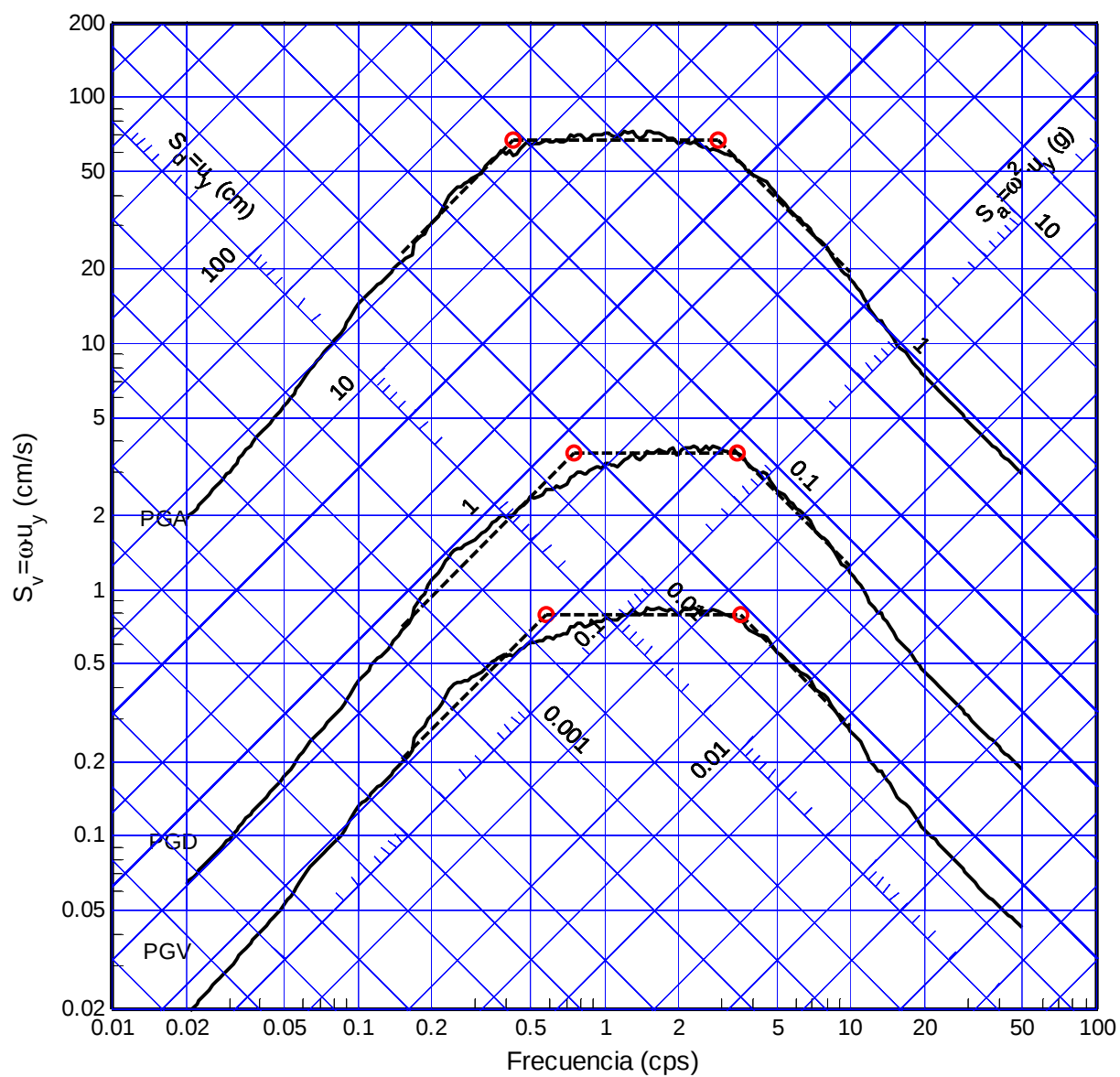


Figura B.15 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=5\%$

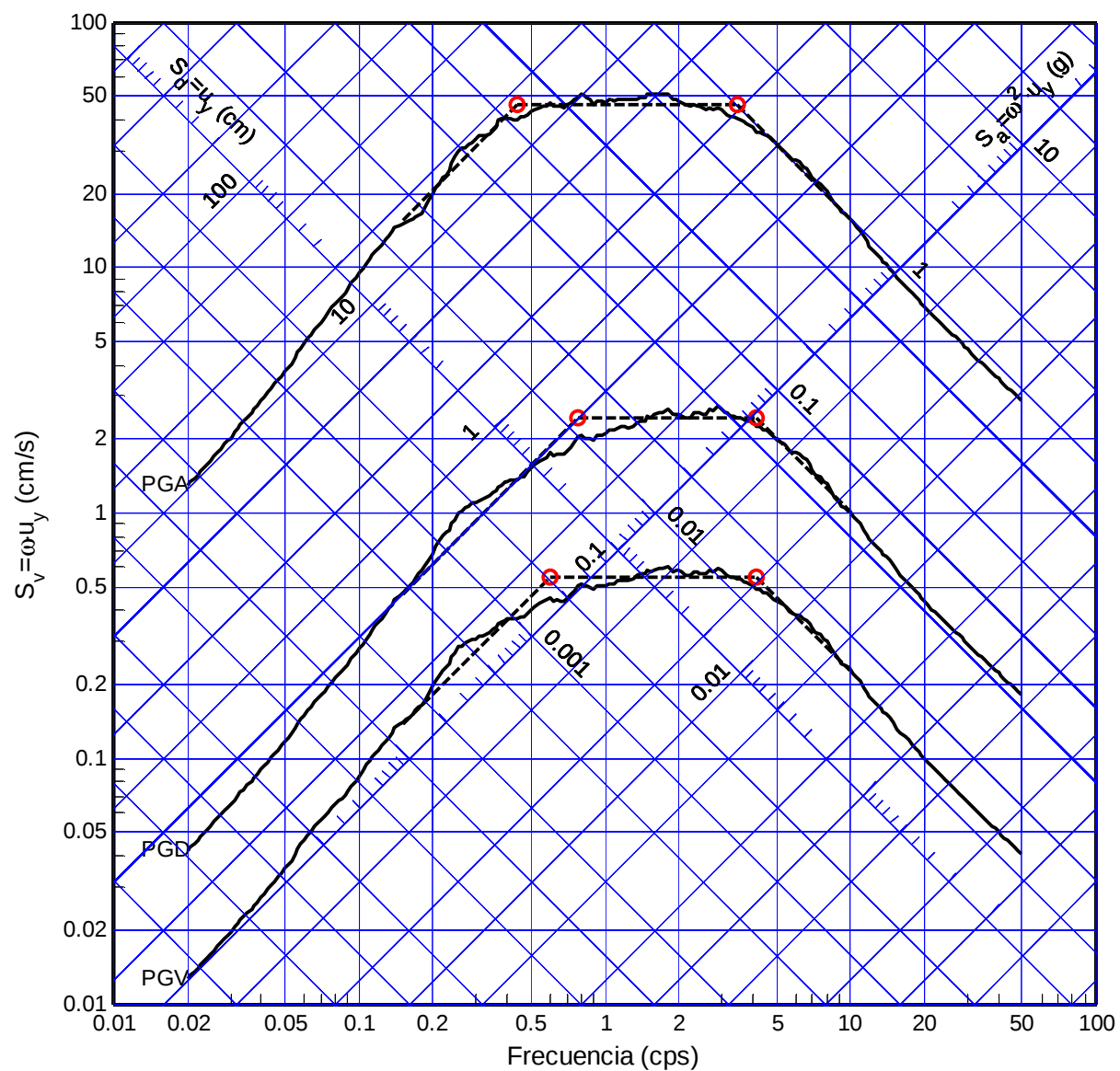


Figura B.16 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$

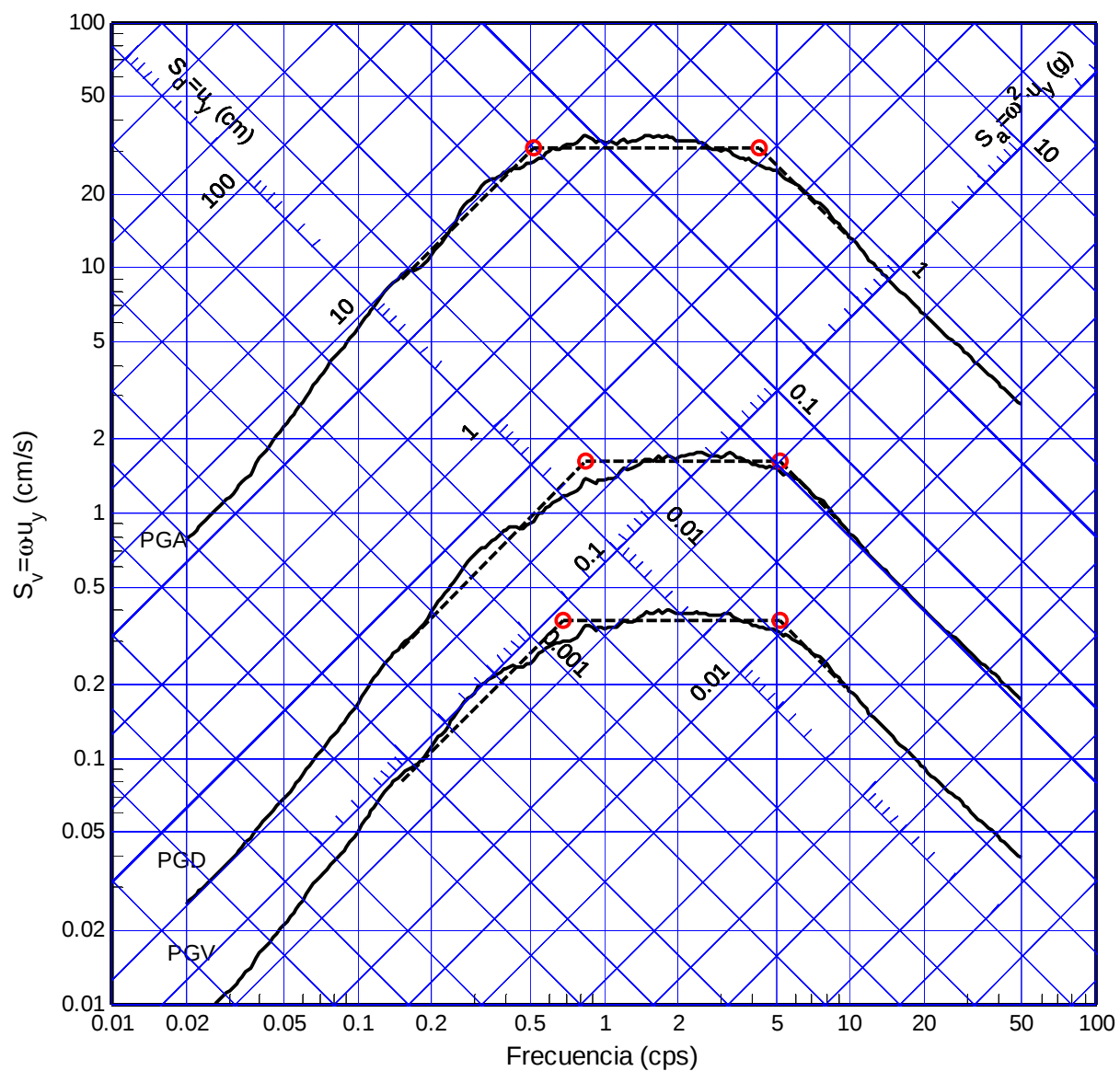


Figura B.17 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=5\%$

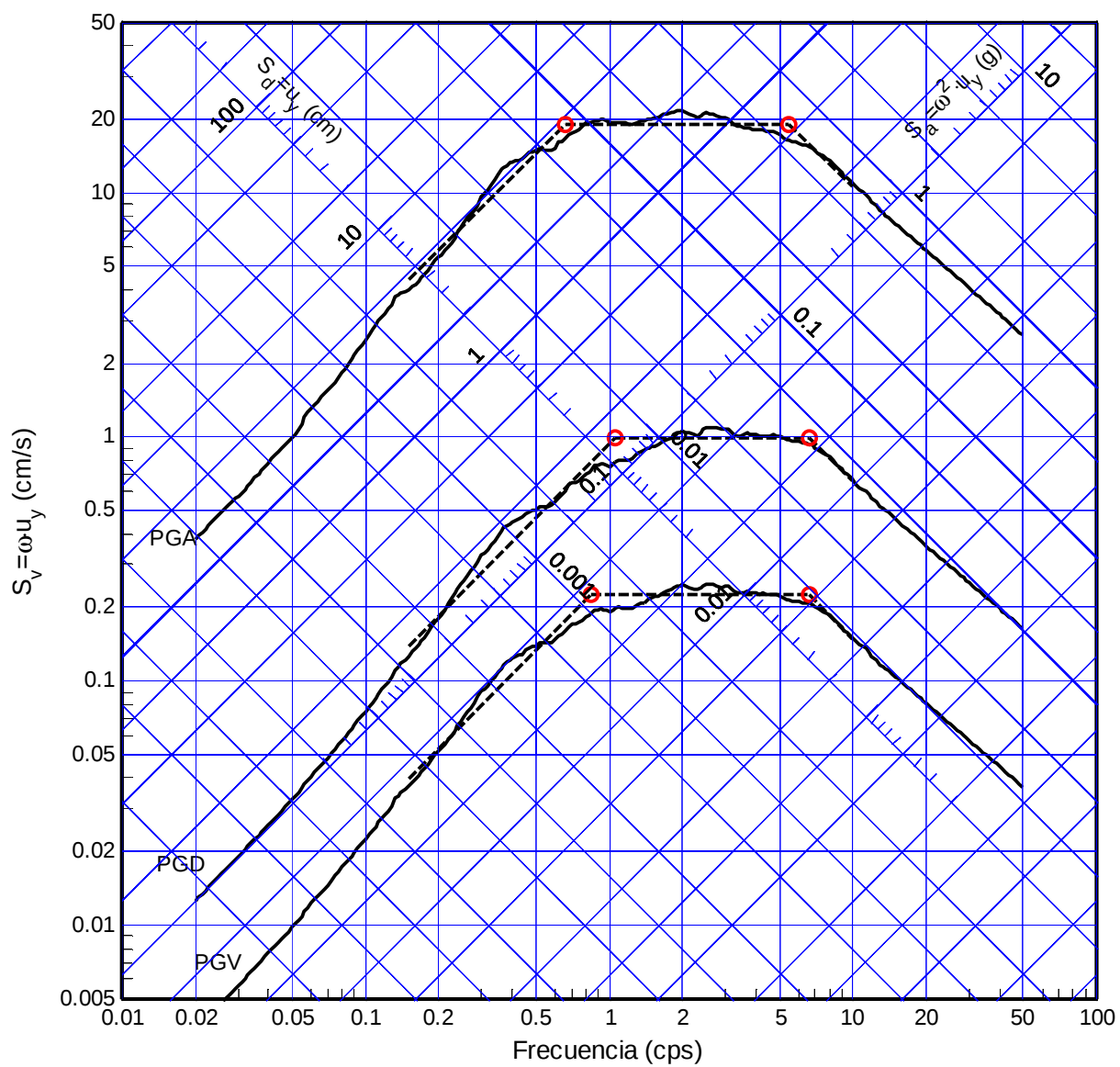


Figura B.18 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=5\%$

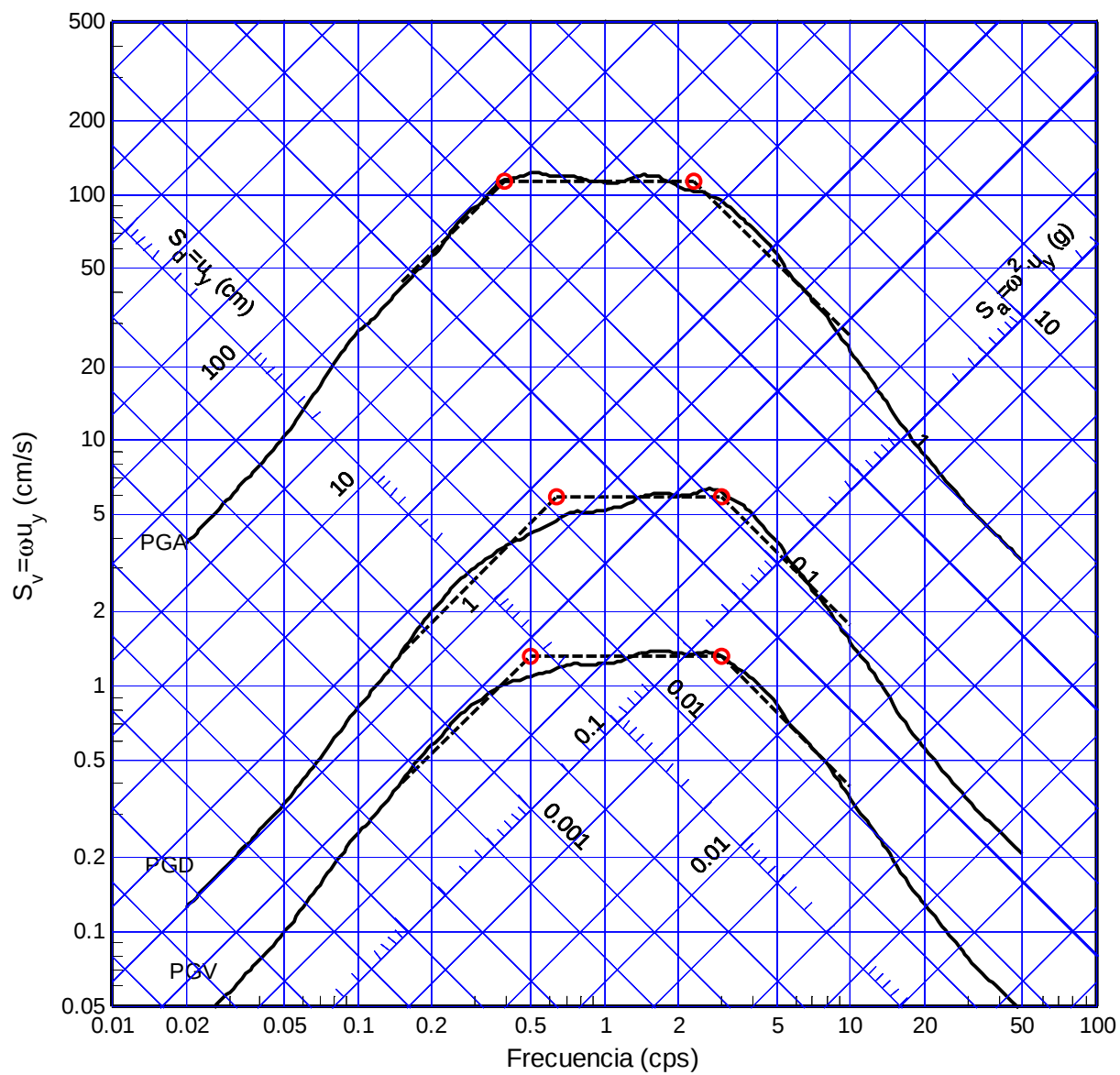


Figura B.19 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=10\%$

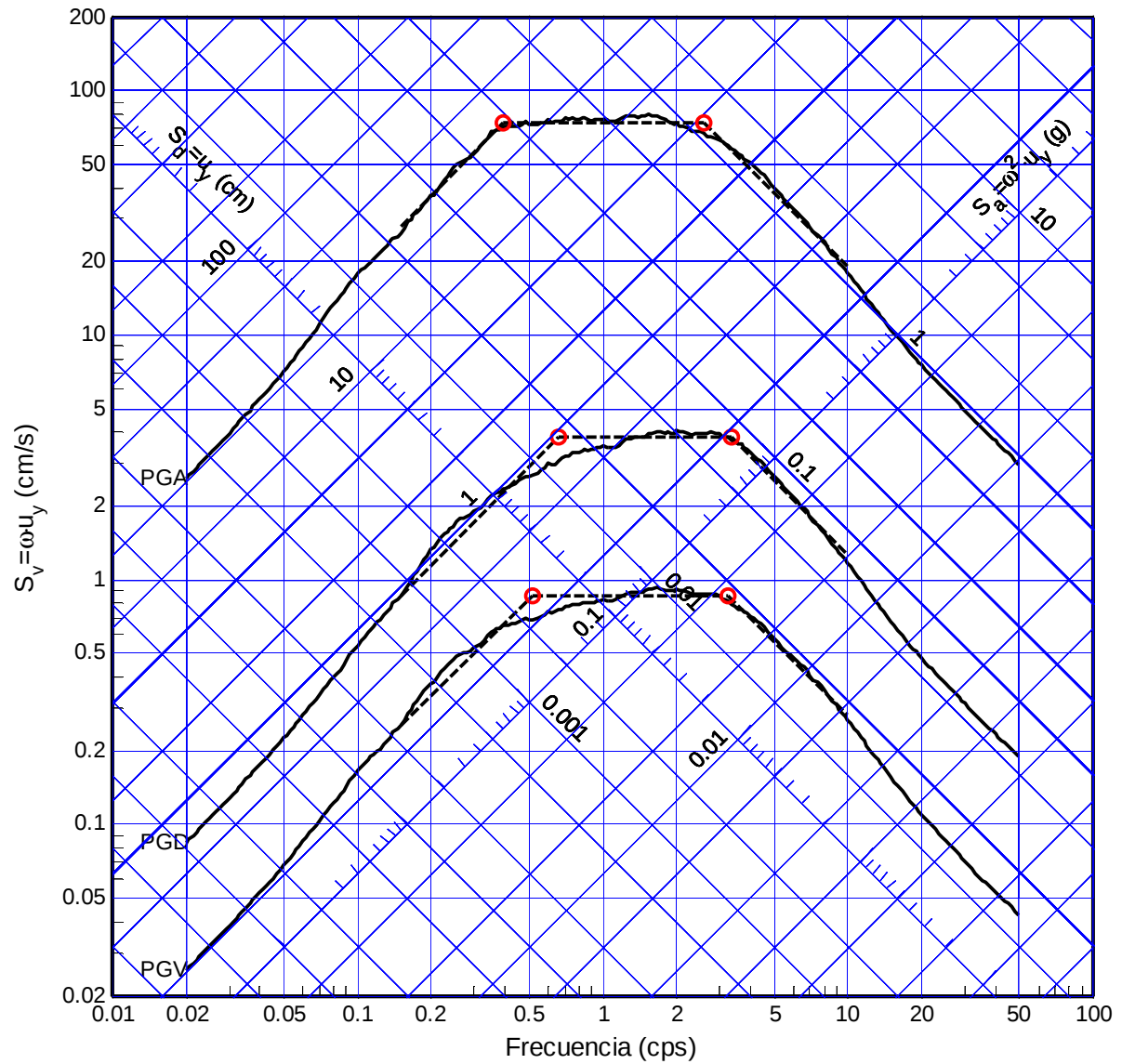


Figura B.20 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=10\%$

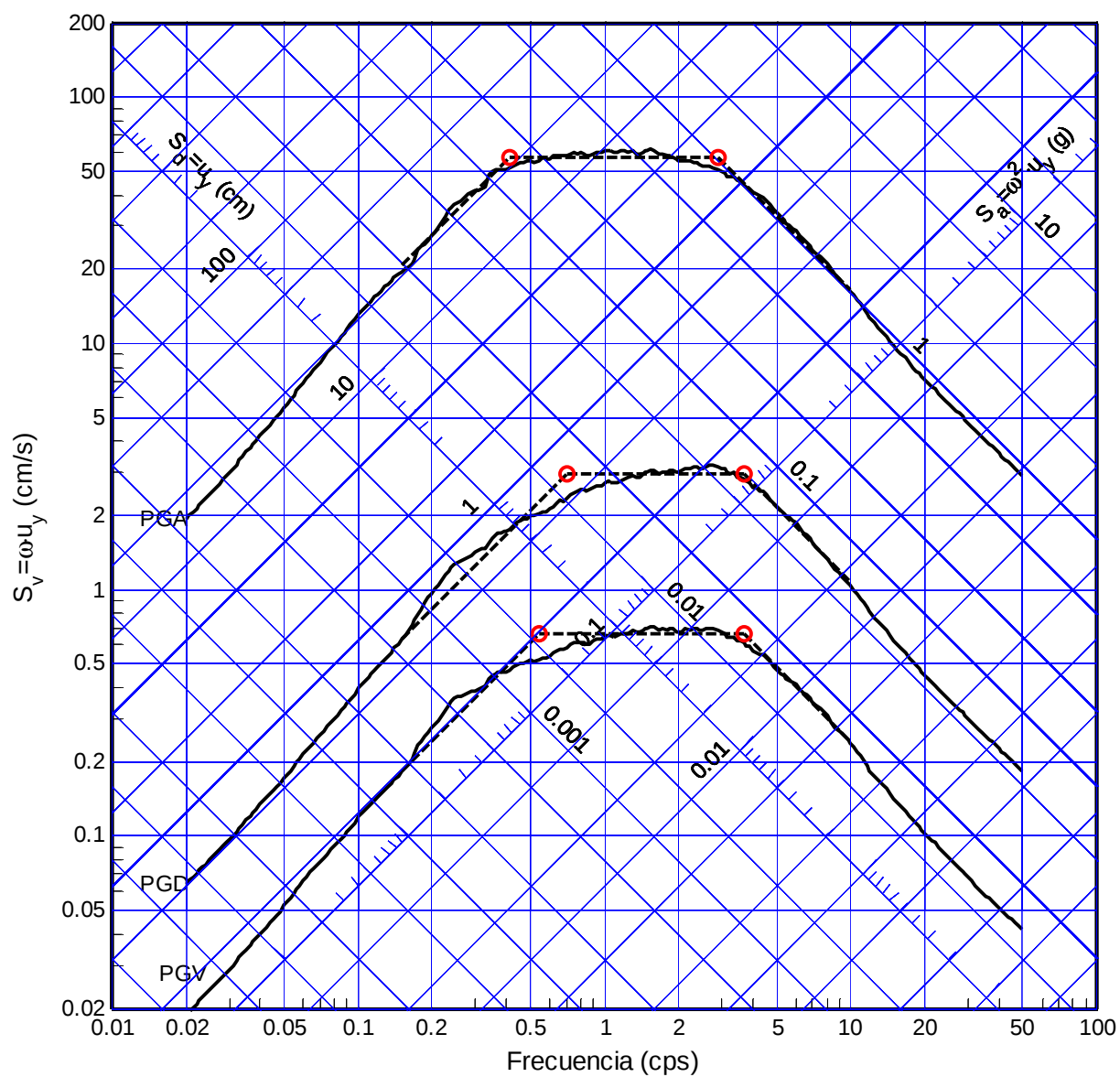


Figura B.21 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=10\%$

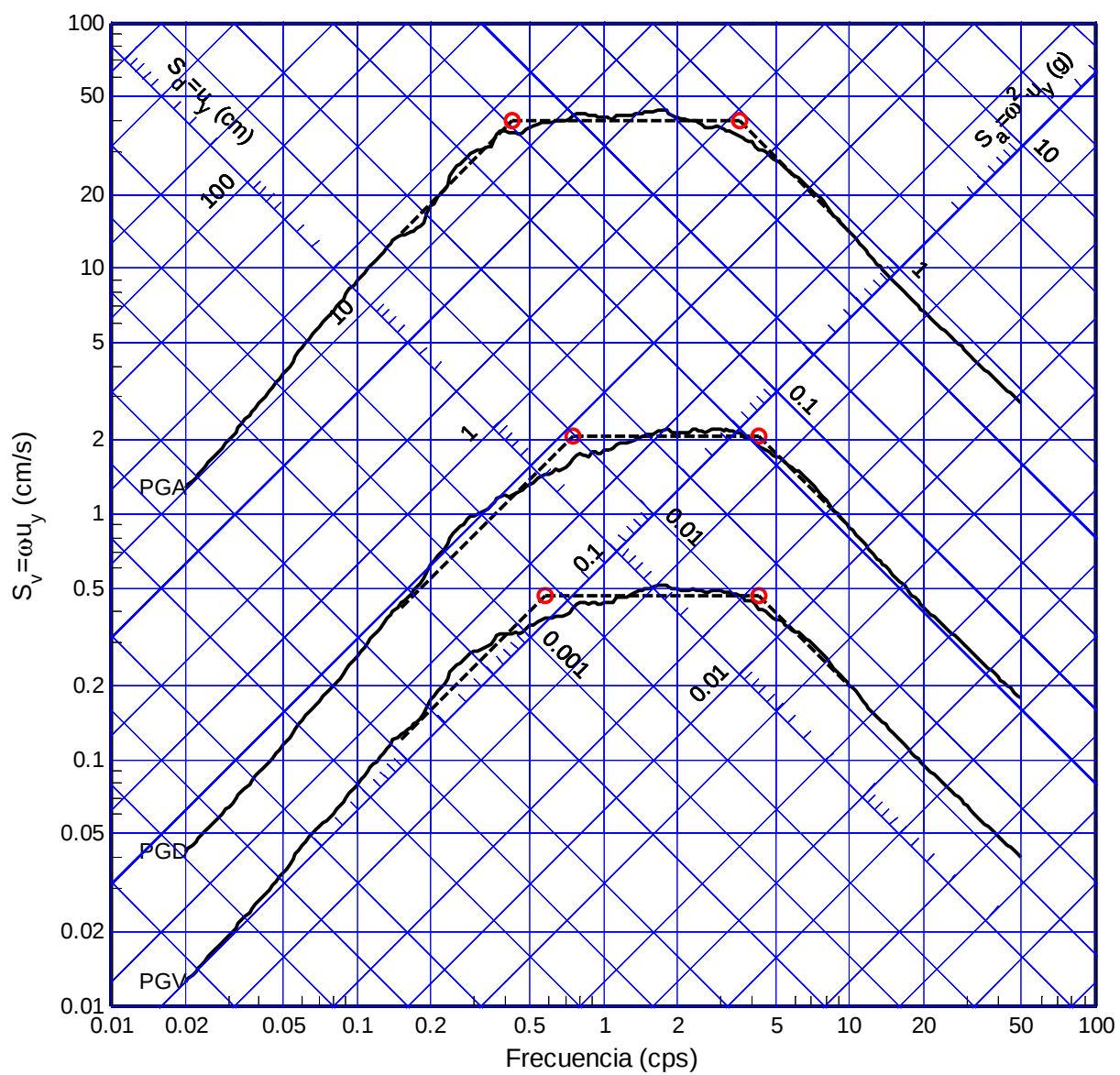


Figura B.22 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=10\%$

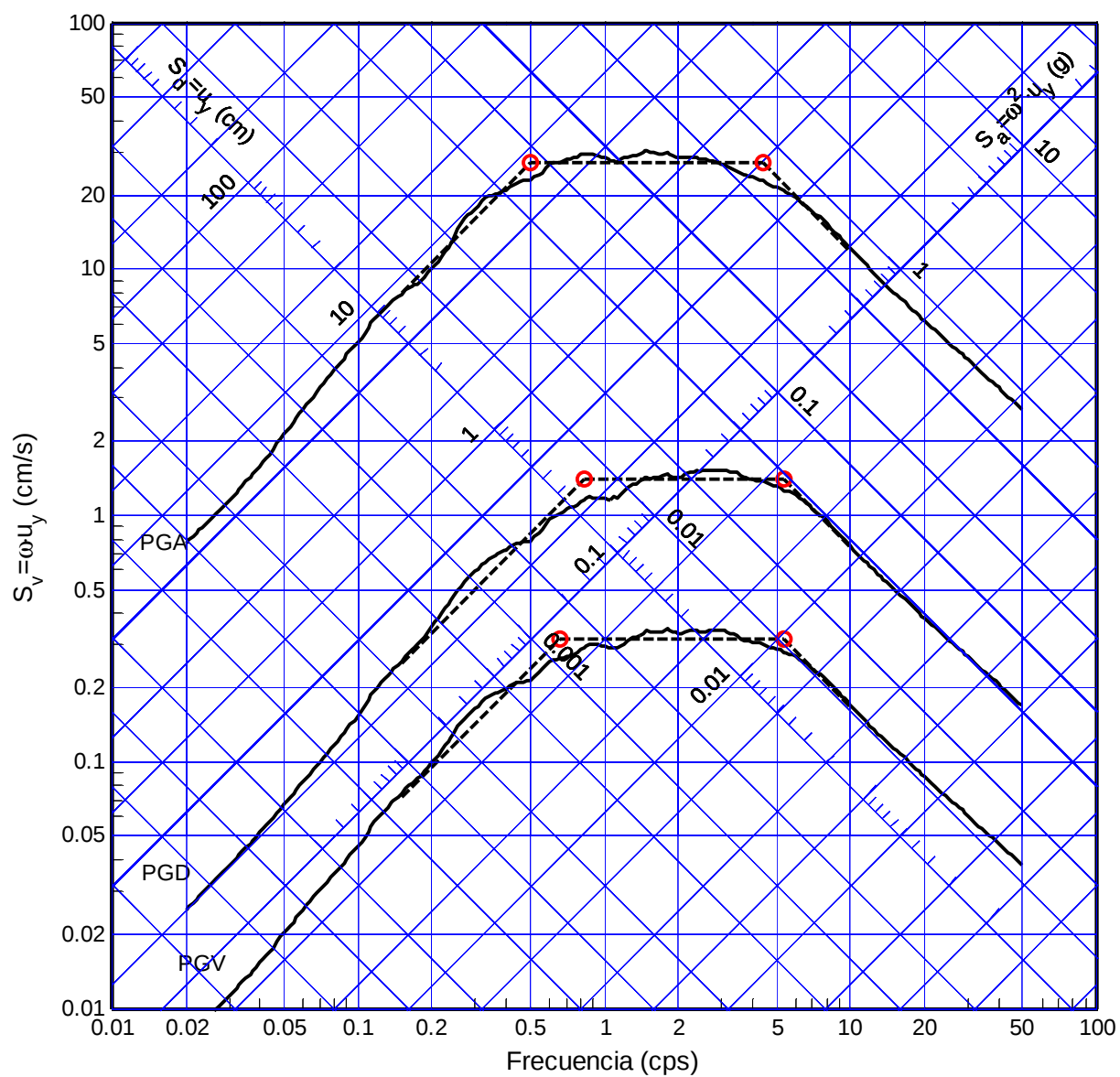


Figura B.23 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=10\%$

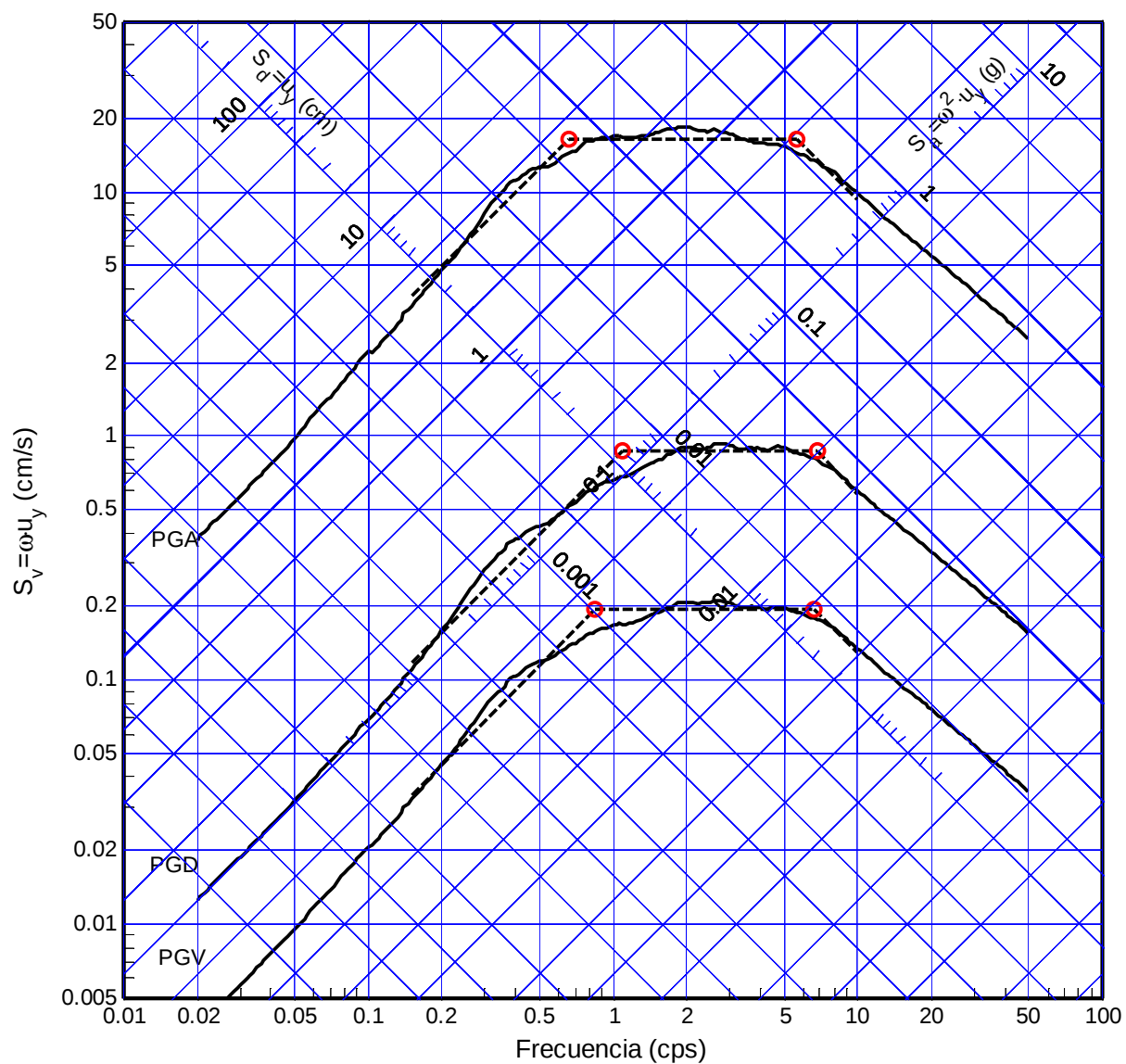


Figura B.24 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=10\%$

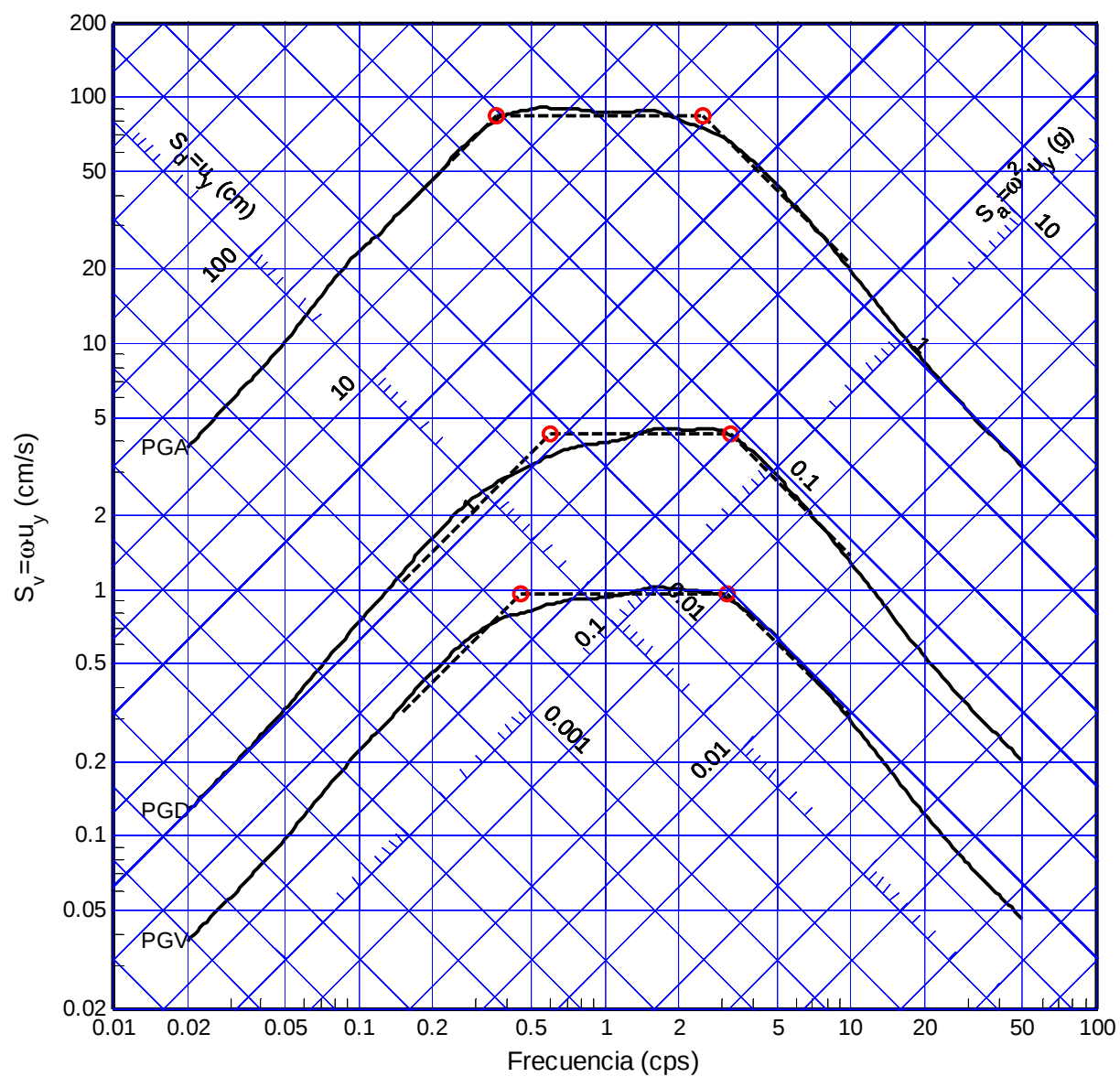


Figura B.25 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=20\%$

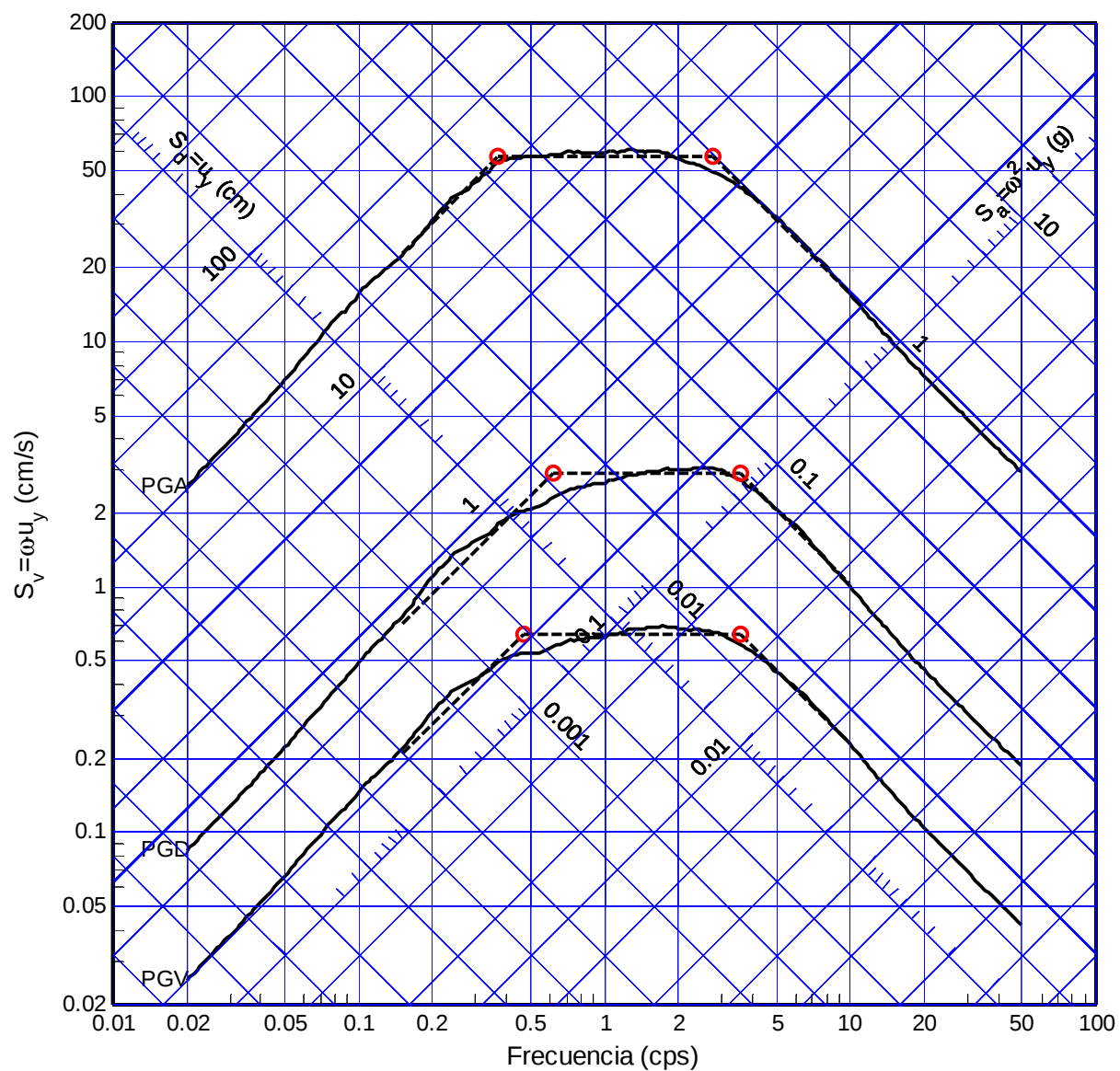


Figura B.26 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=20\%$

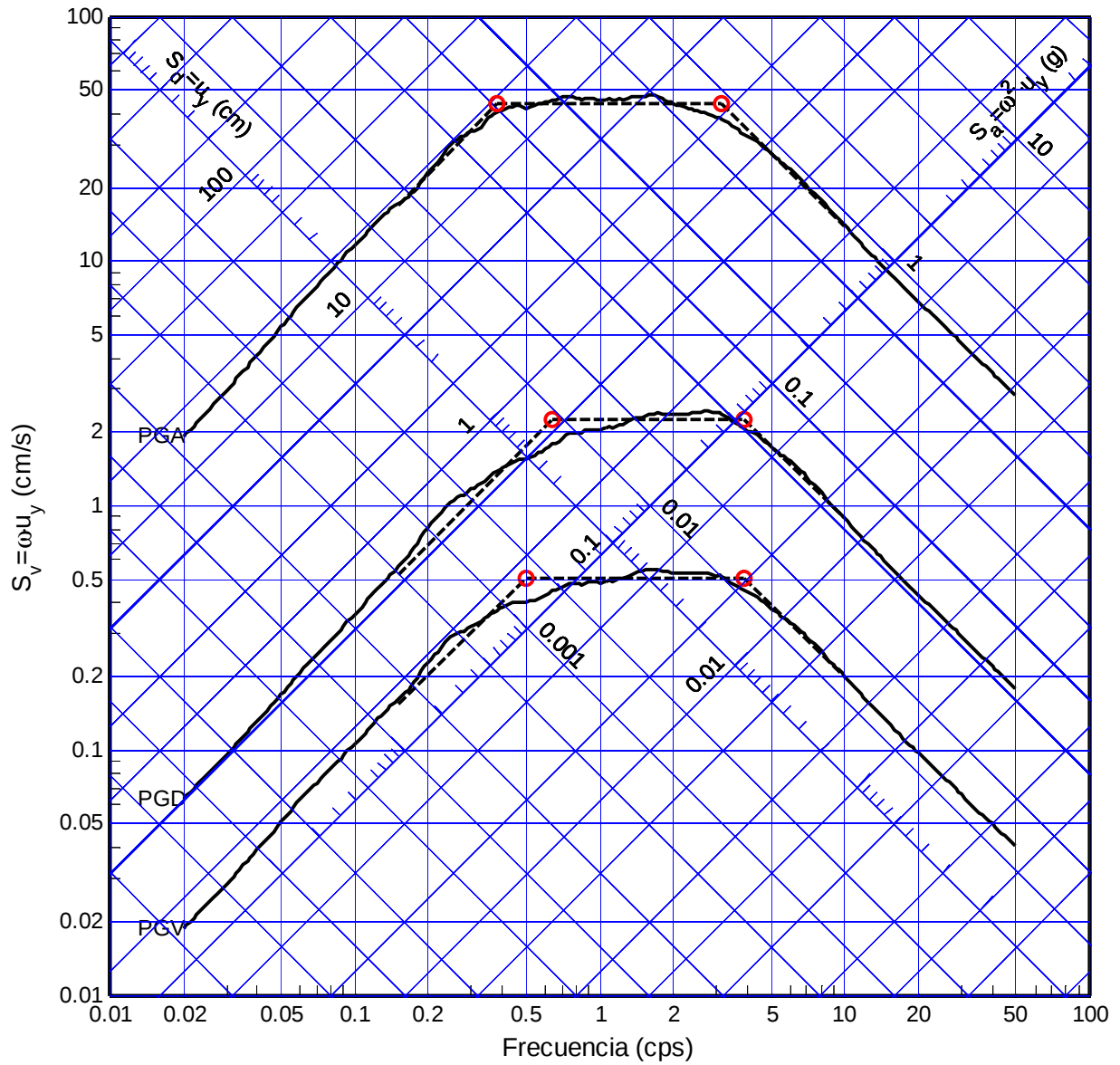


Figura B.27 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=20\%$

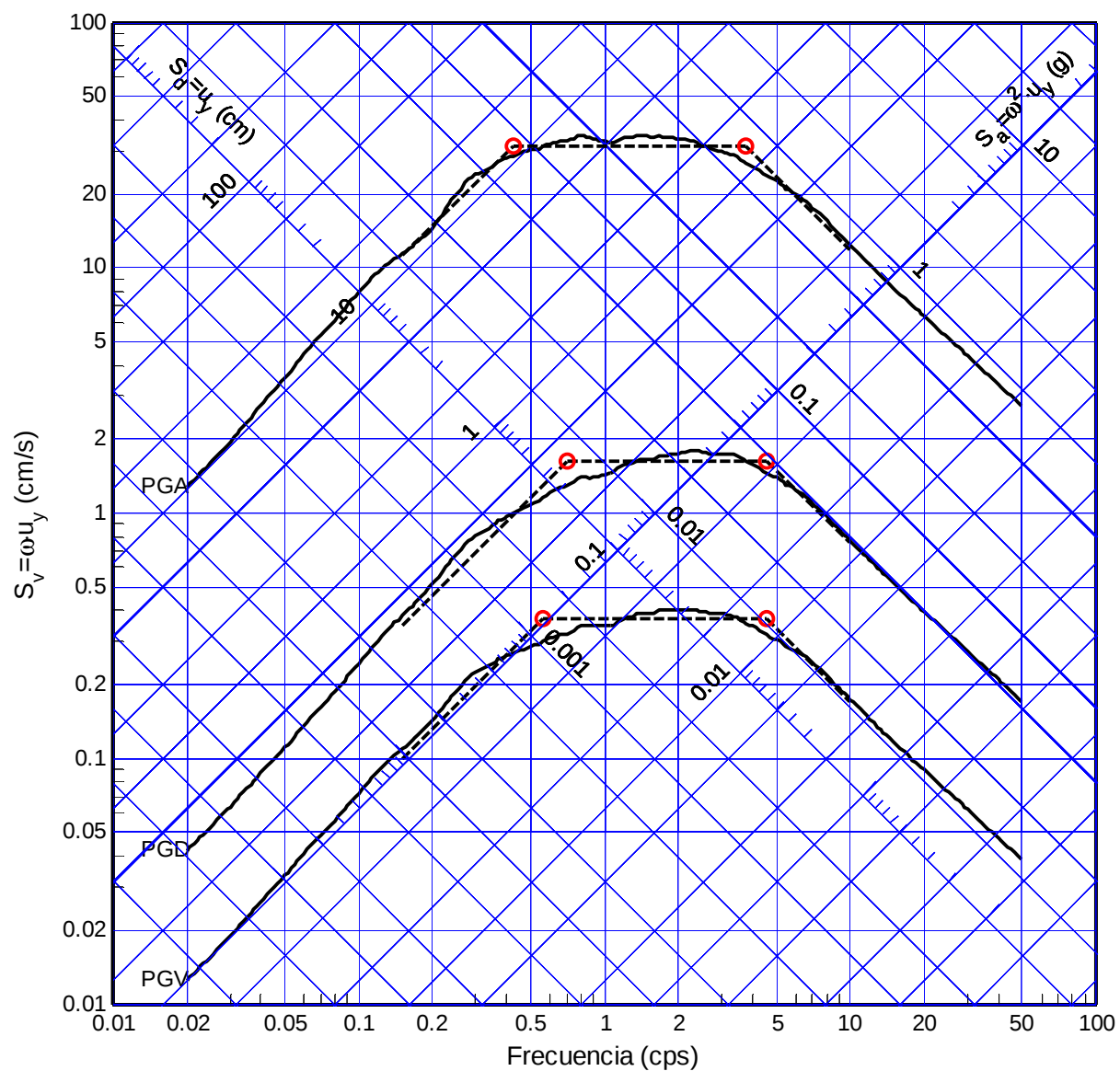


Figura B.28 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=20\%$

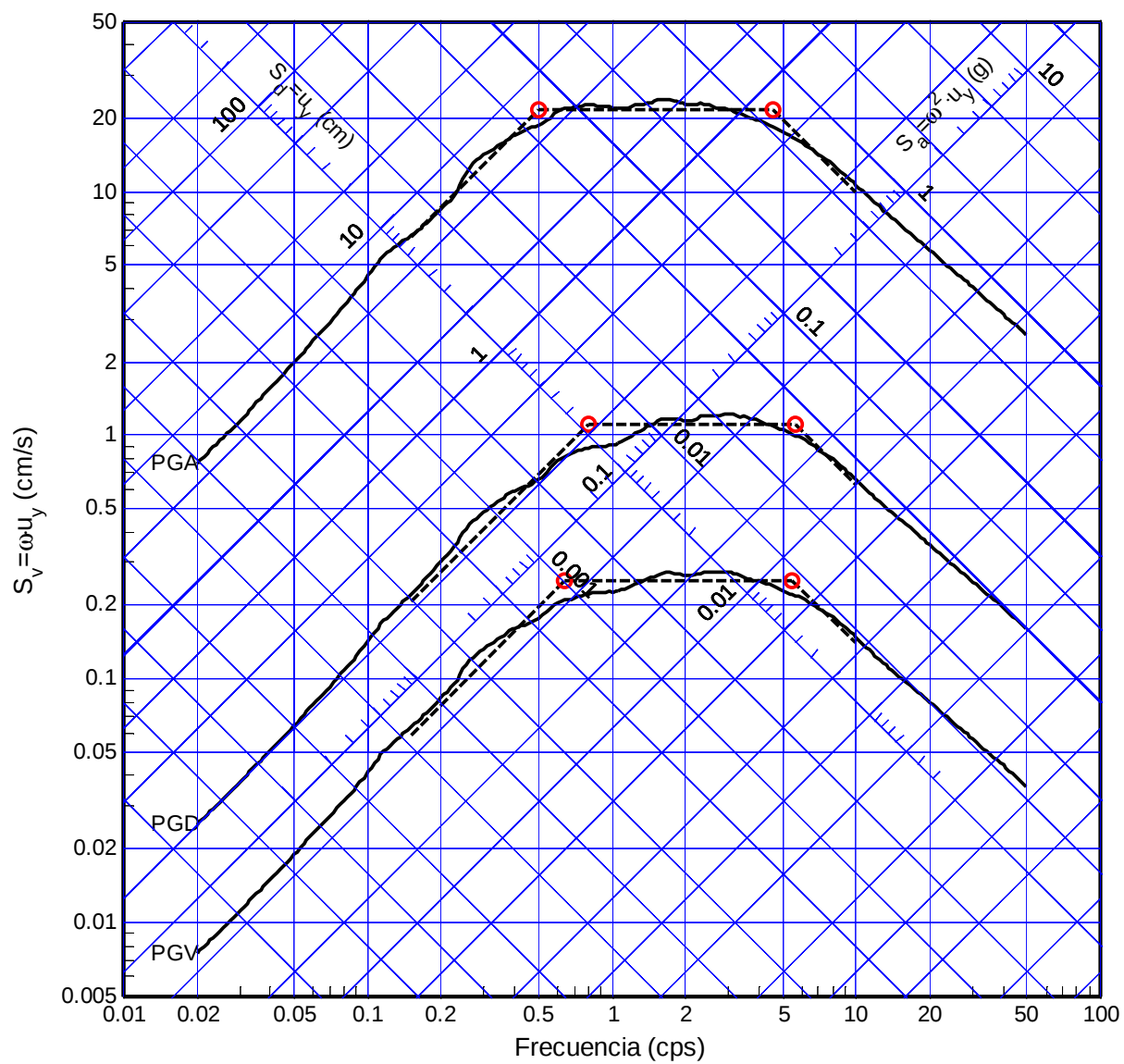


Figura B.29 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=20\%$

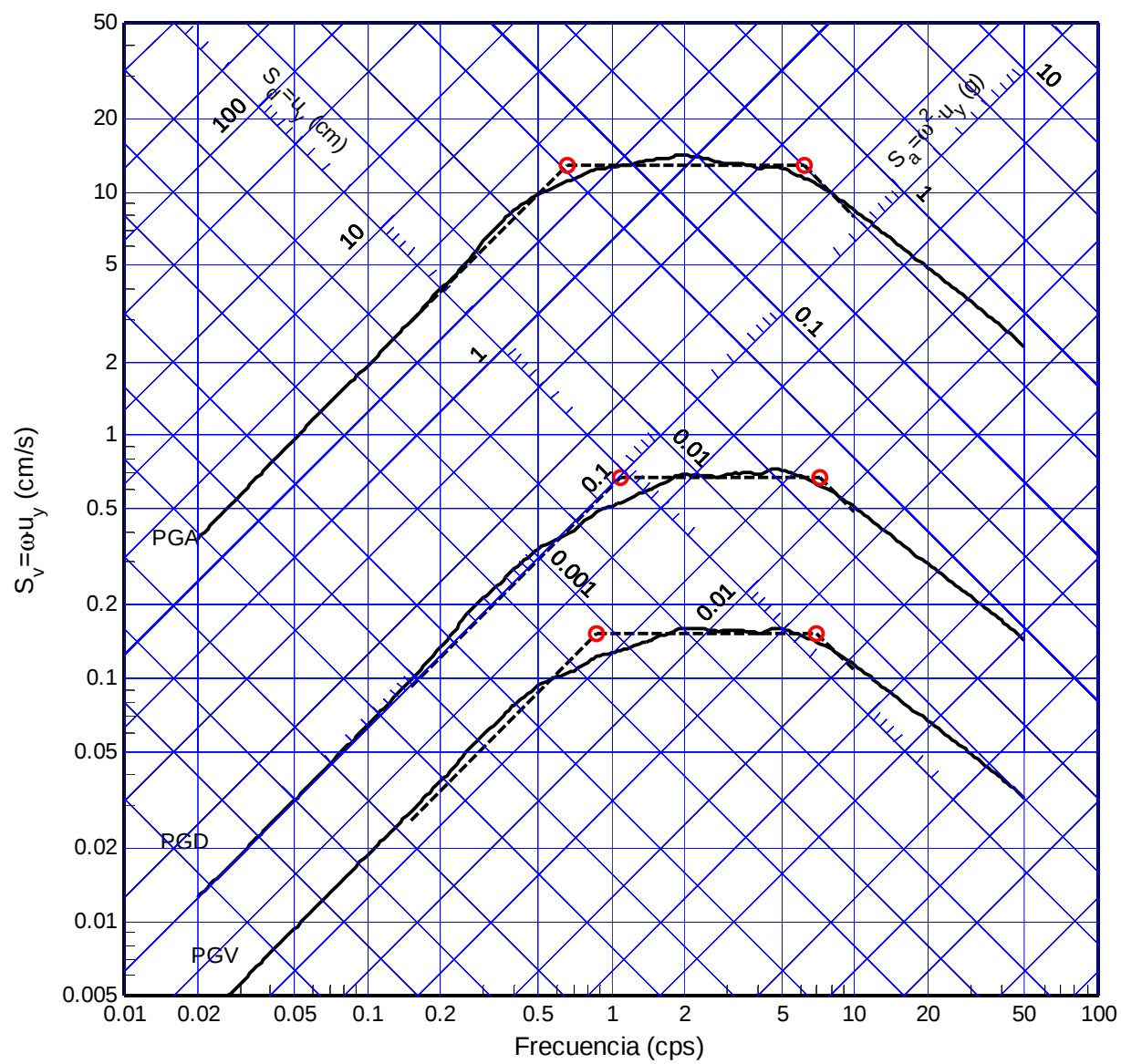


Figura B.30 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=20\%$

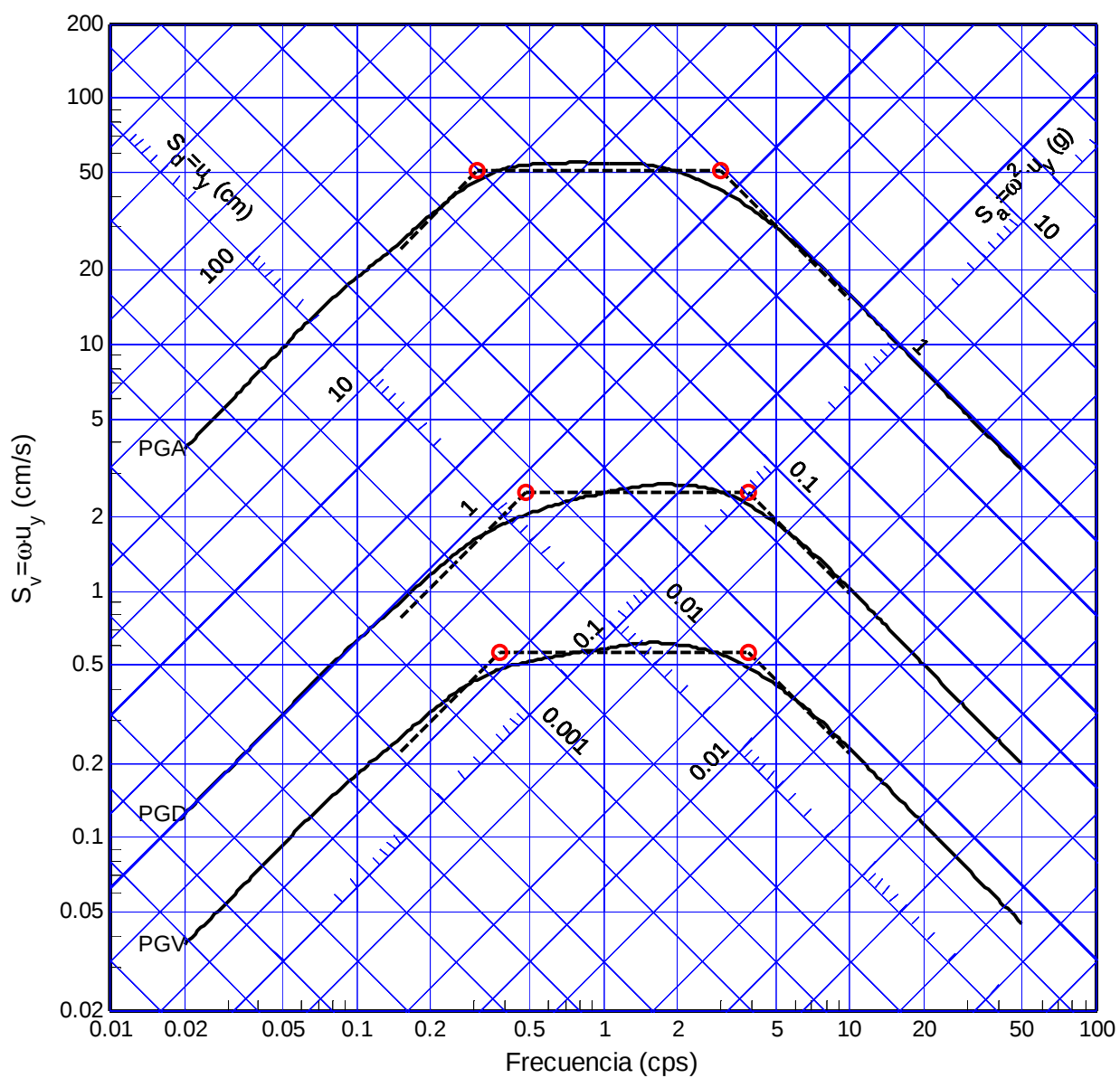


Figura B.31 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=50\%$

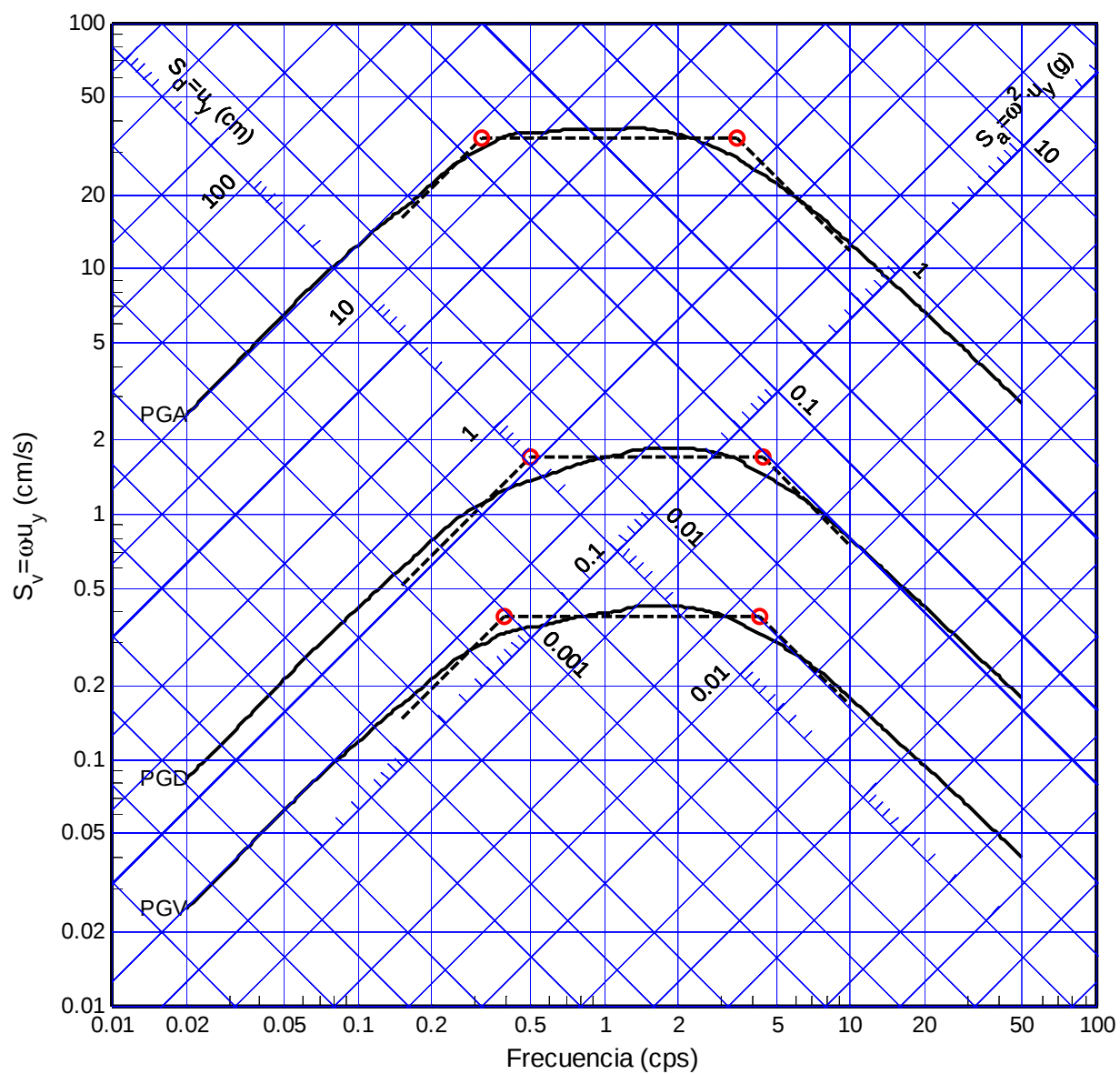


Figura B.32 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=50\%$

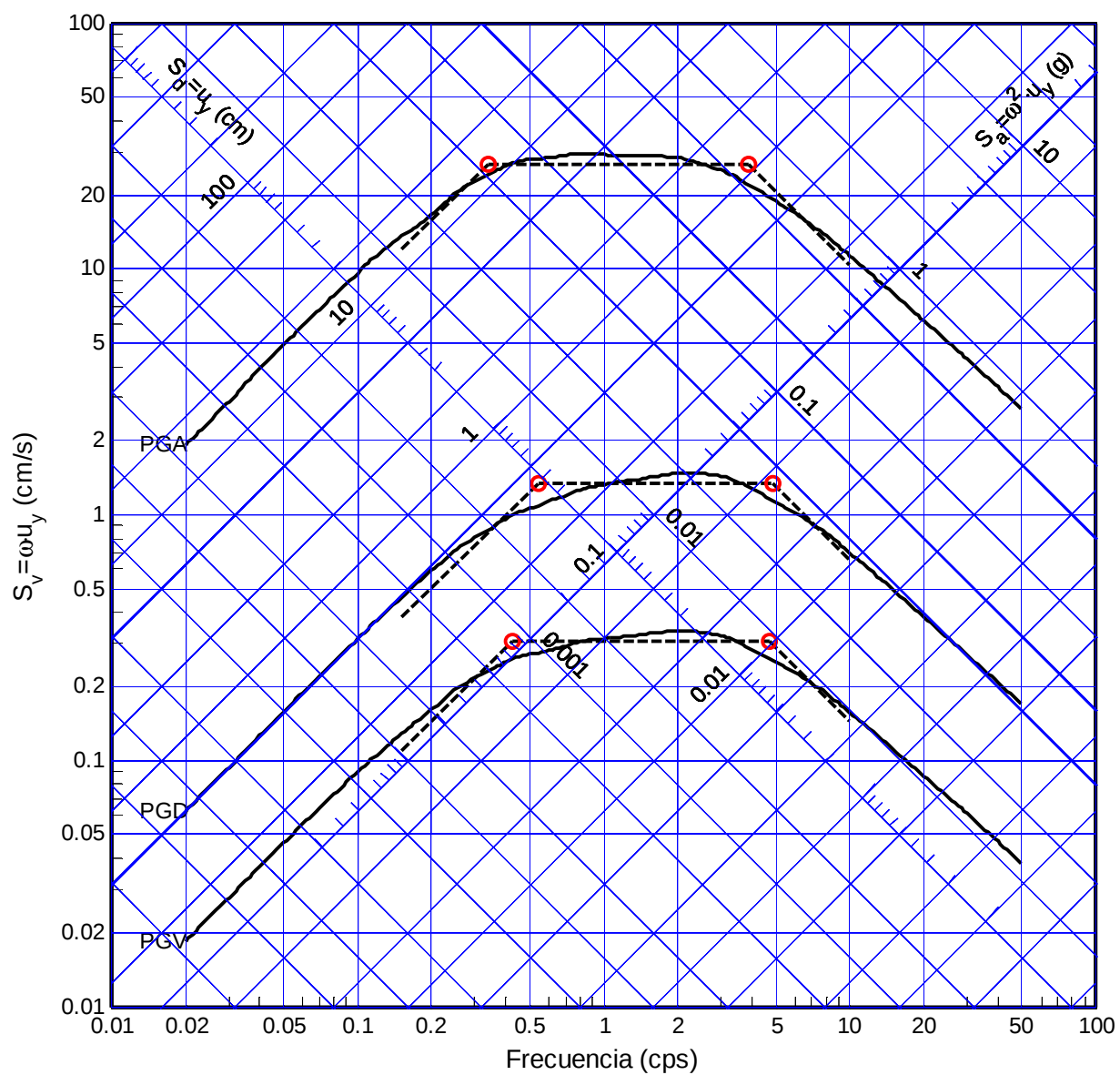


Figura B.33 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=50\%$

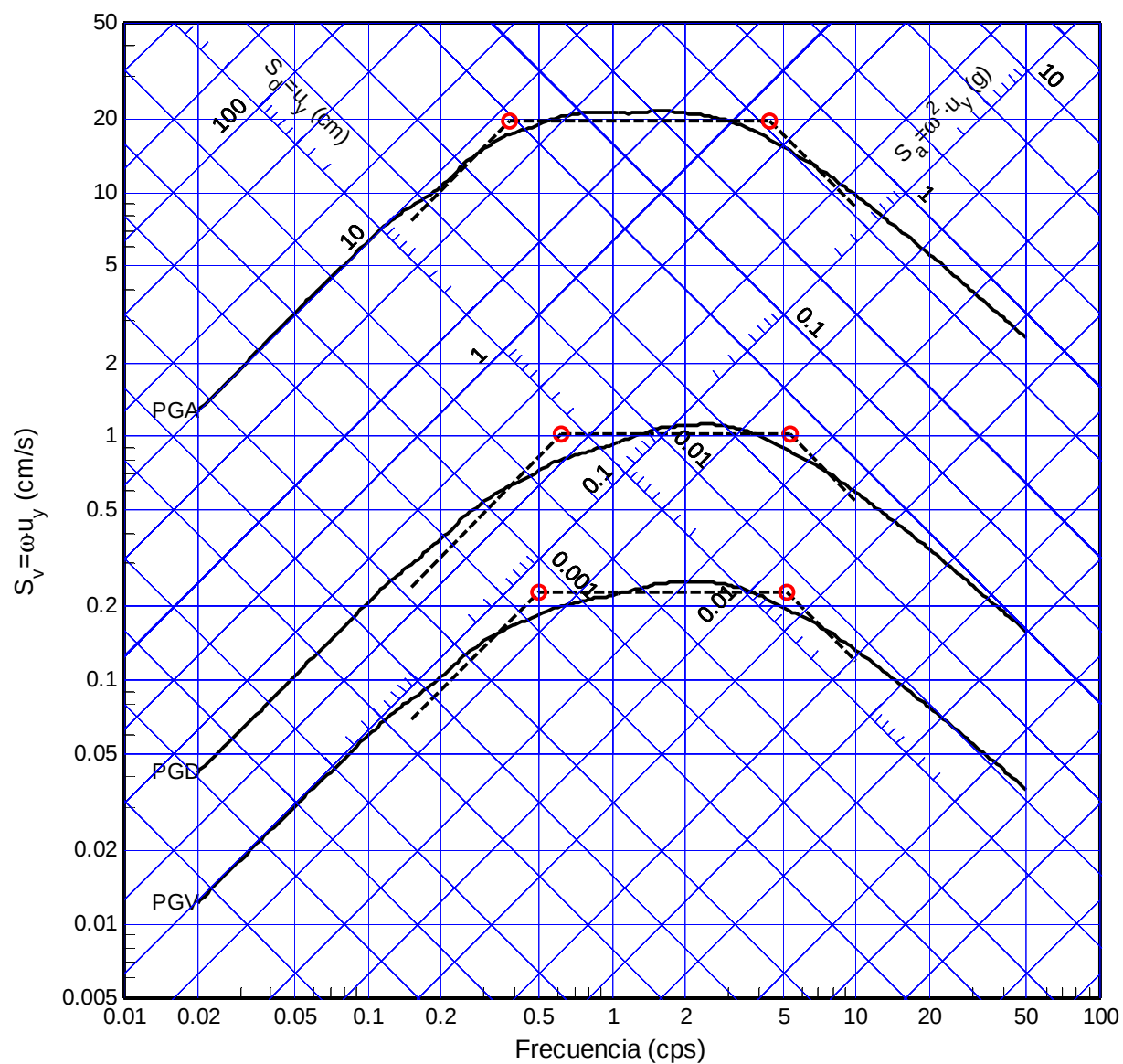


Figura B.34 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=50\%$

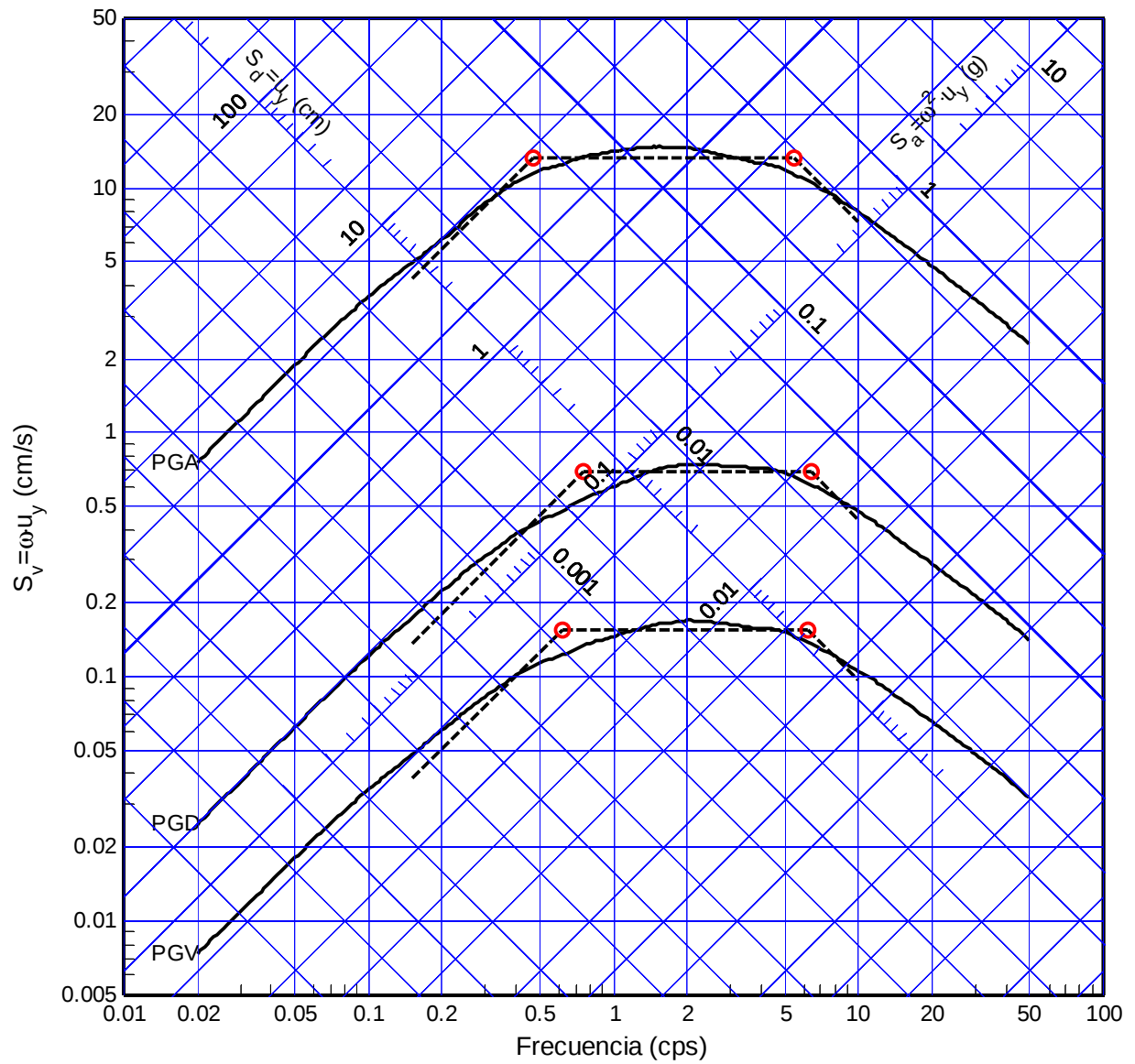


Figura B.35 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=50\%$

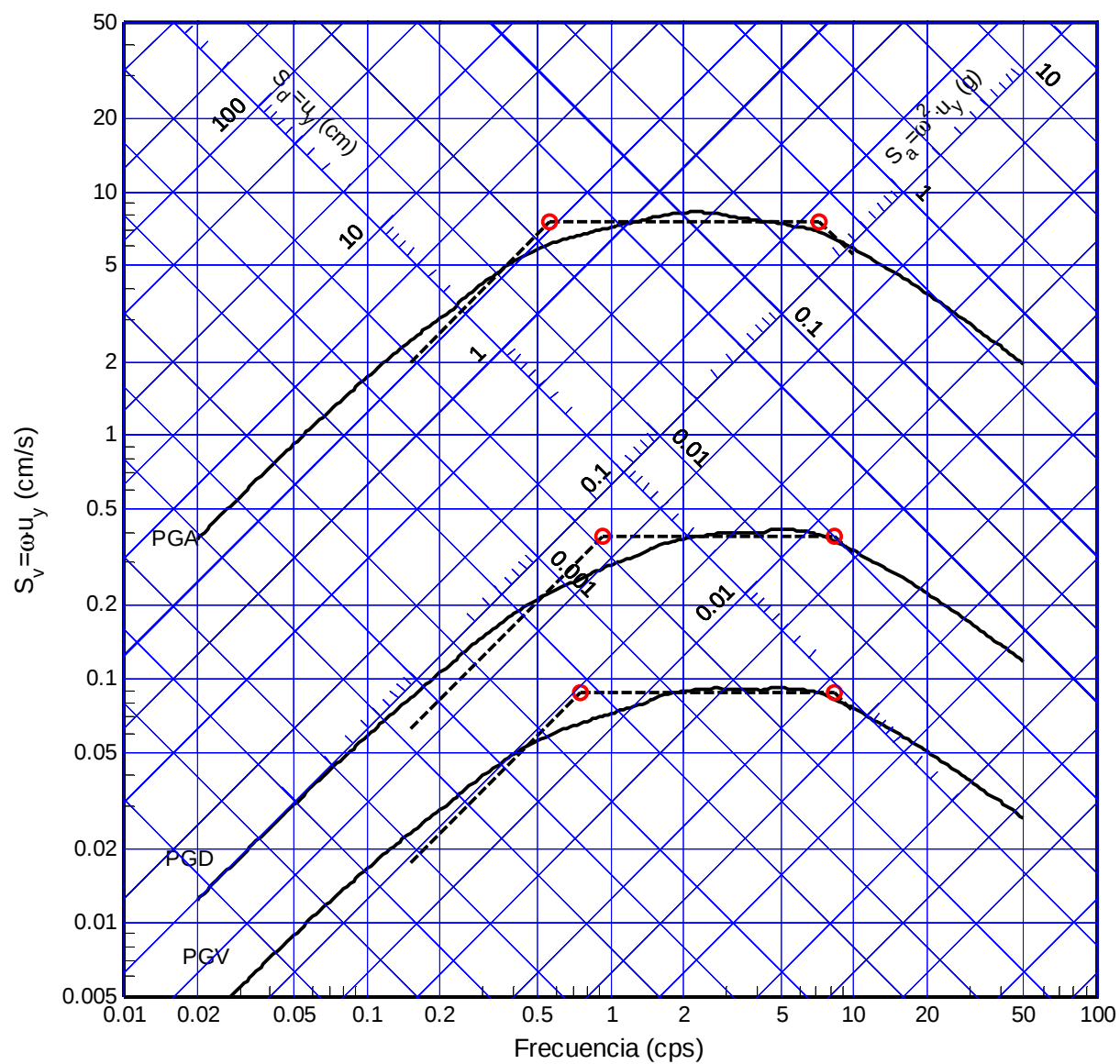


Figura B.36 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=50\%$

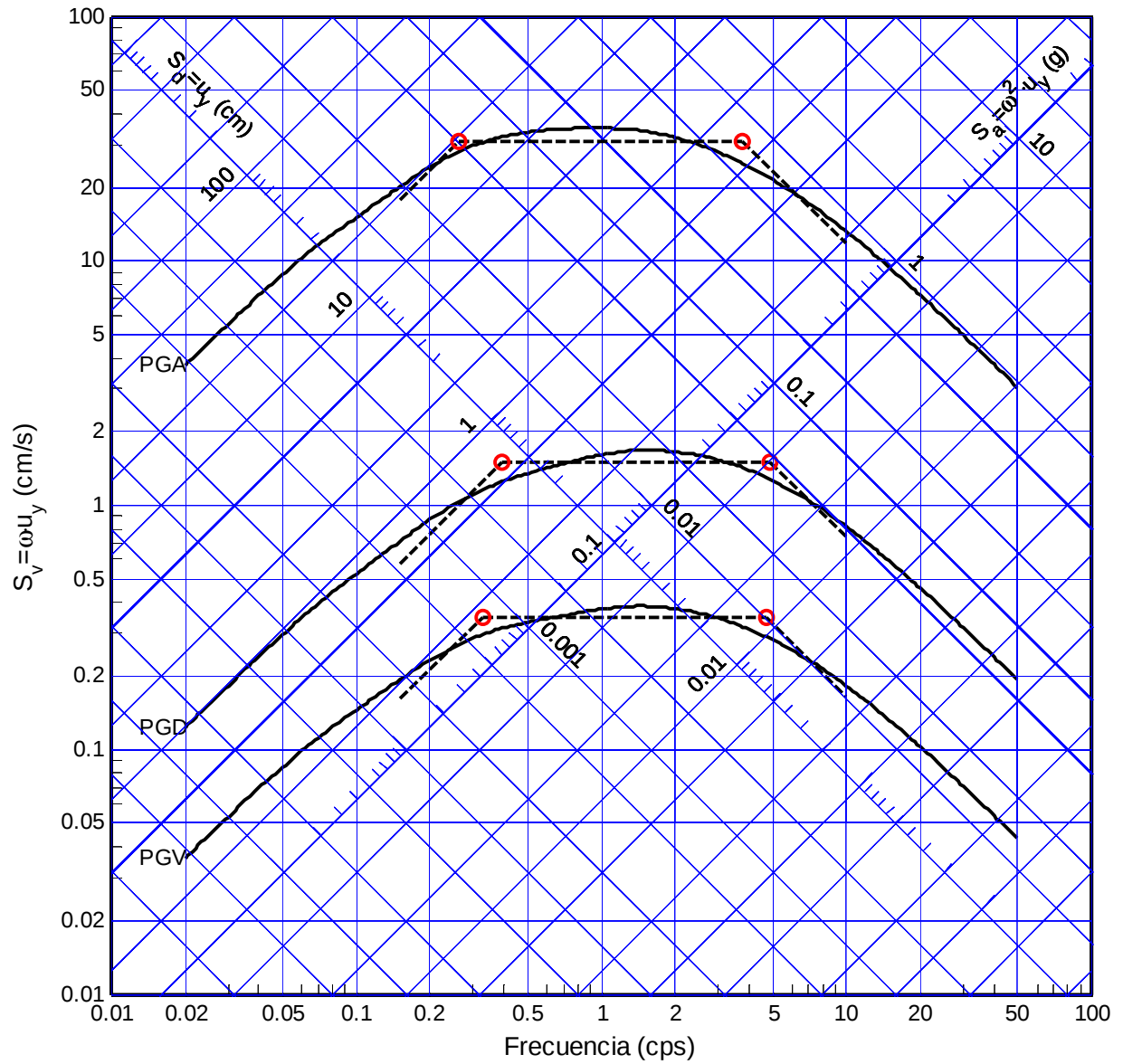


Figura B.37 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=100\%$

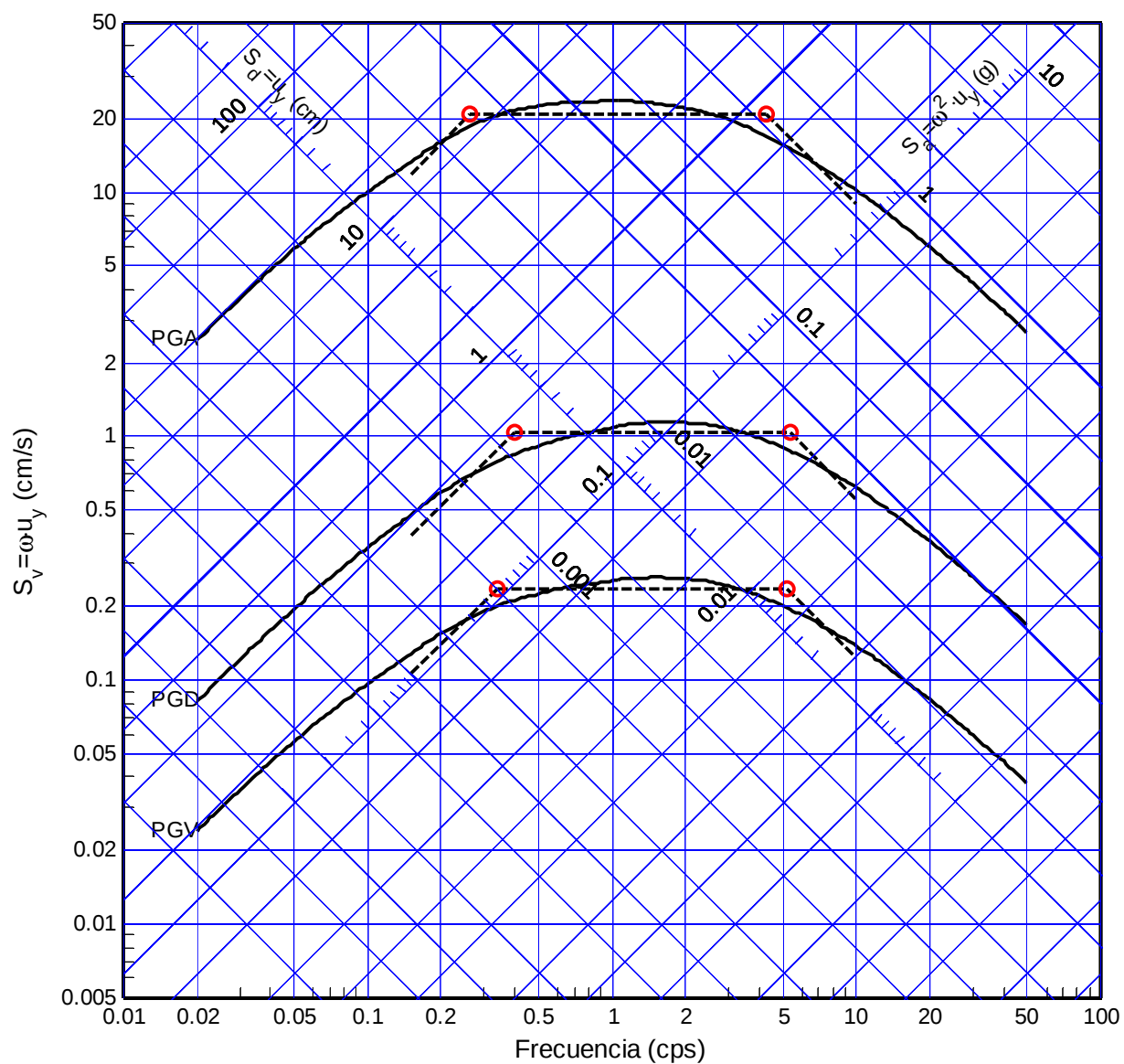


Figura B.38 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=100\%$

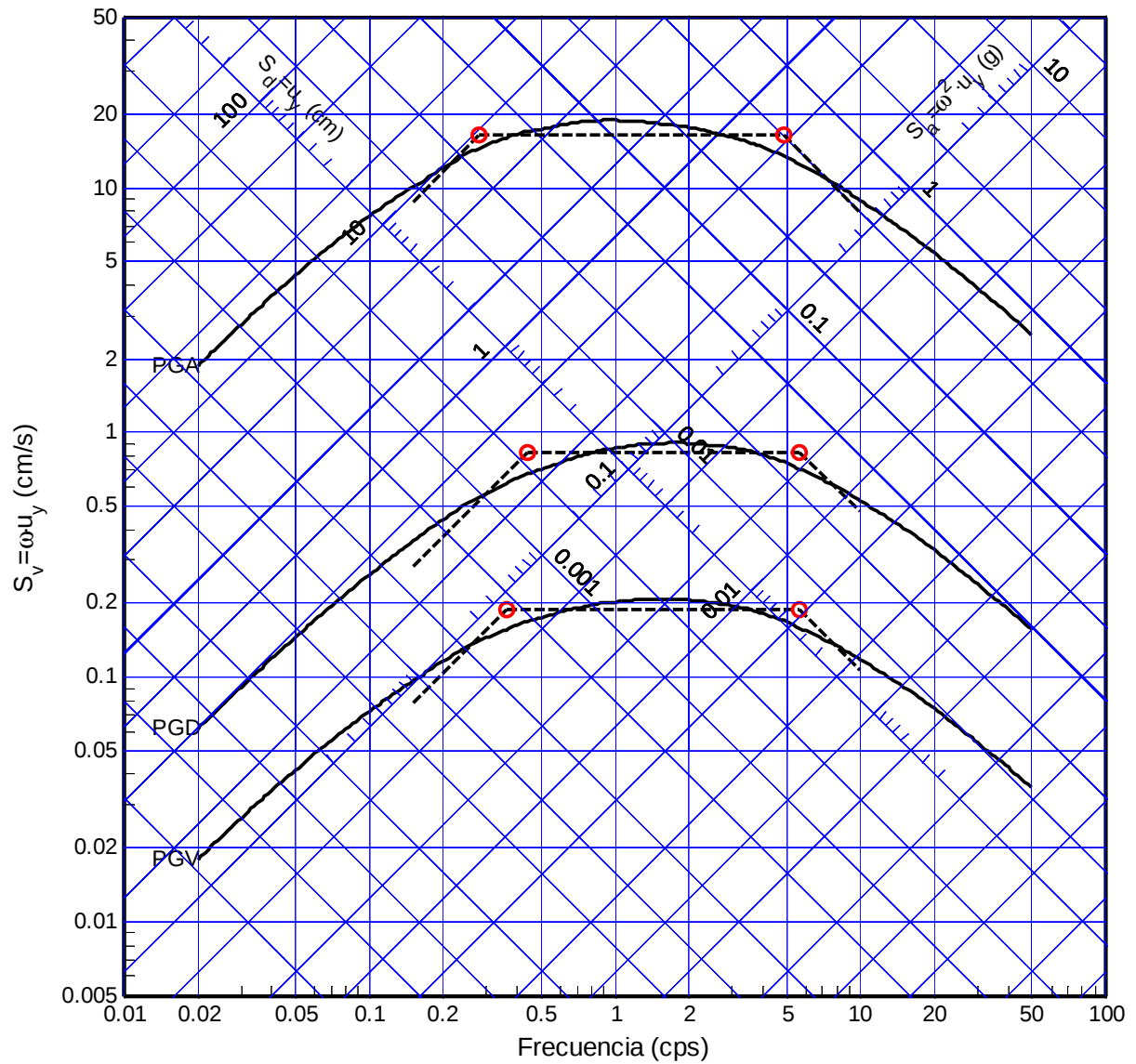


Figura B.39 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=100\%$

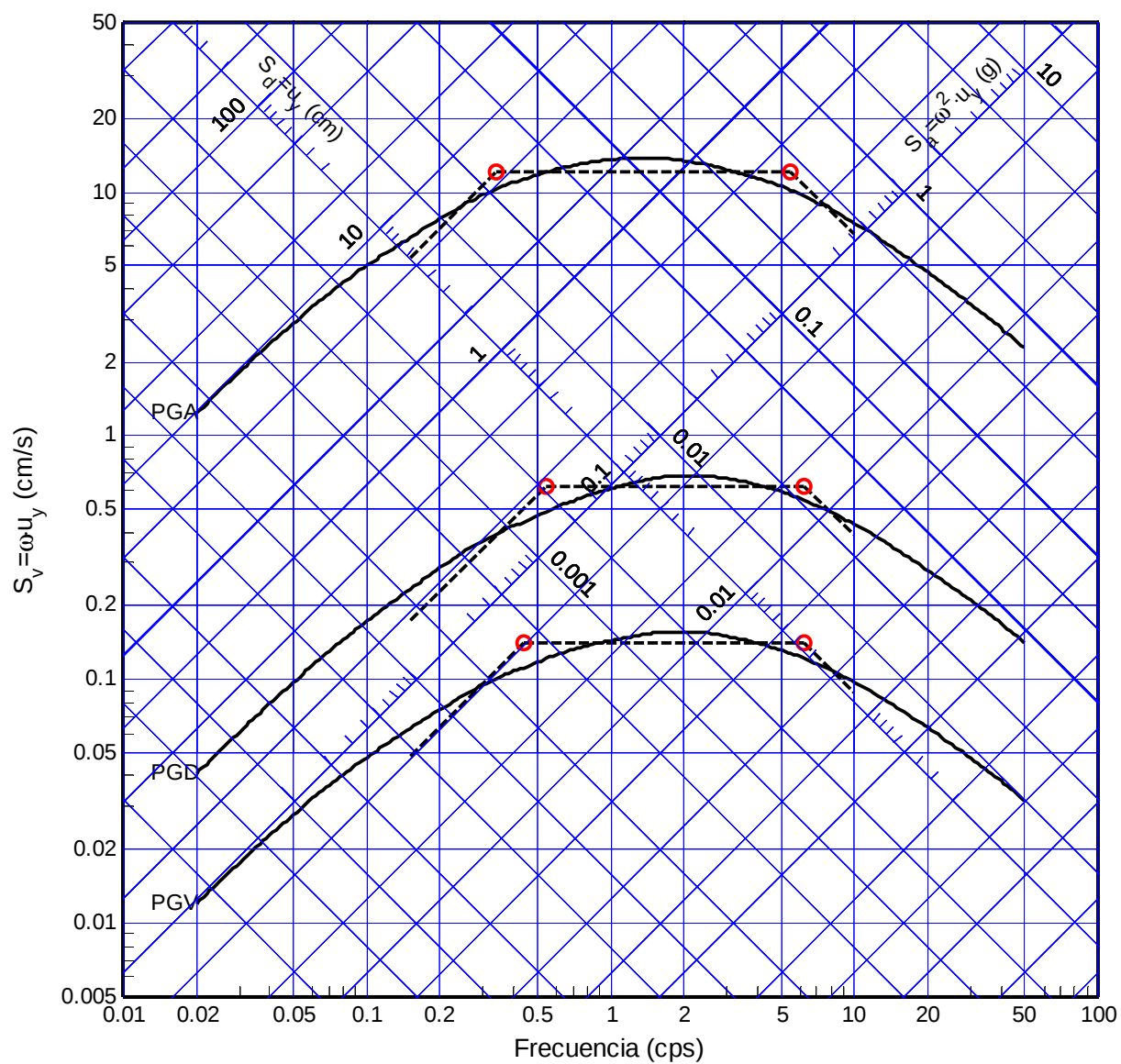


Figura B.40 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=100\%$

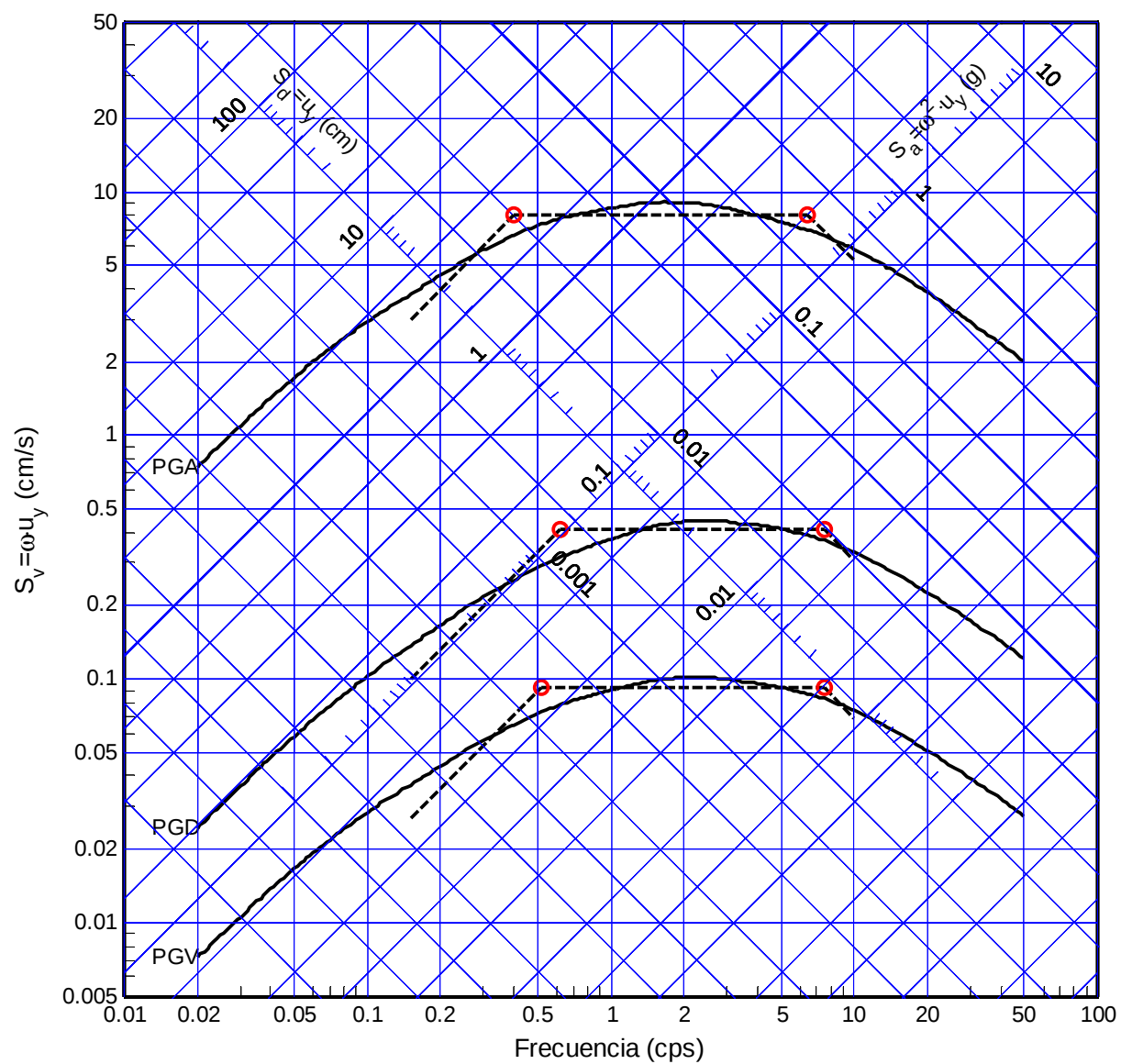


Figura B.41 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=100\%$

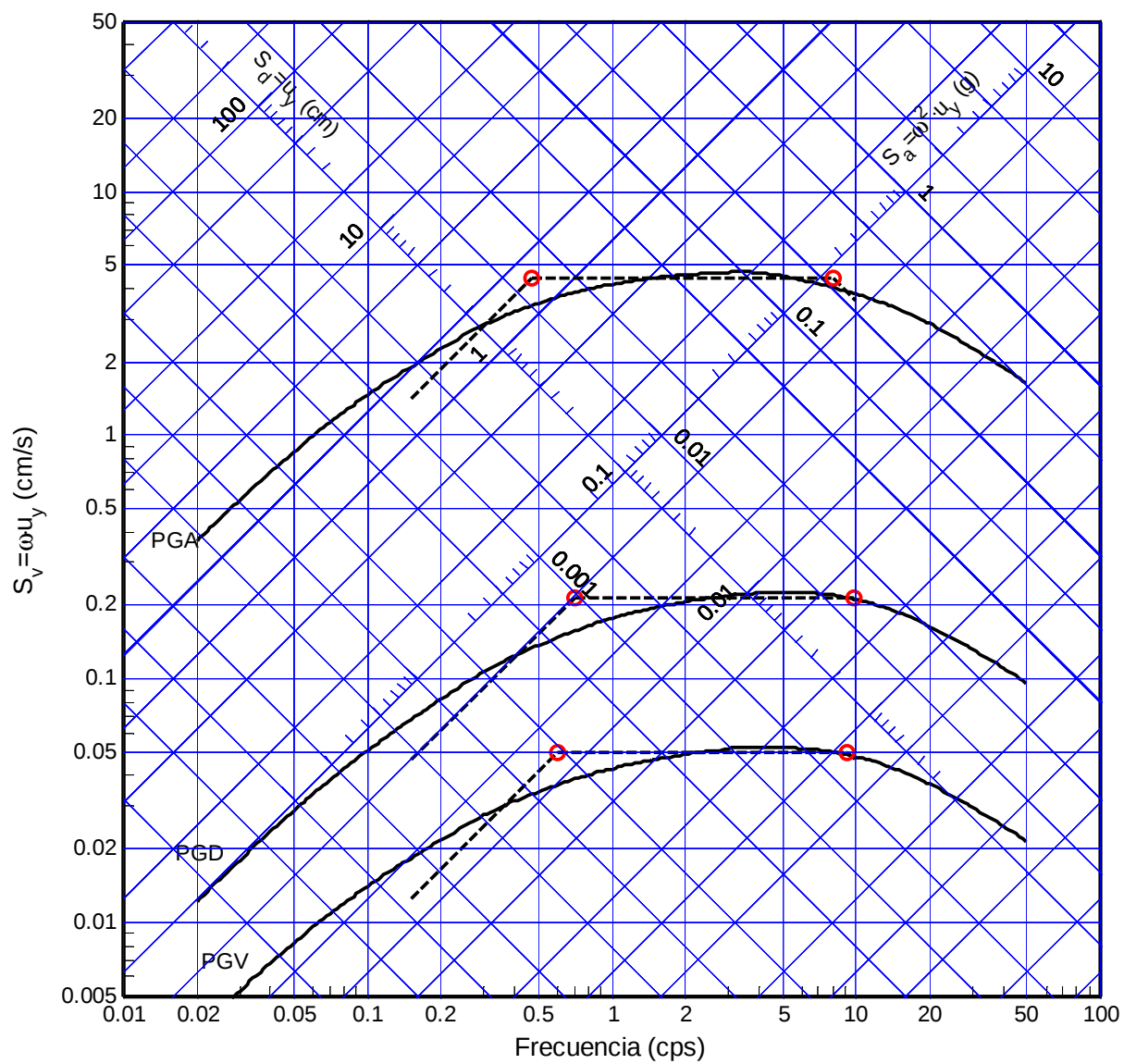


Figura B.42 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema elastoplástico. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=100\%$

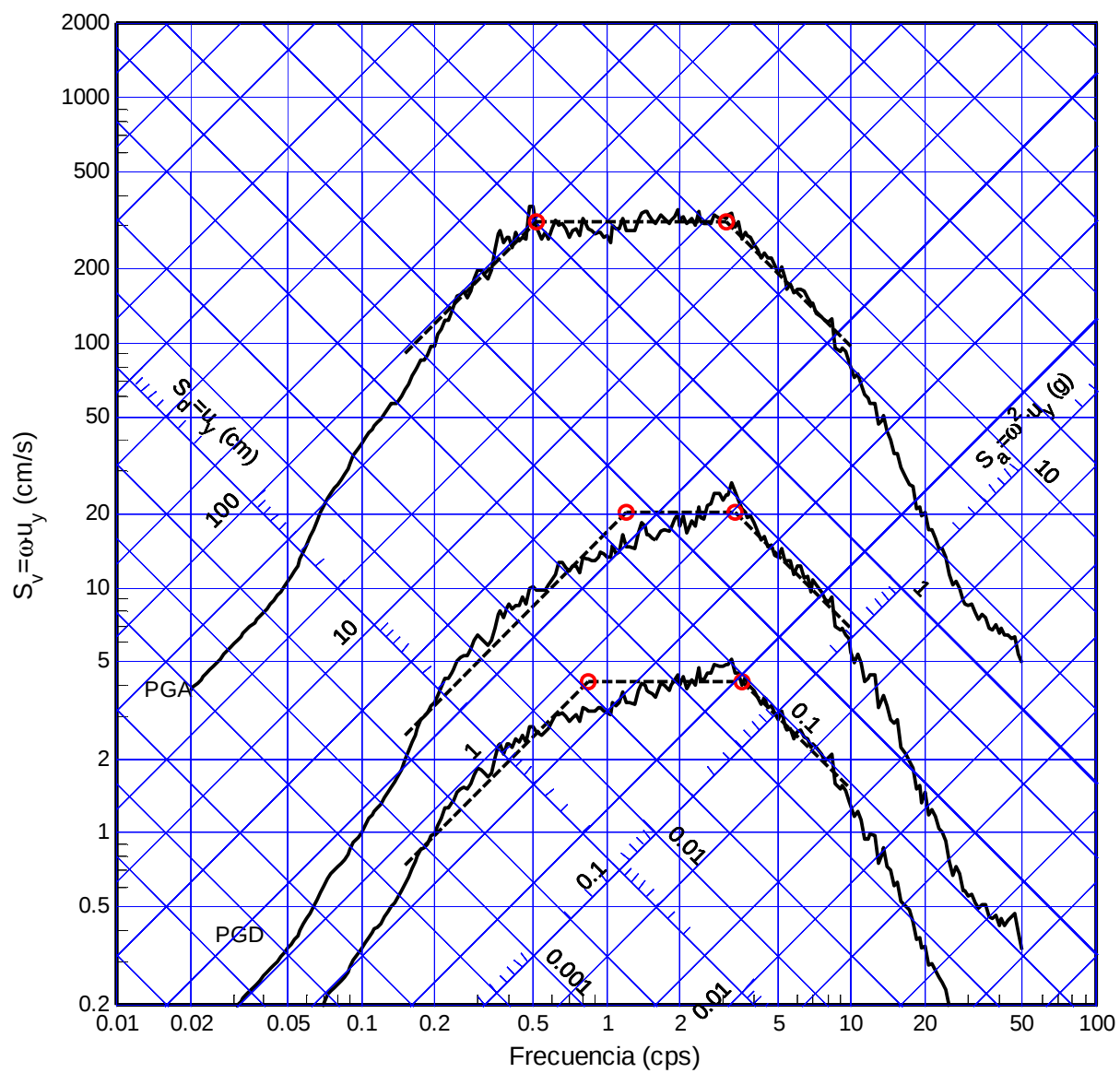


Figura B.43 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=0\%$

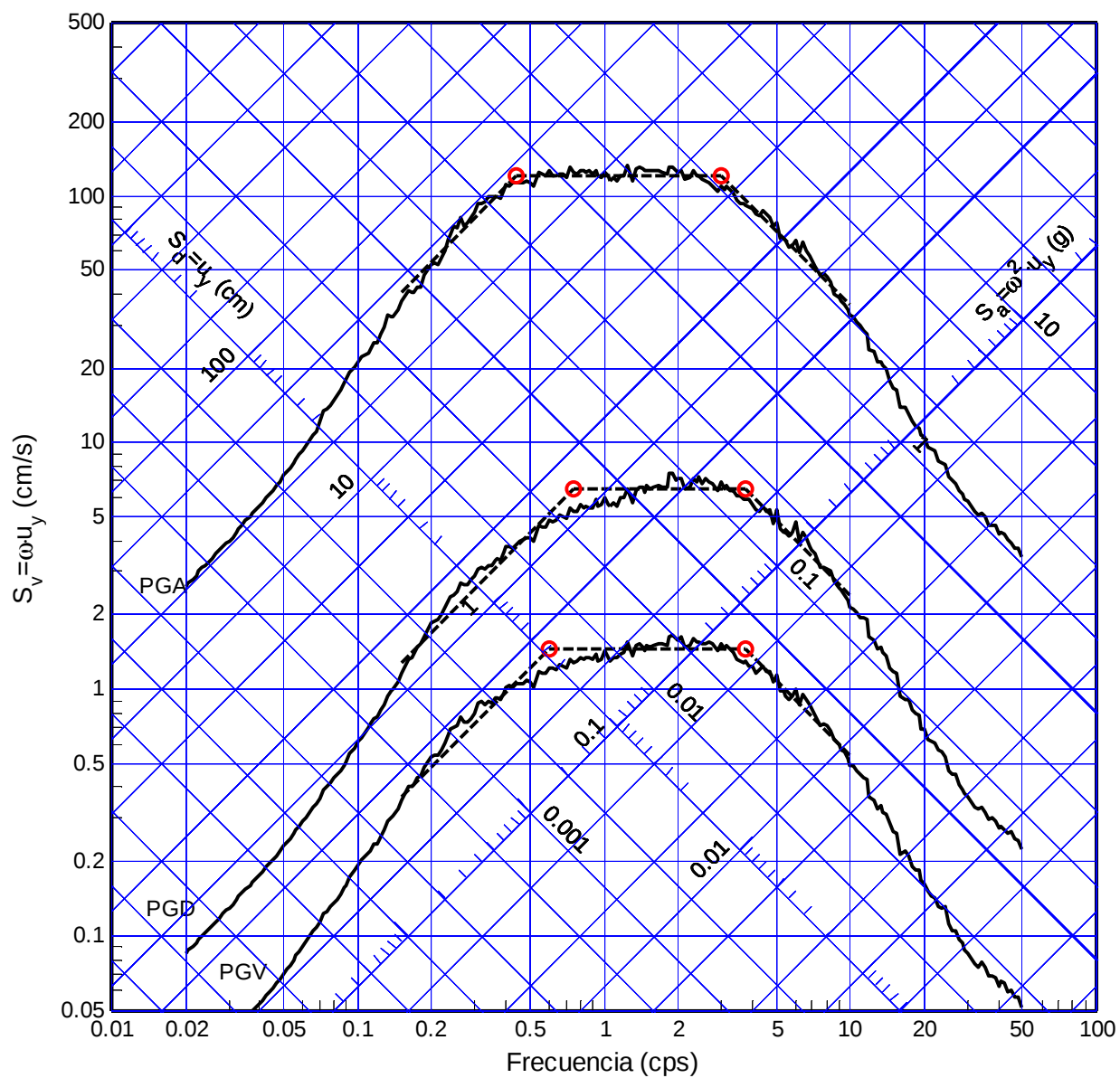


Figura B.44 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=0\%$

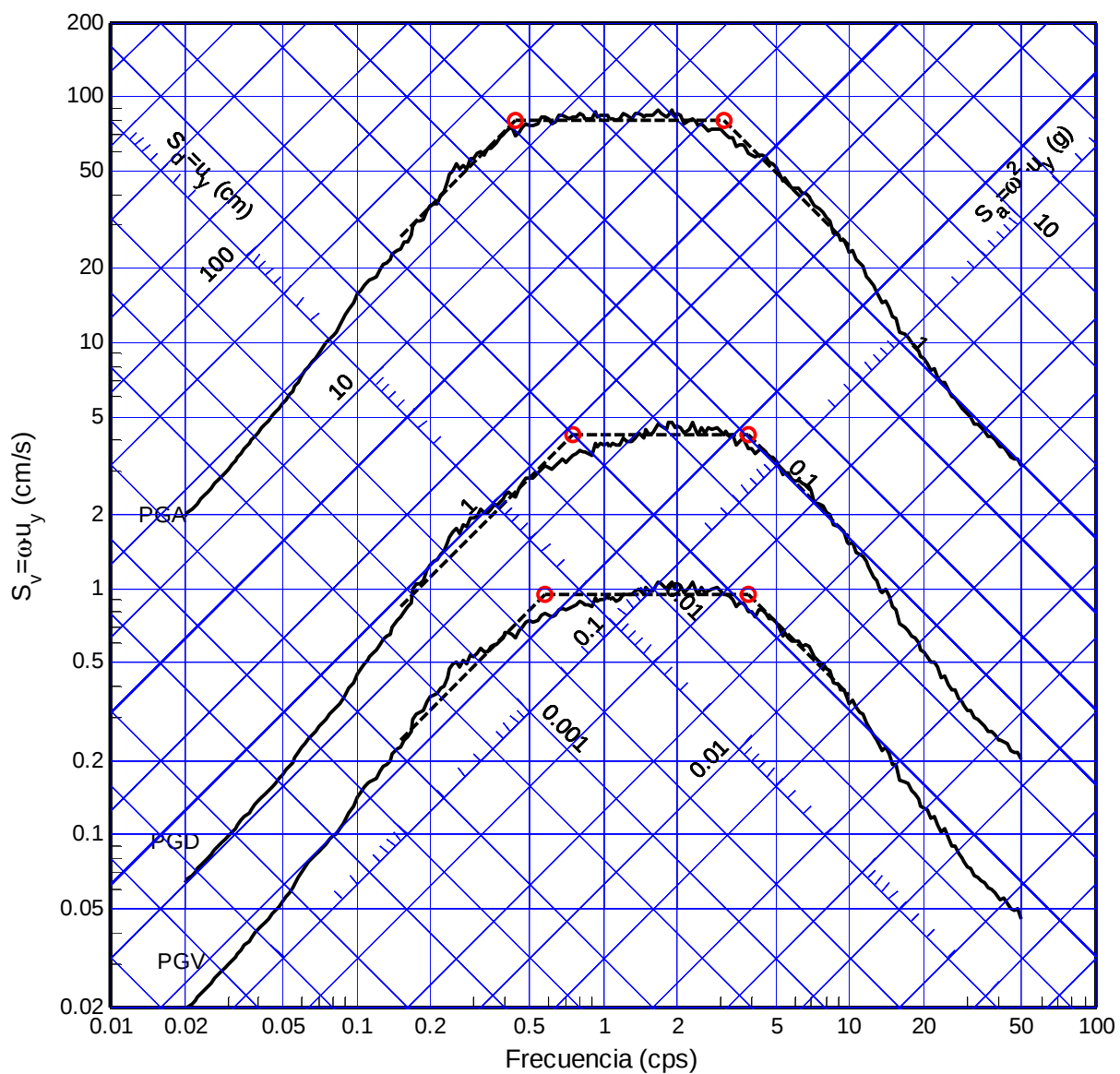


Figura B.45 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=0\%$

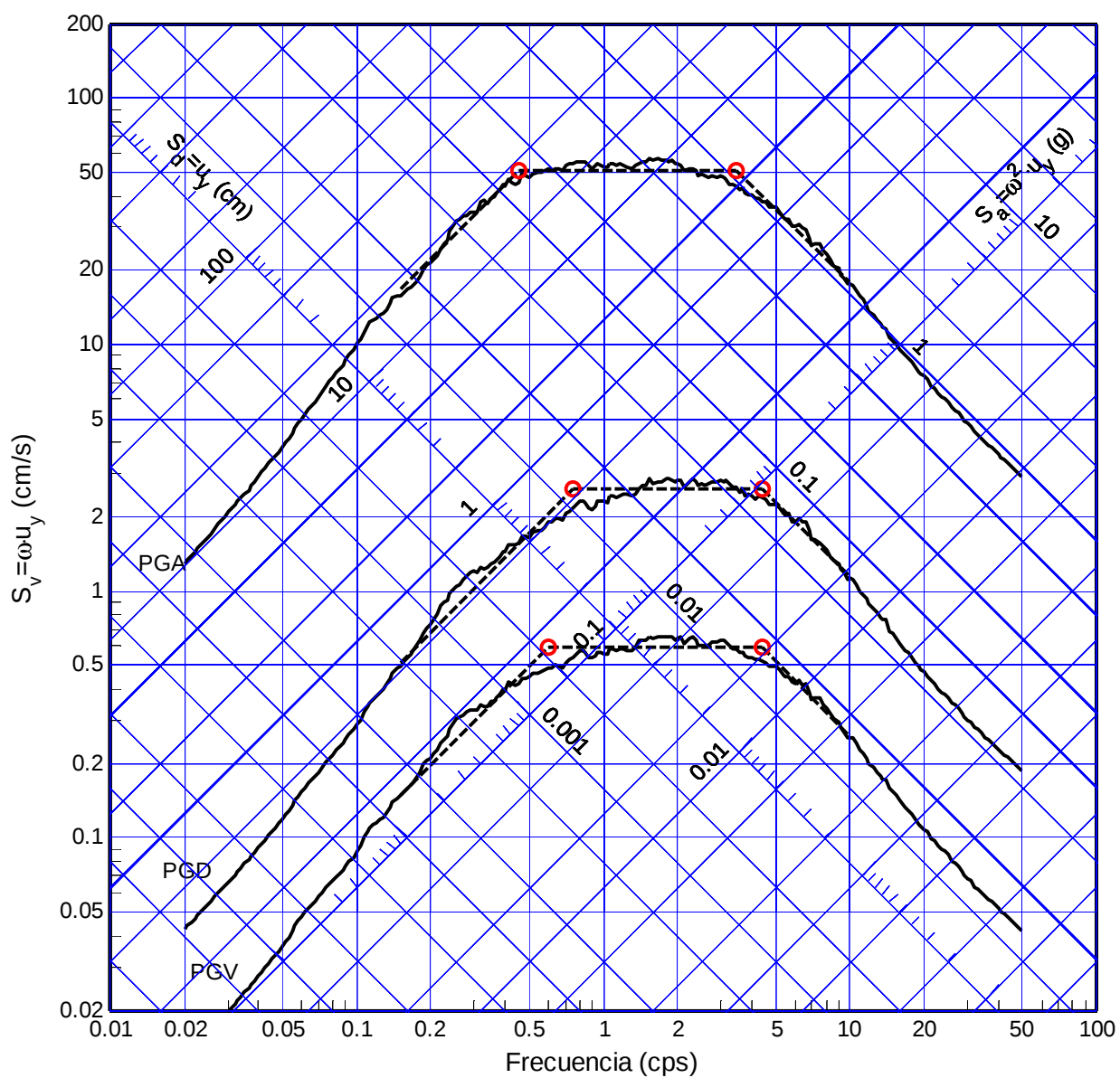


Figura B.46 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=0\%$

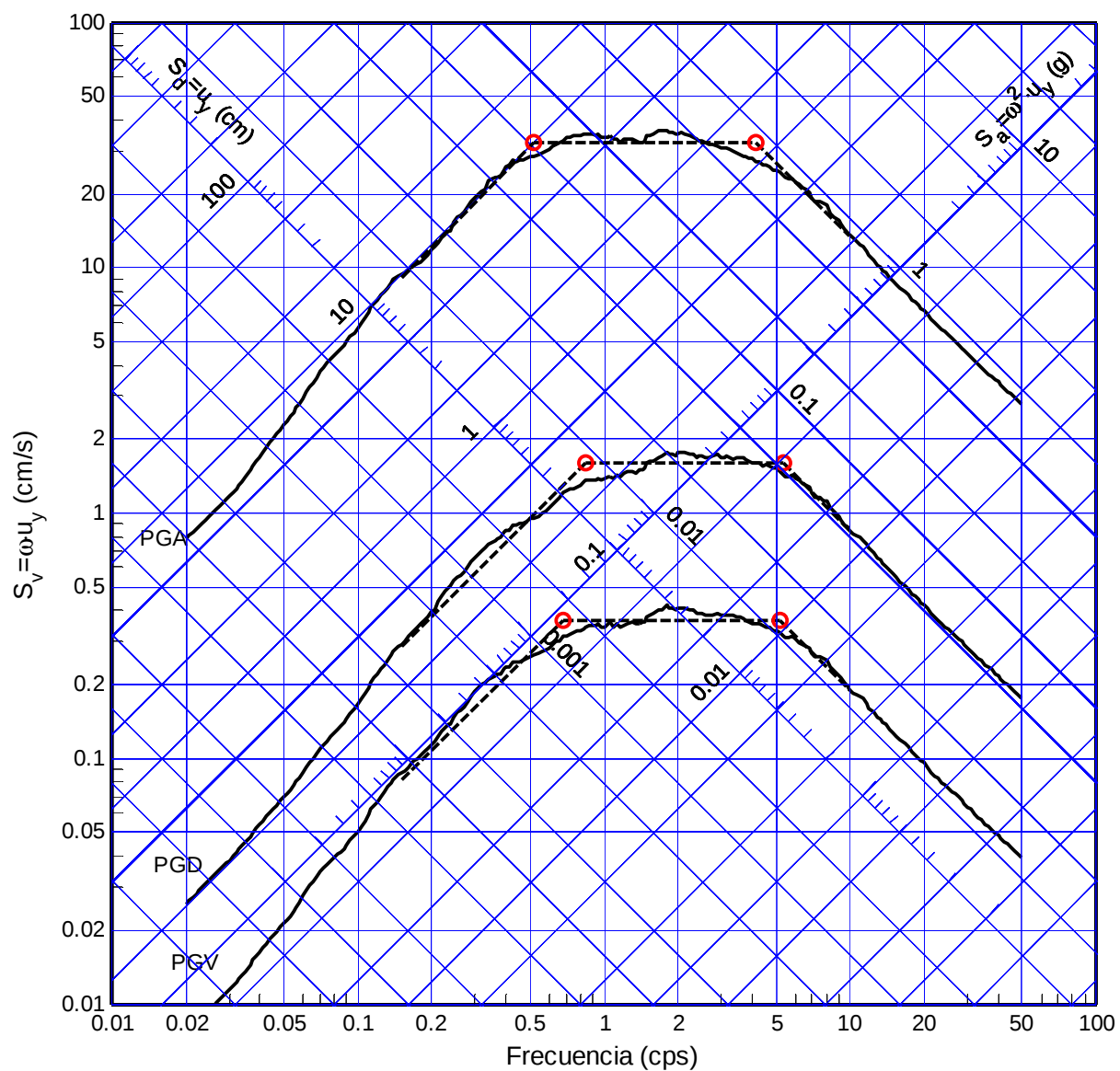


Figura B.47 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=0\%$

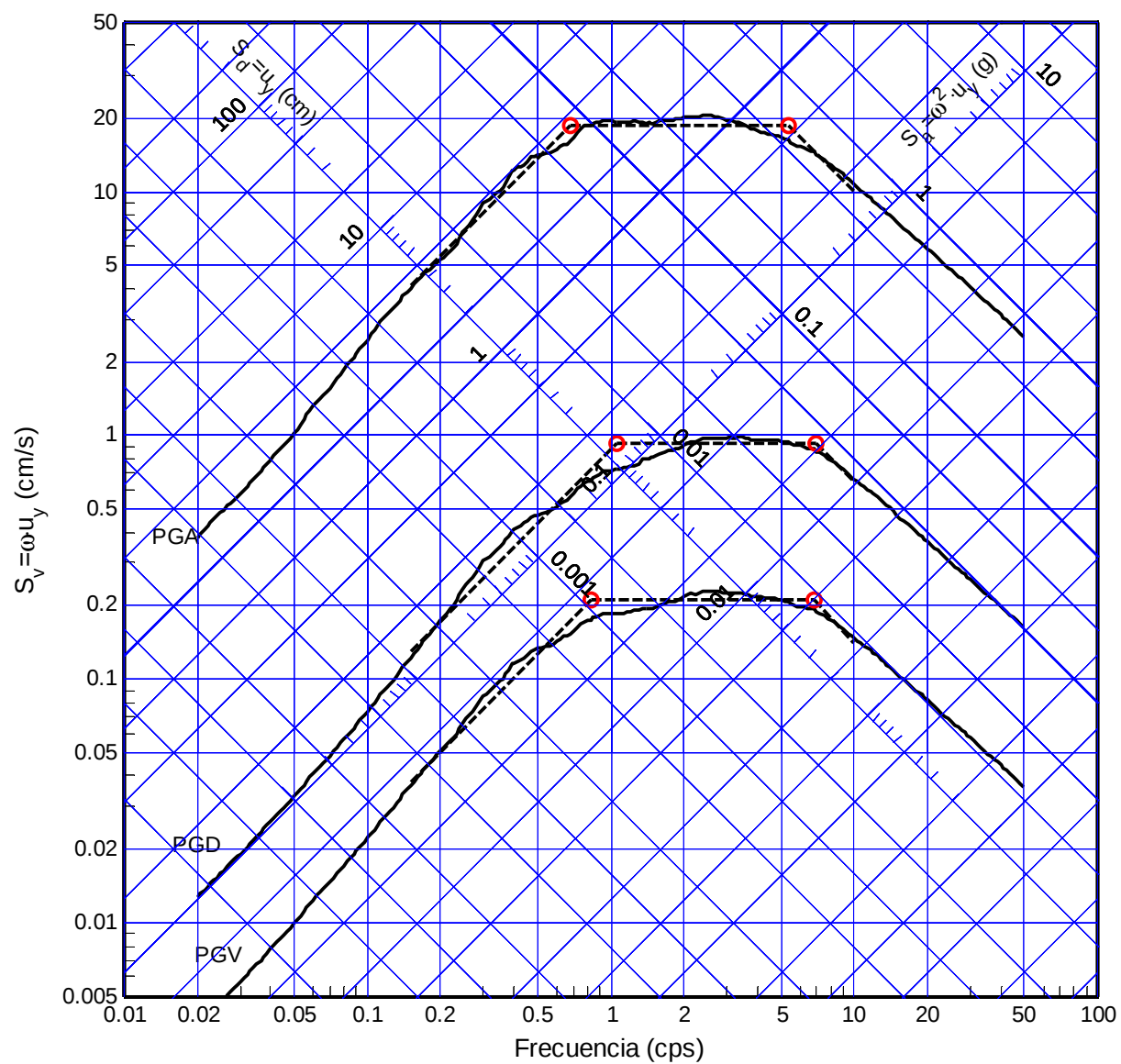


Figura B.48 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=0\%$

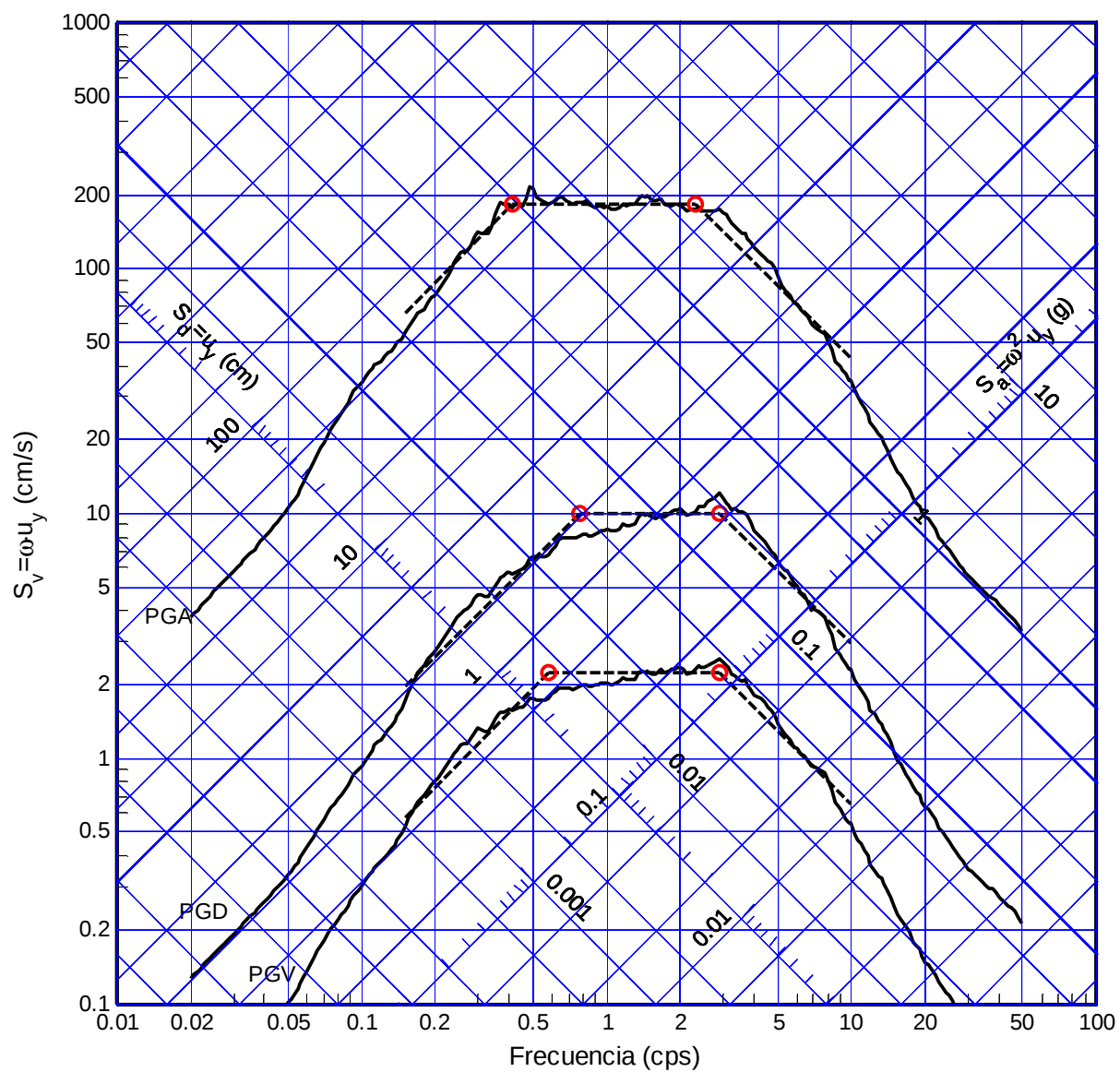


Figura B.49 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=2\%$

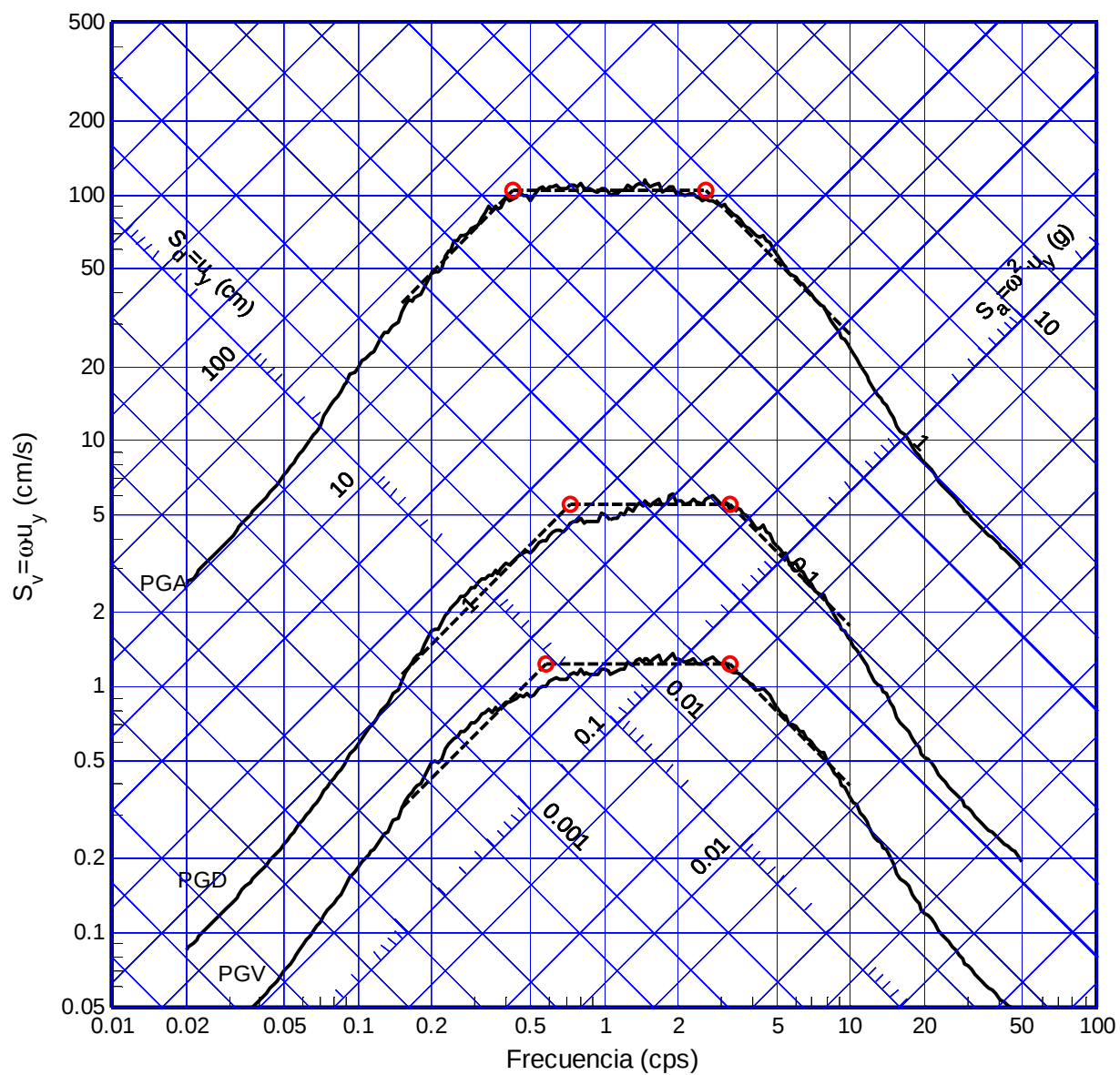


Figura B.50 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=2\%$

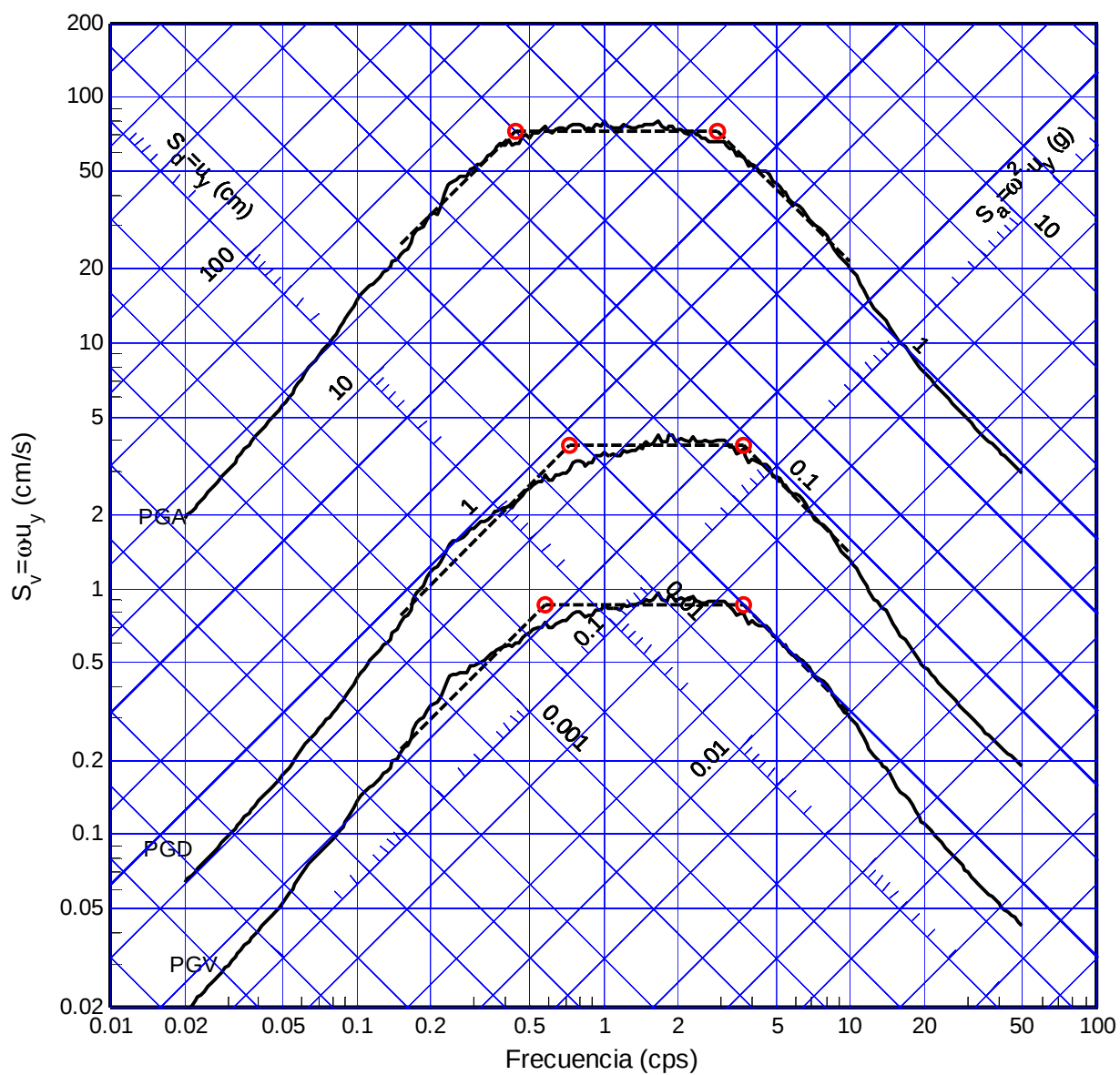


Figura B.51 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=2\%$

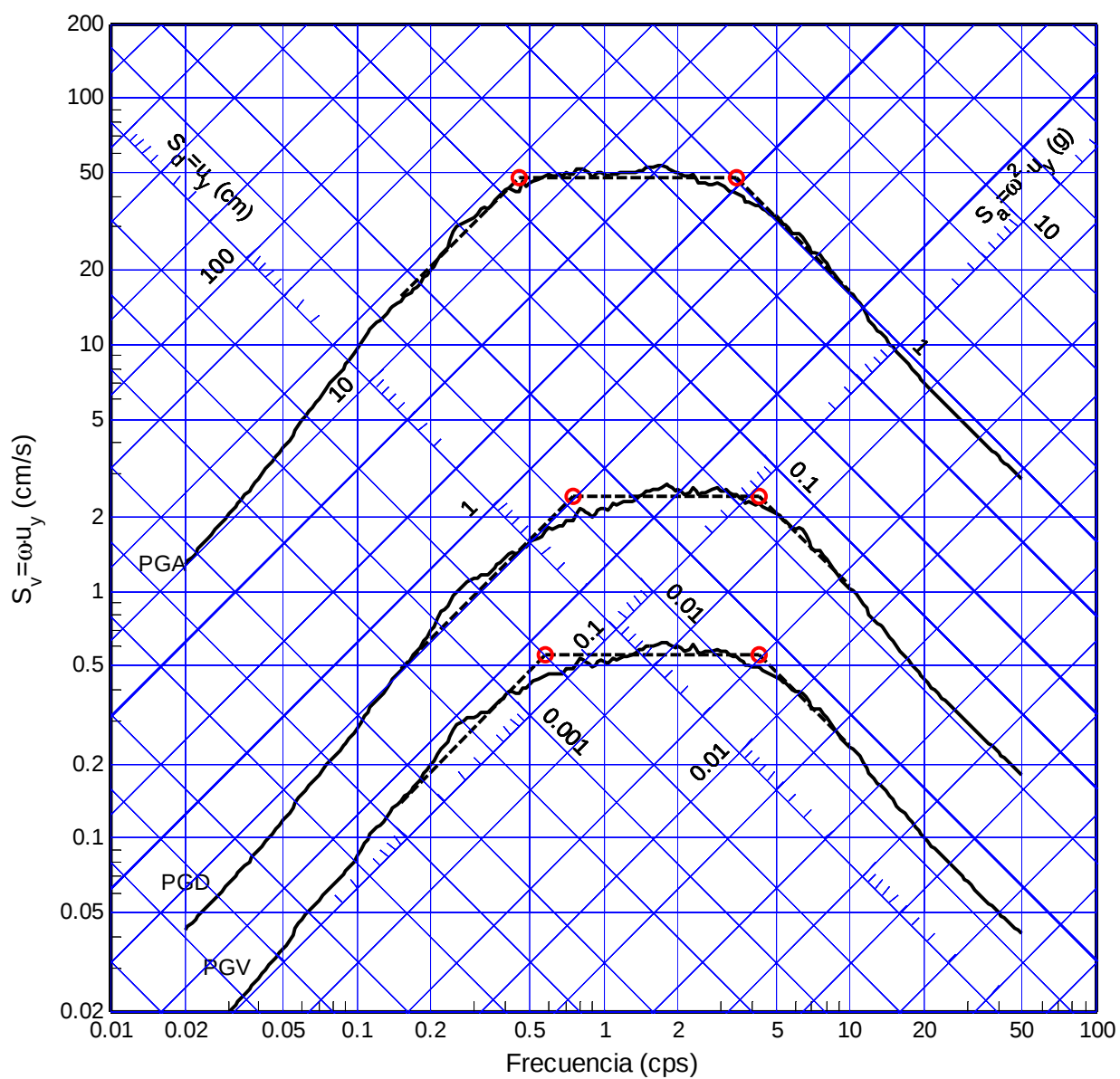


Figura B.52 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=2\%$

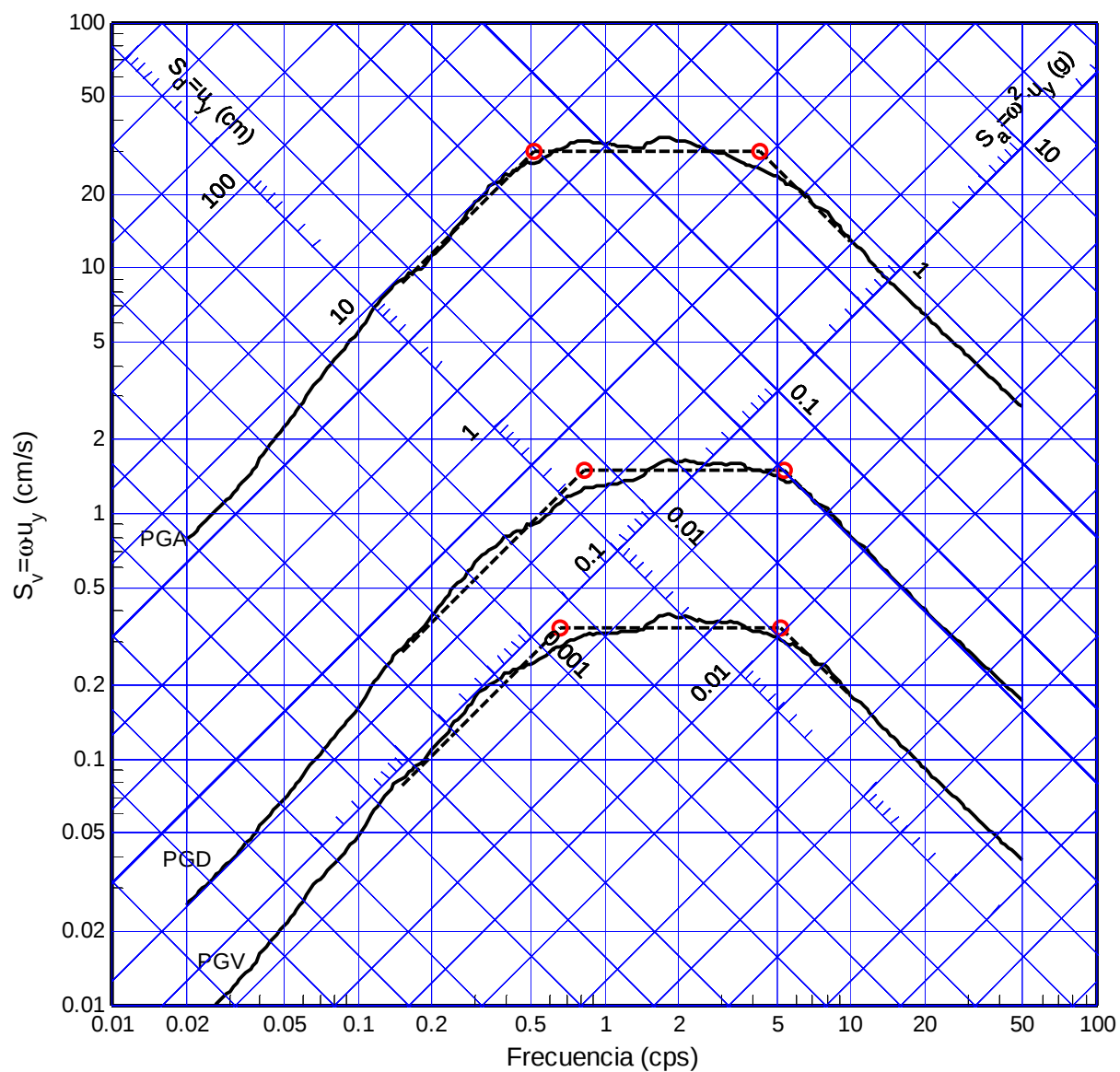


Figura B.53 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=2\%$

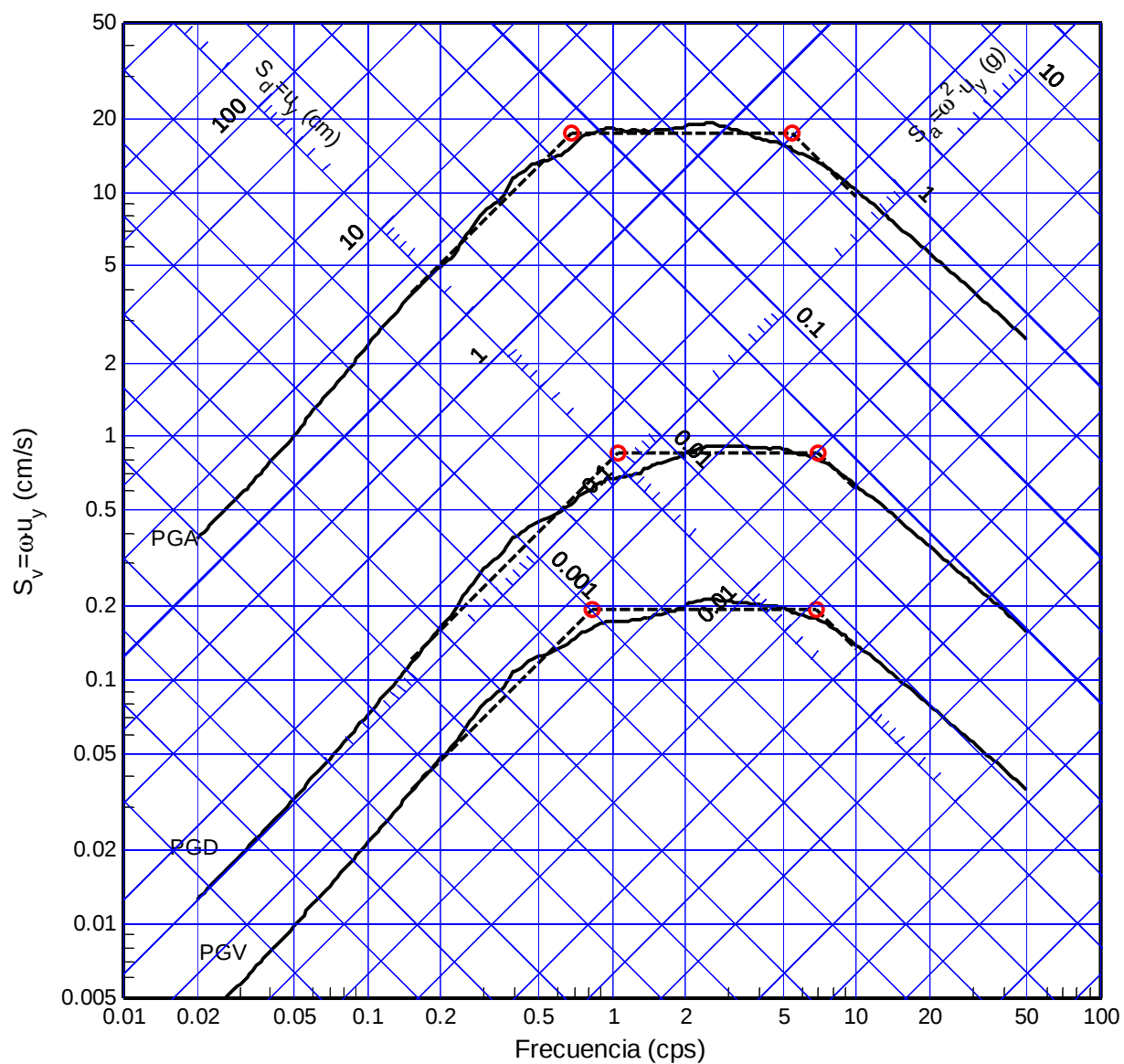


Figura B.54 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=2\%$

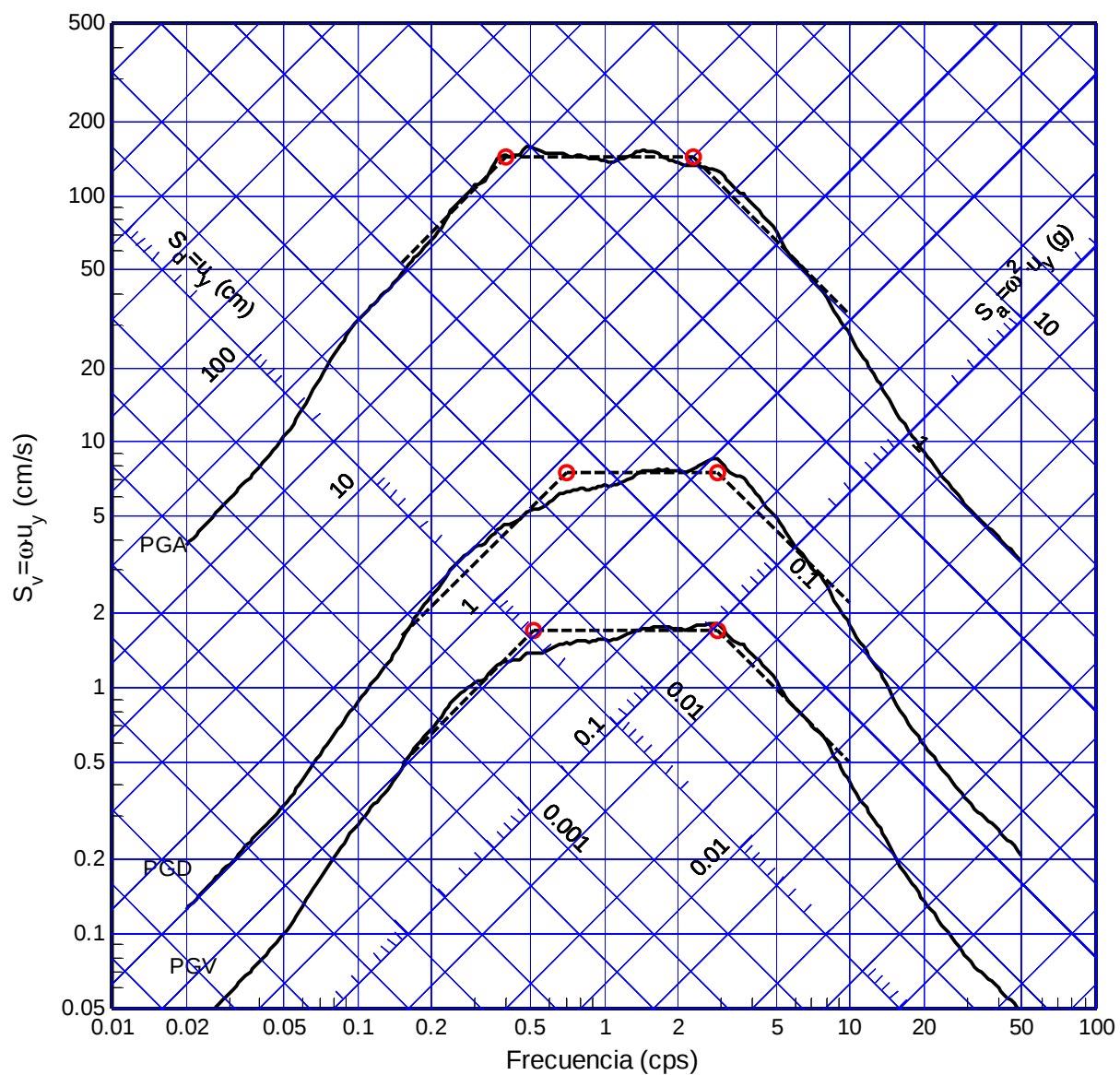


Figura B.55 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=5\%$

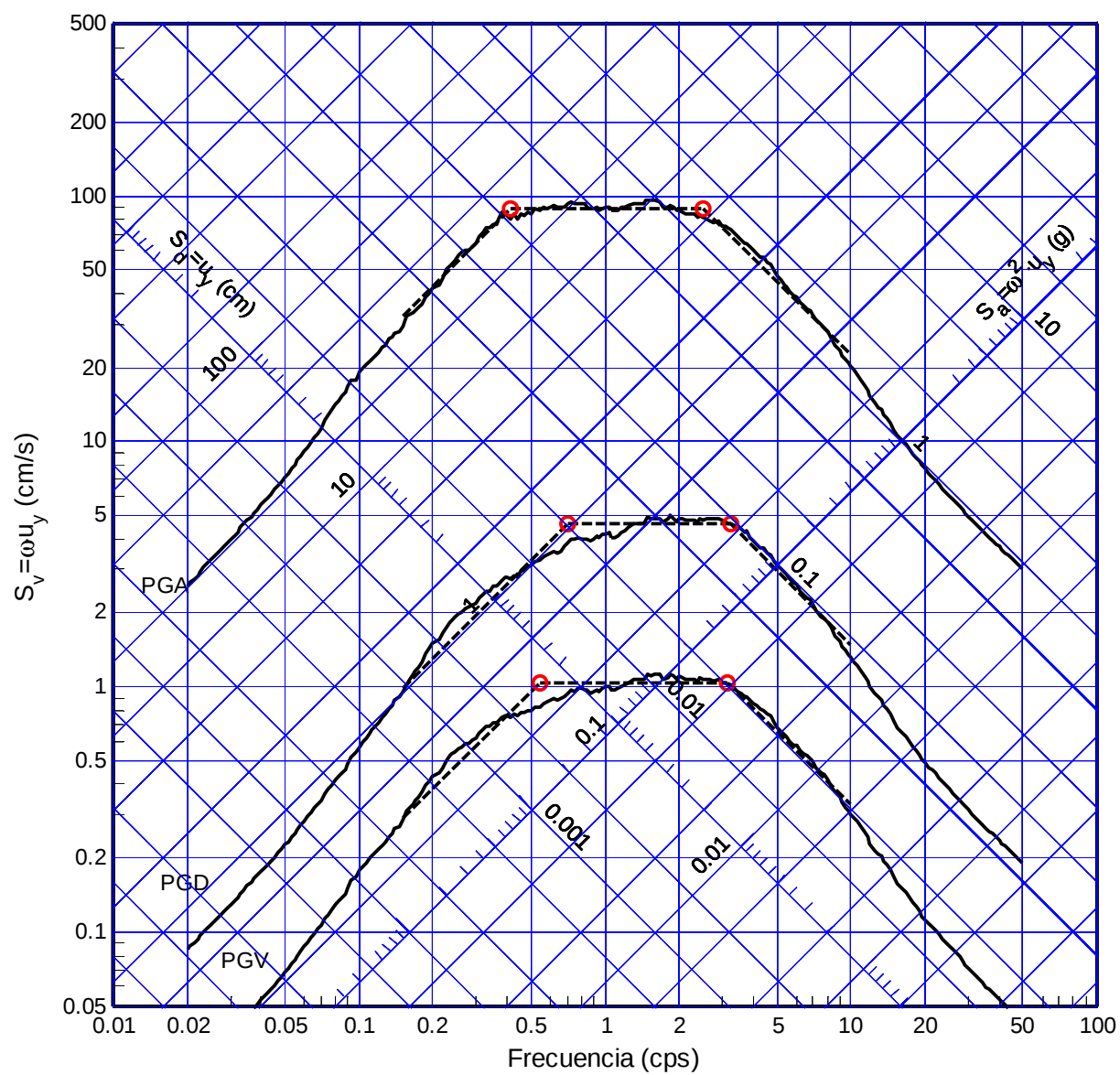


Figura B.56 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=5\%$

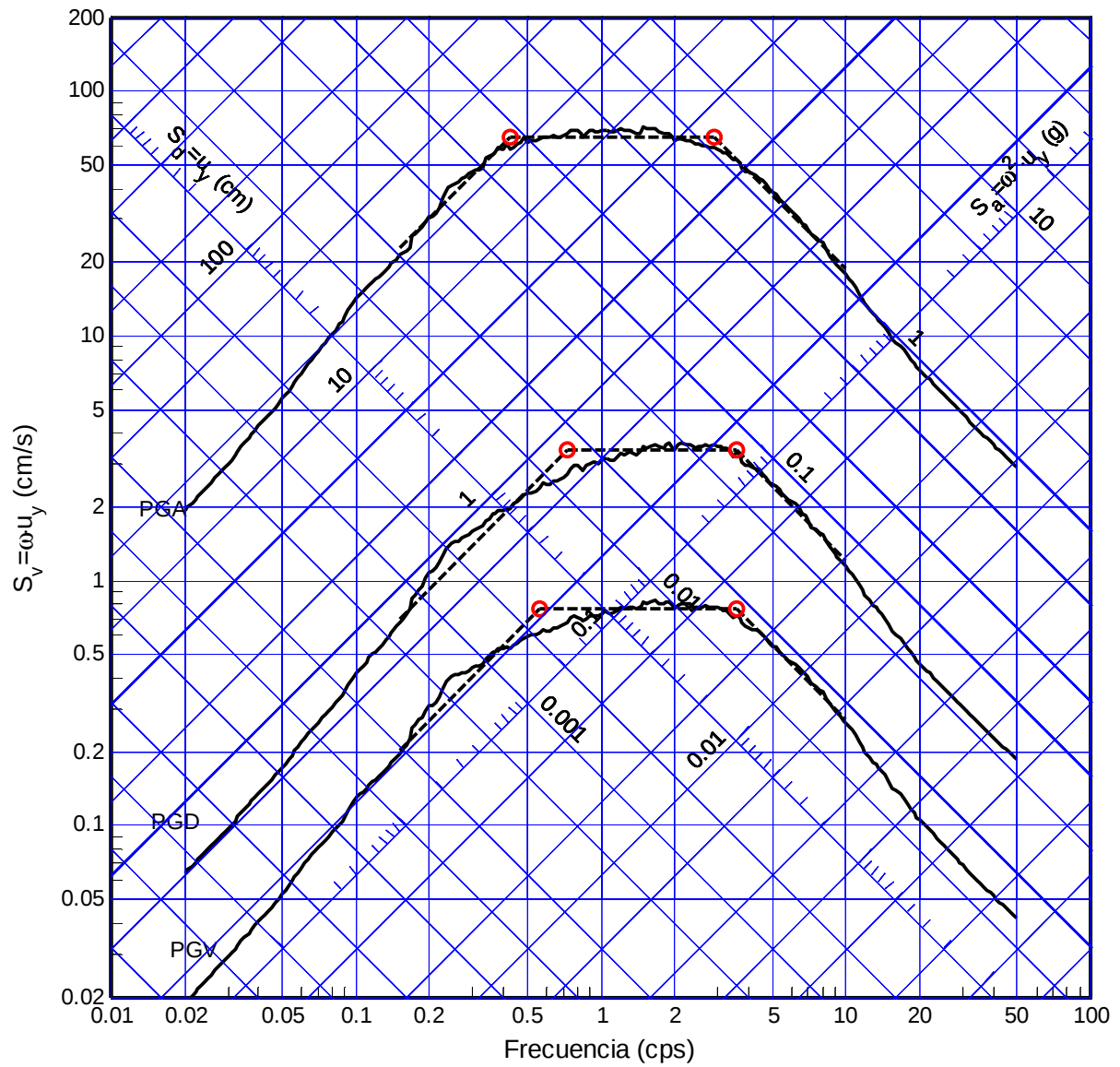


Figura B.57 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=5\%$

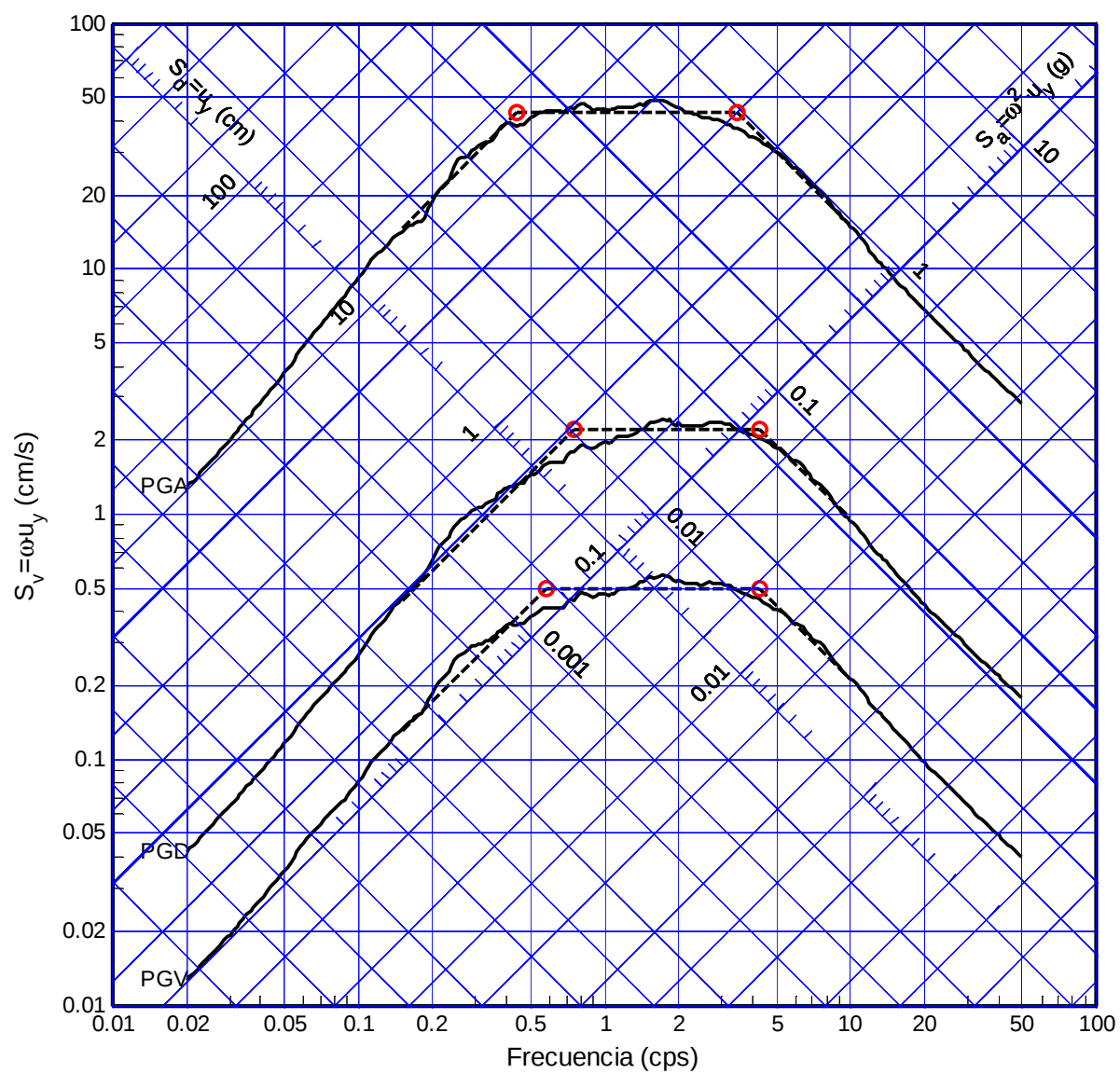


Figura B.58 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$

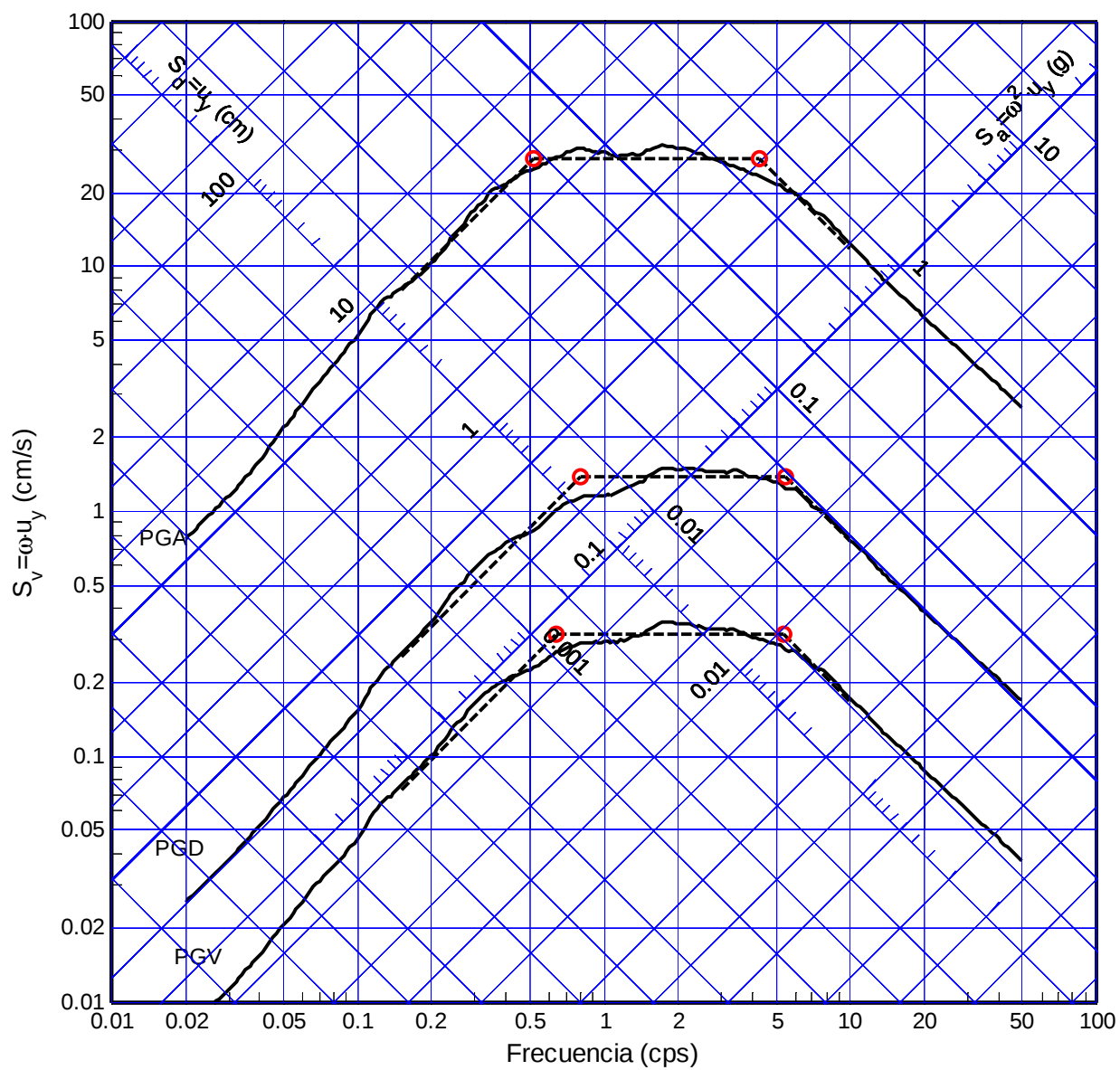


Figura B.59 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=5\%$

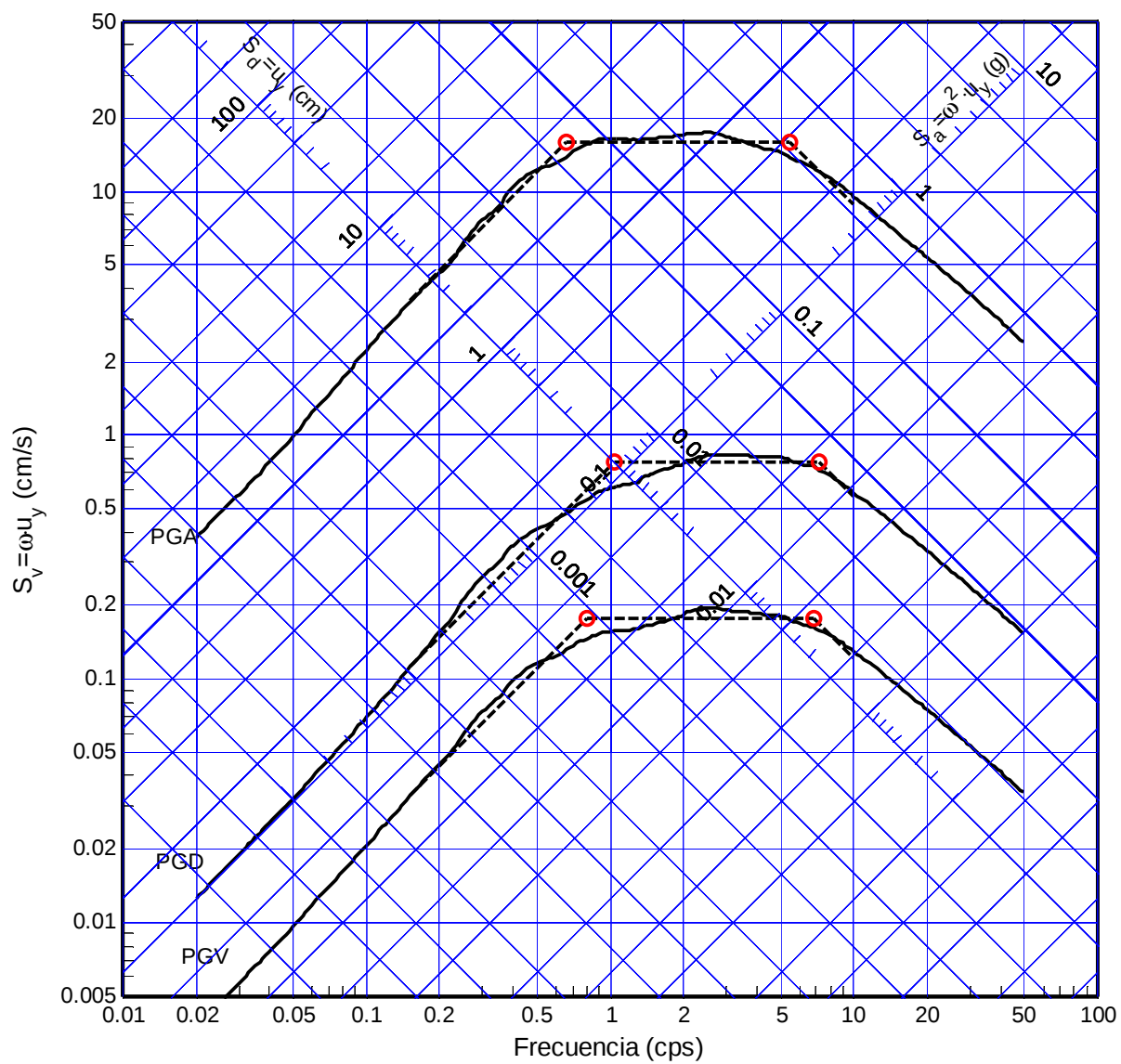


Figura B.60 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=5\%$

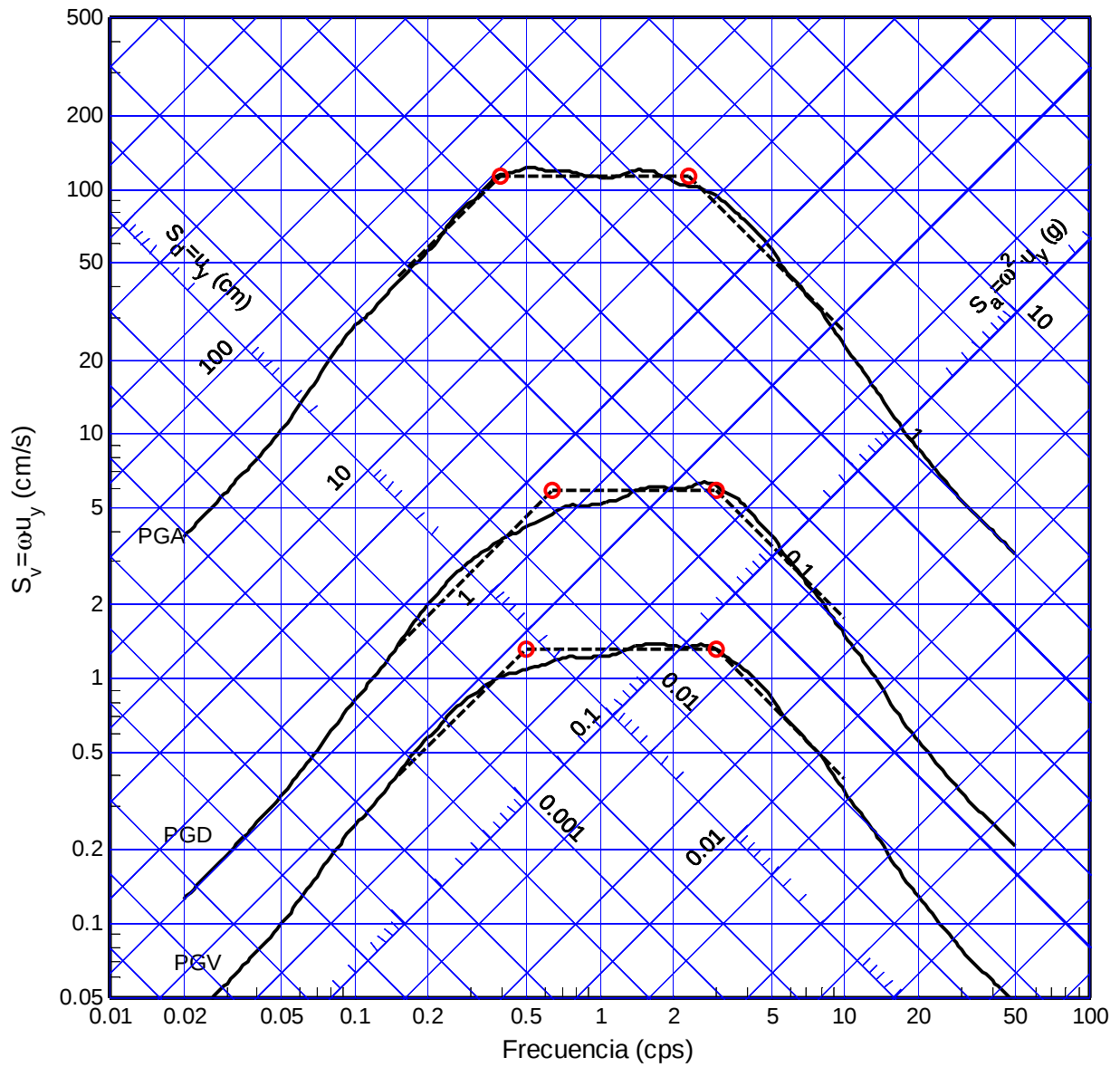


Figura B.61 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=10\%$

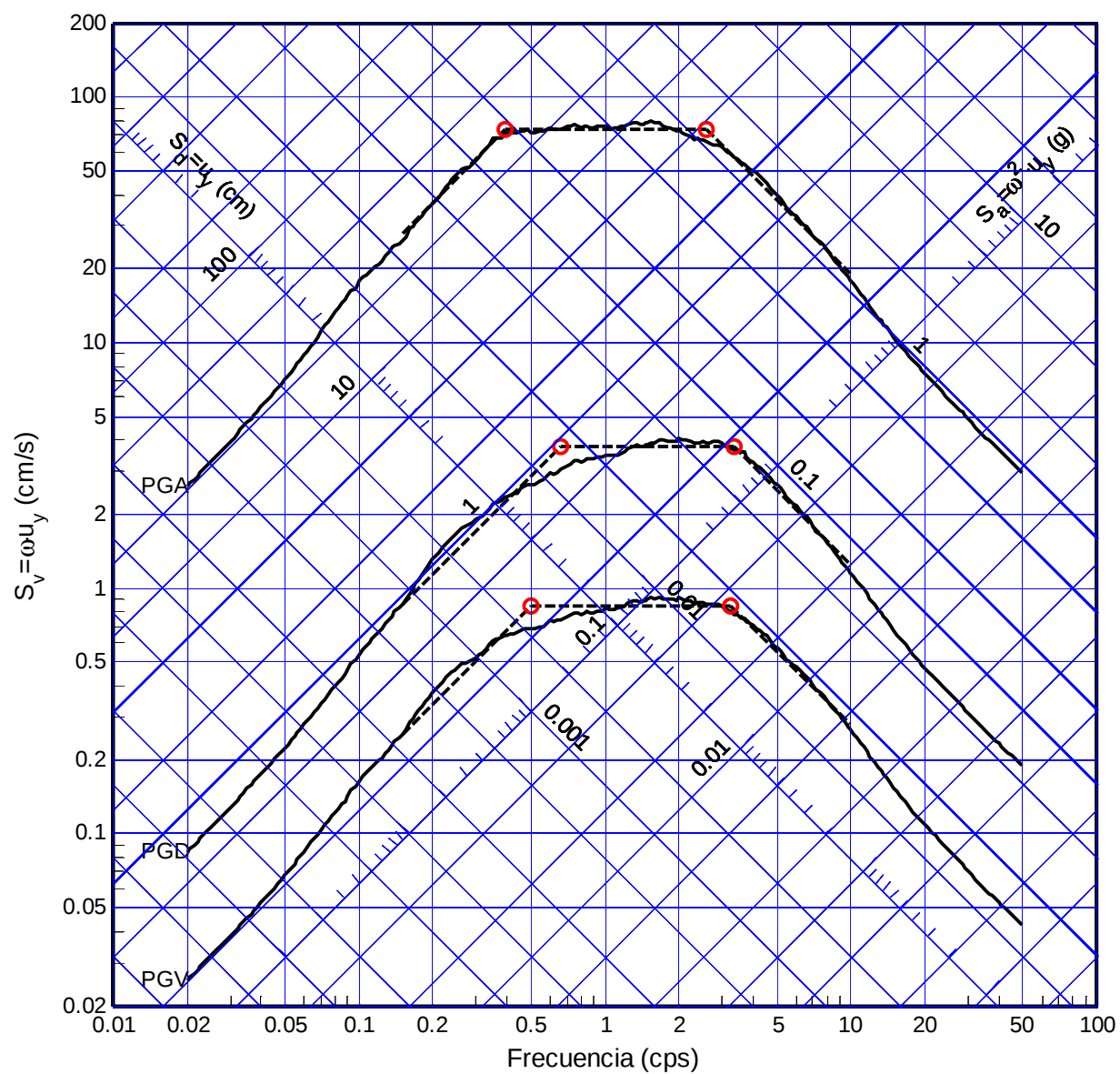


Figura B.62 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=10\%$

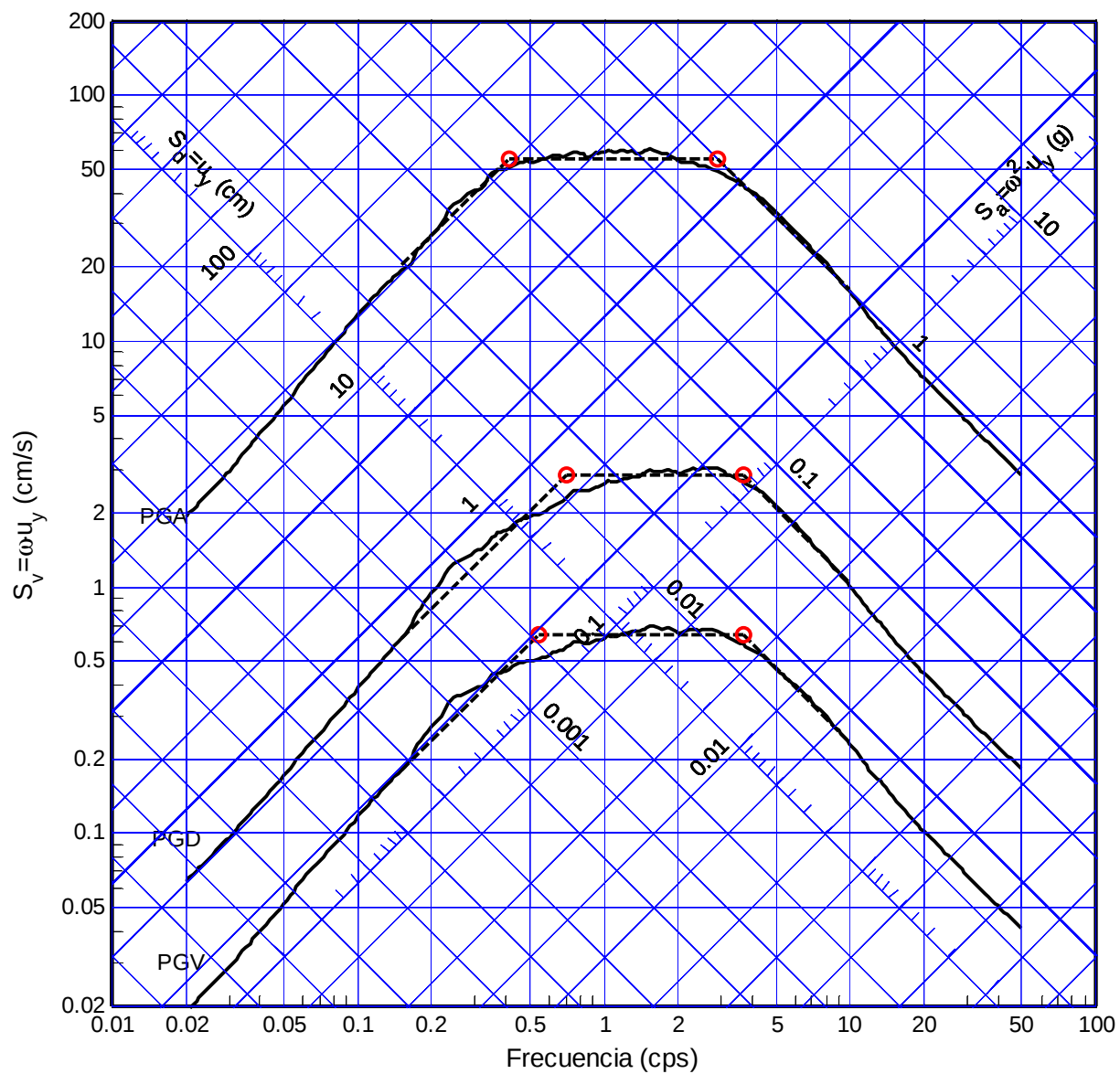


Figura B.63 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=10\%$

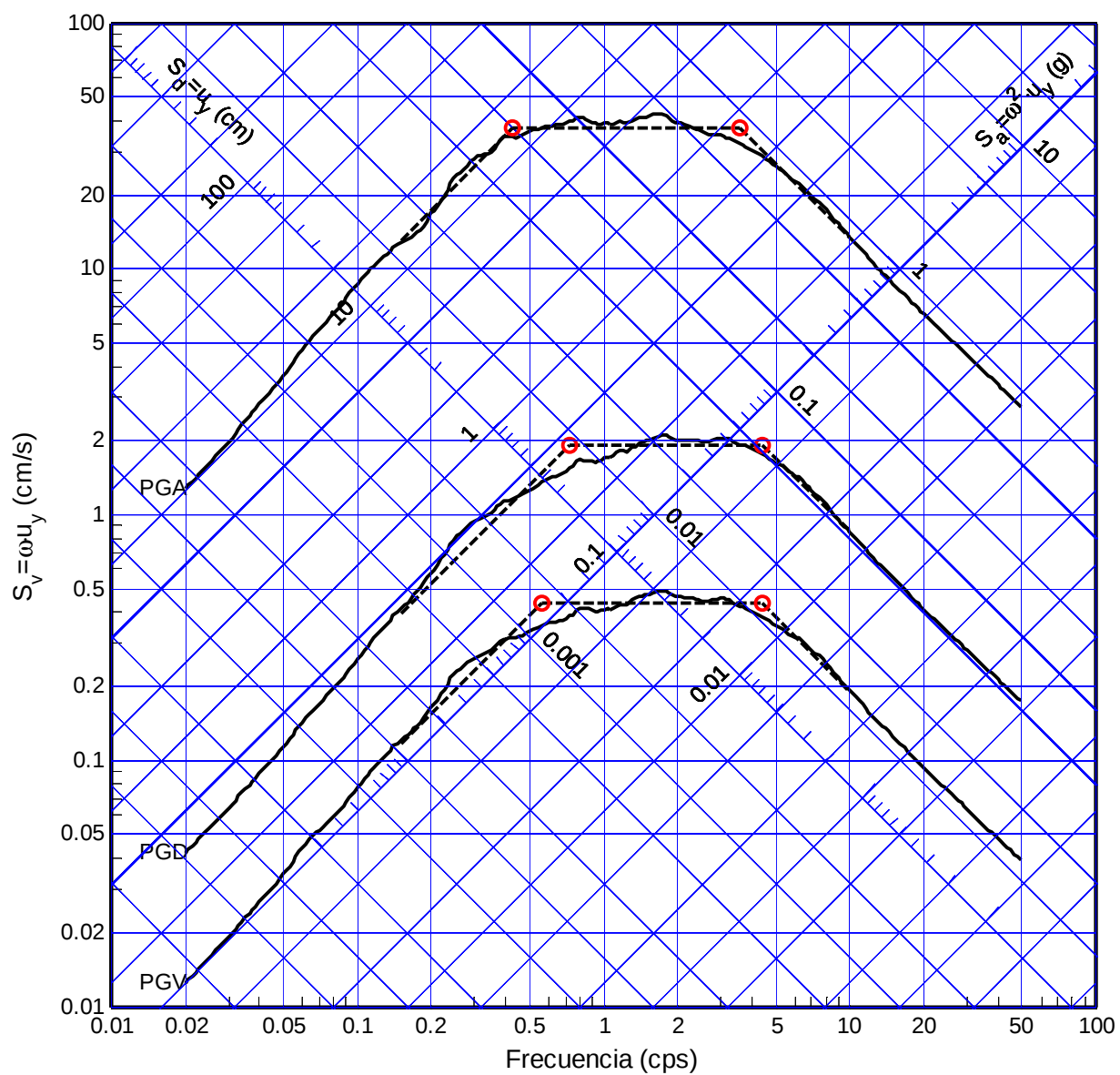


Figura B.64 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=10\%$

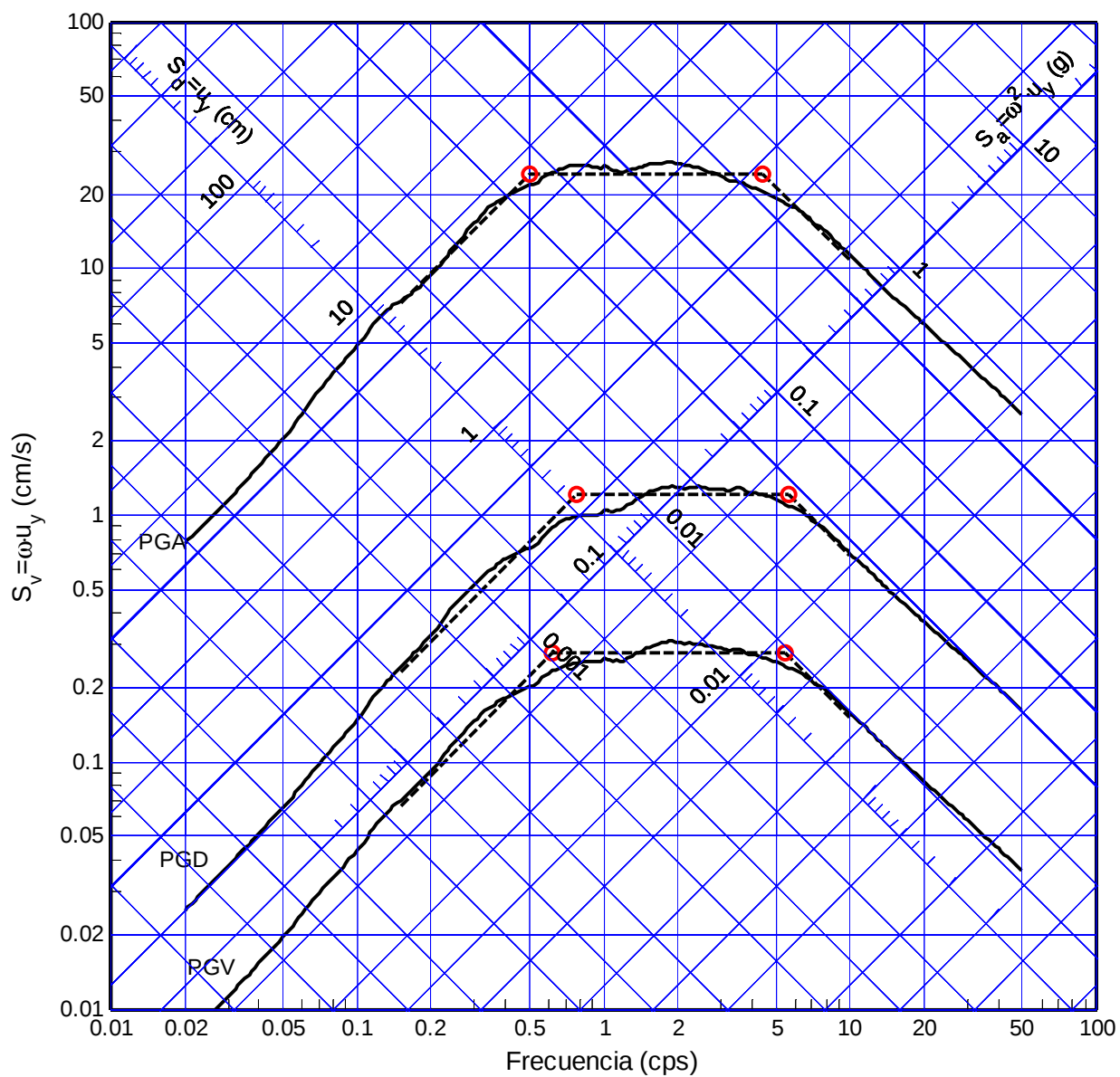


Figura B.65 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=10\%$

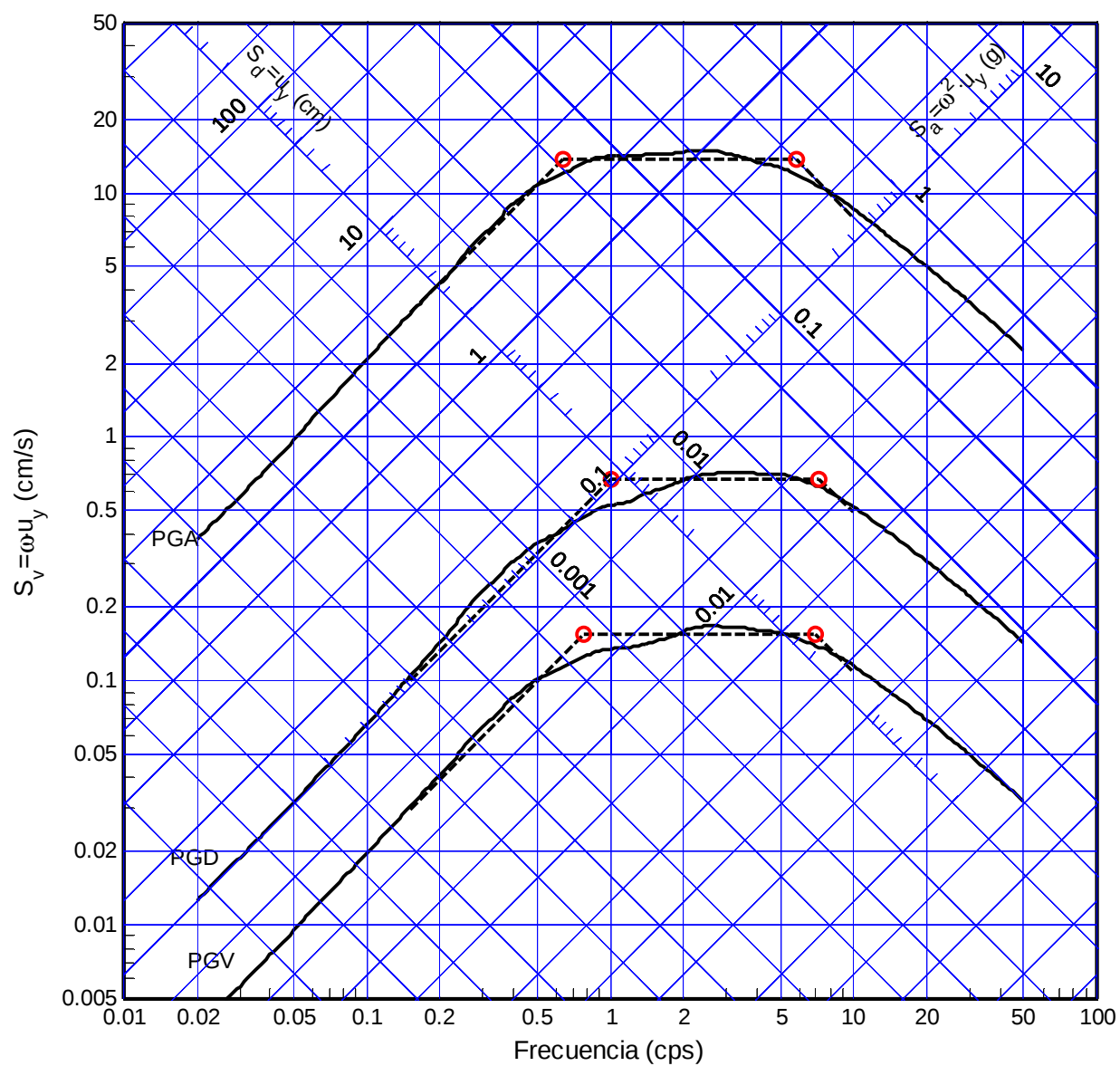


Figura B.66 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=10\%$

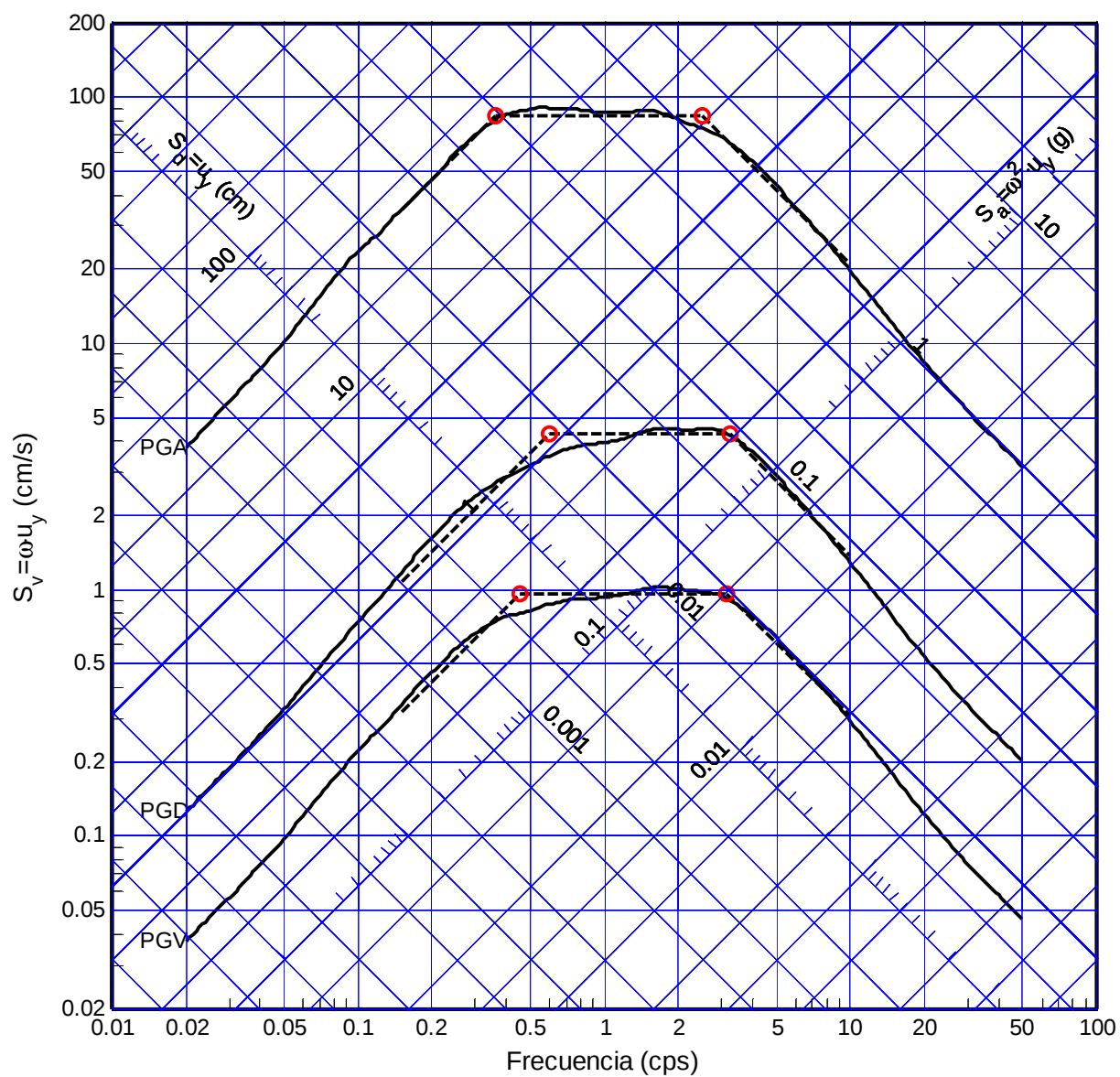


Figura B.67 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=20\%$

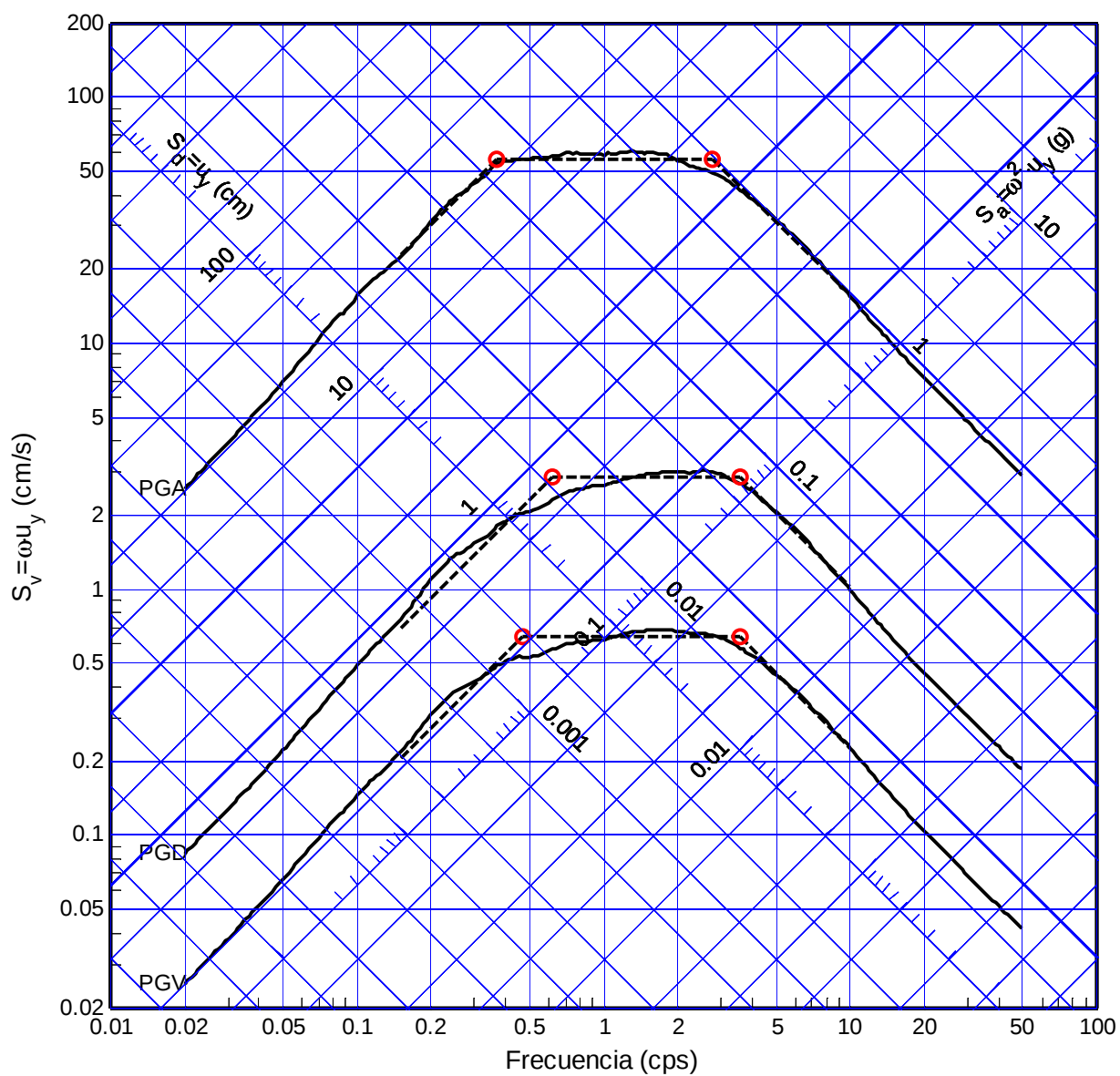


Figura B.68 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=20\%$

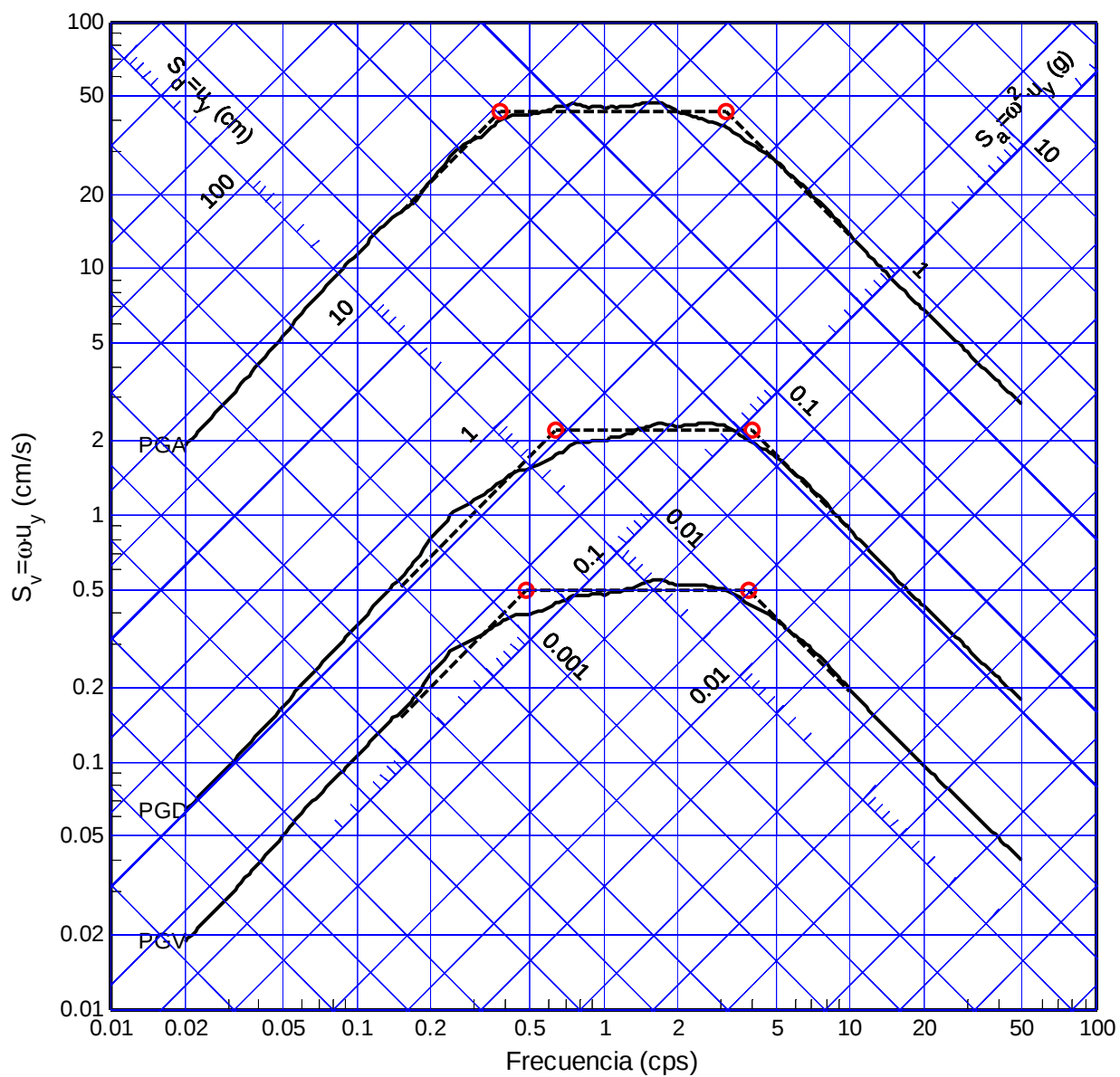


Figura B.69 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=20\%$

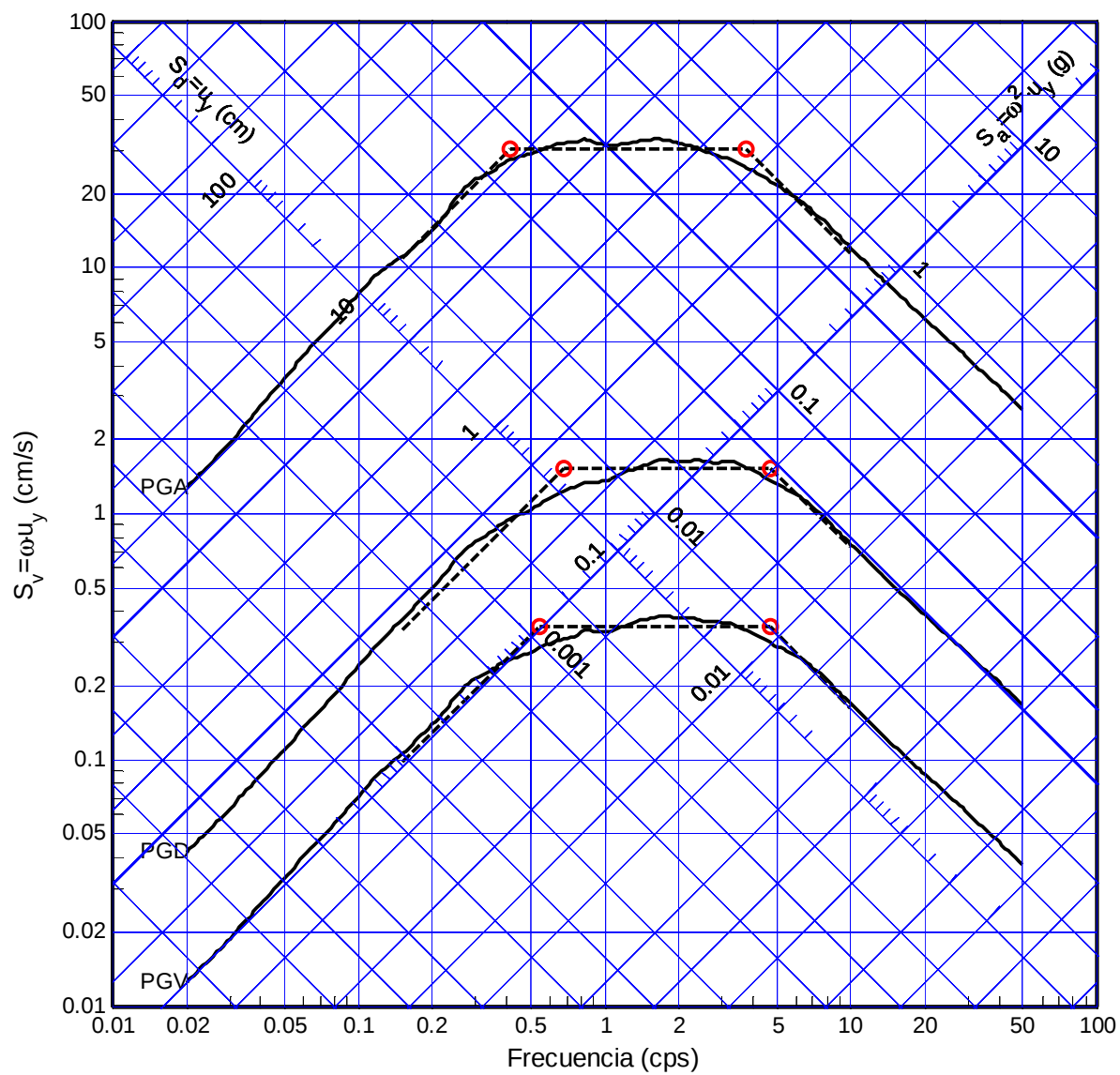


Figura B.70 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=20\%$

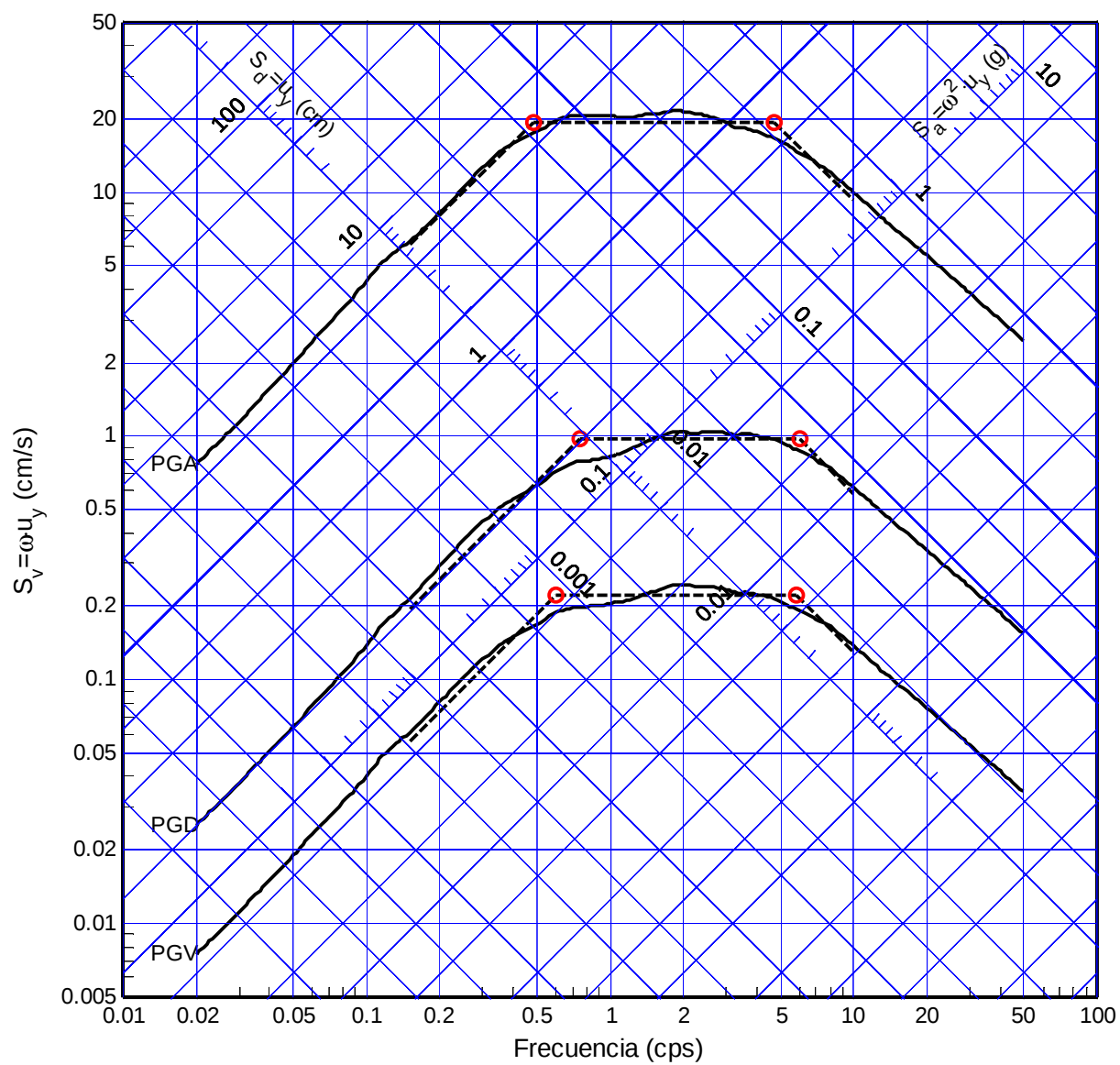


Figura B.71 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=20\%$

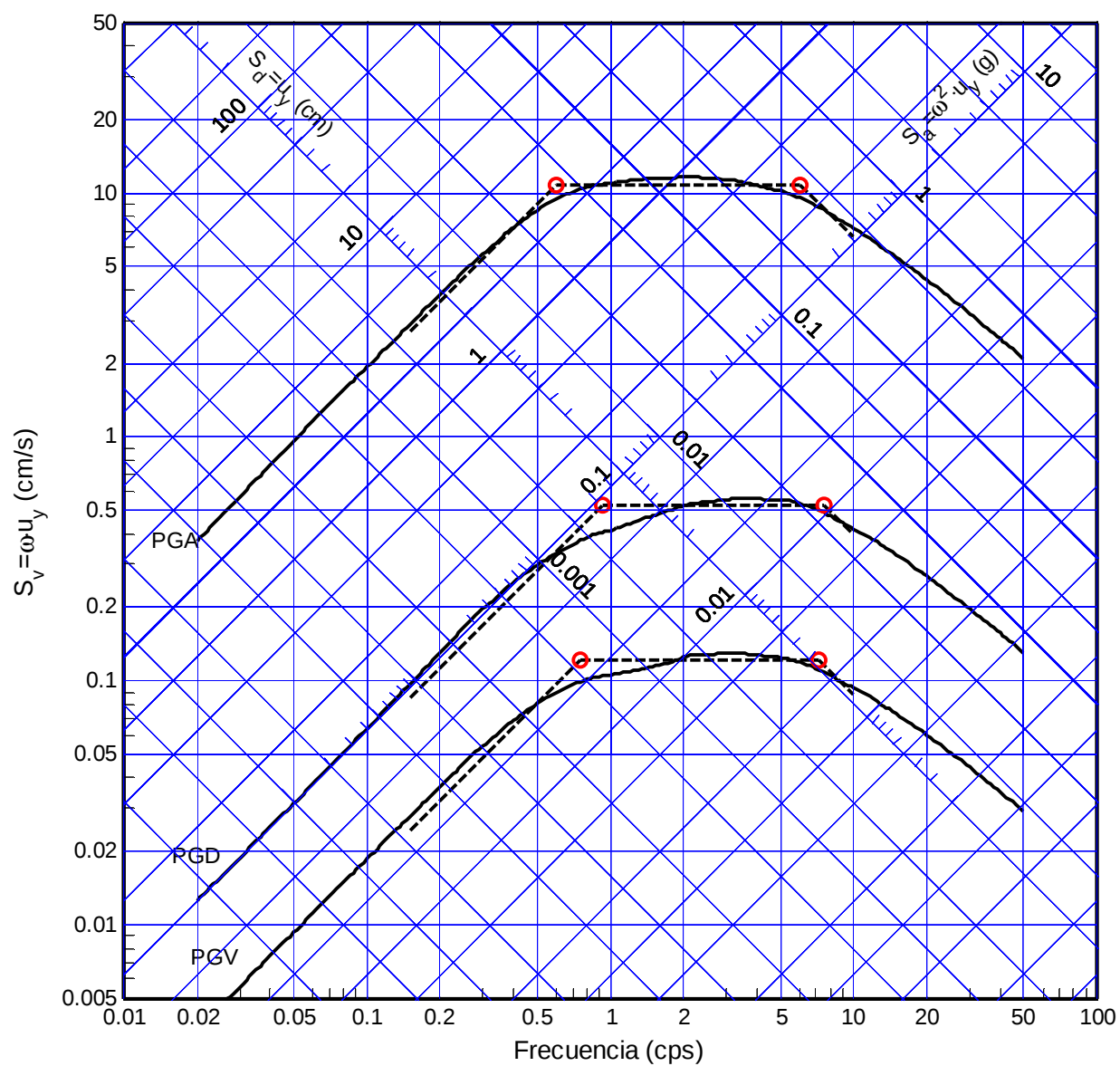


Figura B.72 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=20\%$

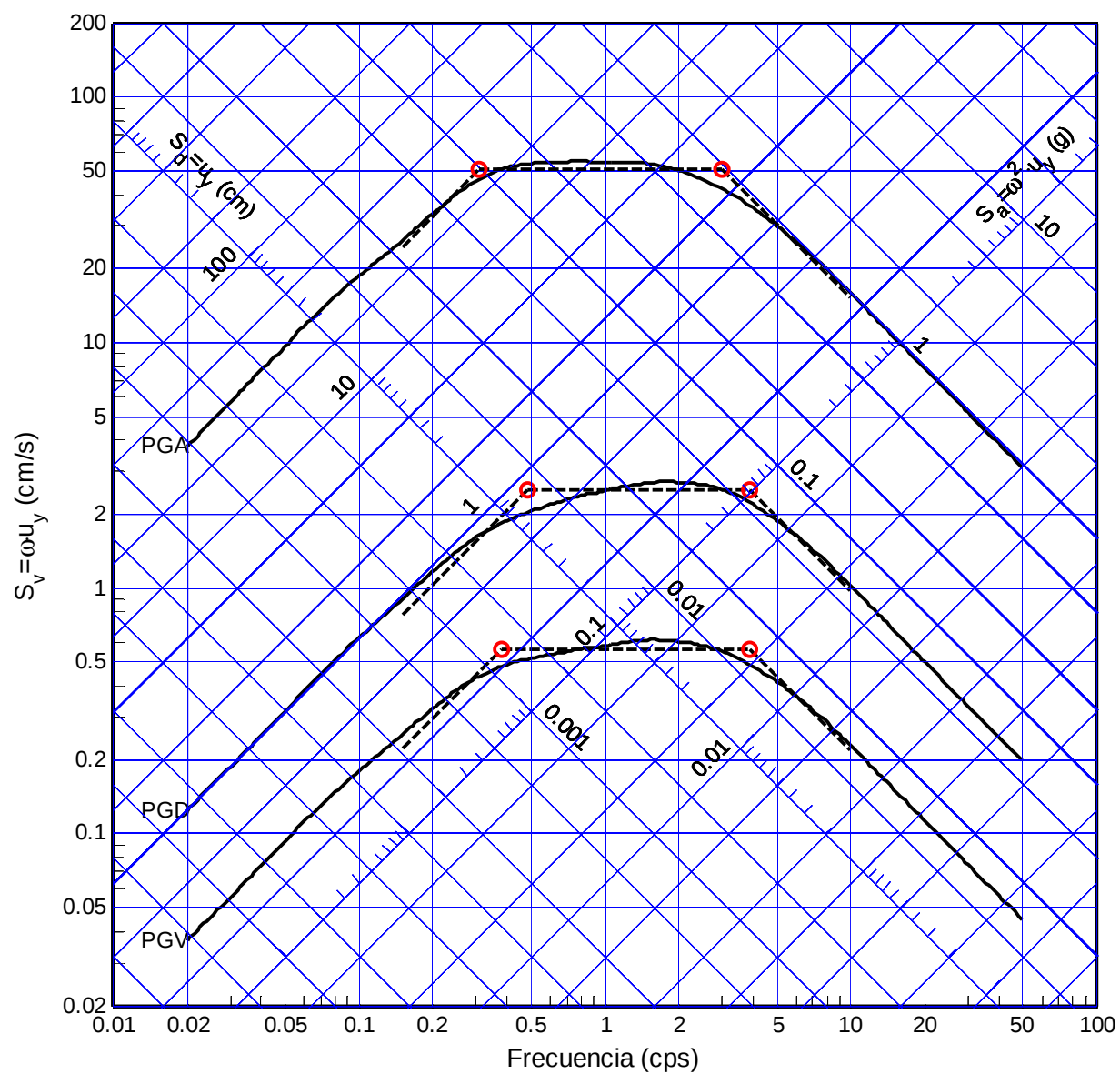


Figura B.73 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=50\%$

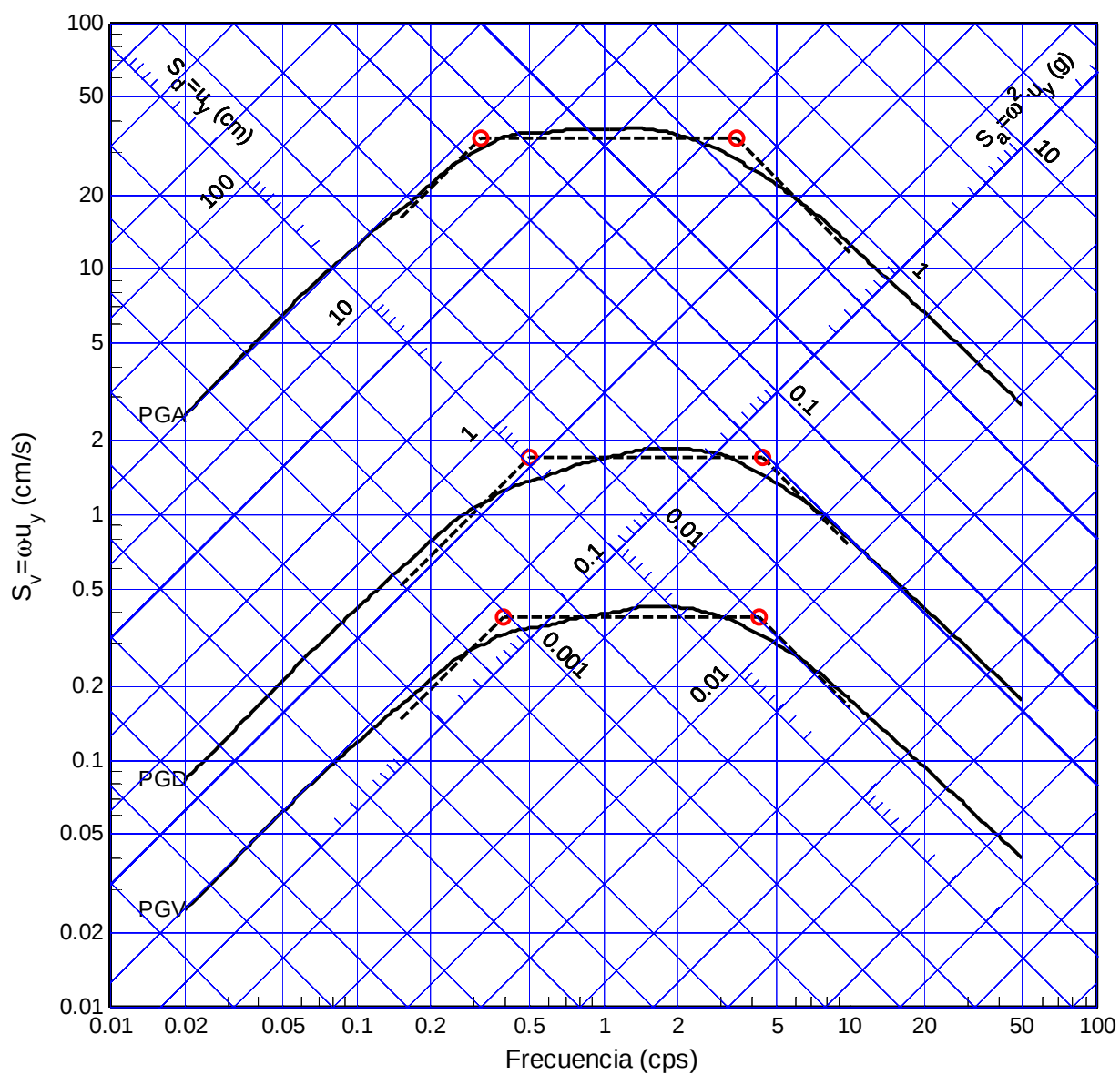


Figura B.74 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=50\%$

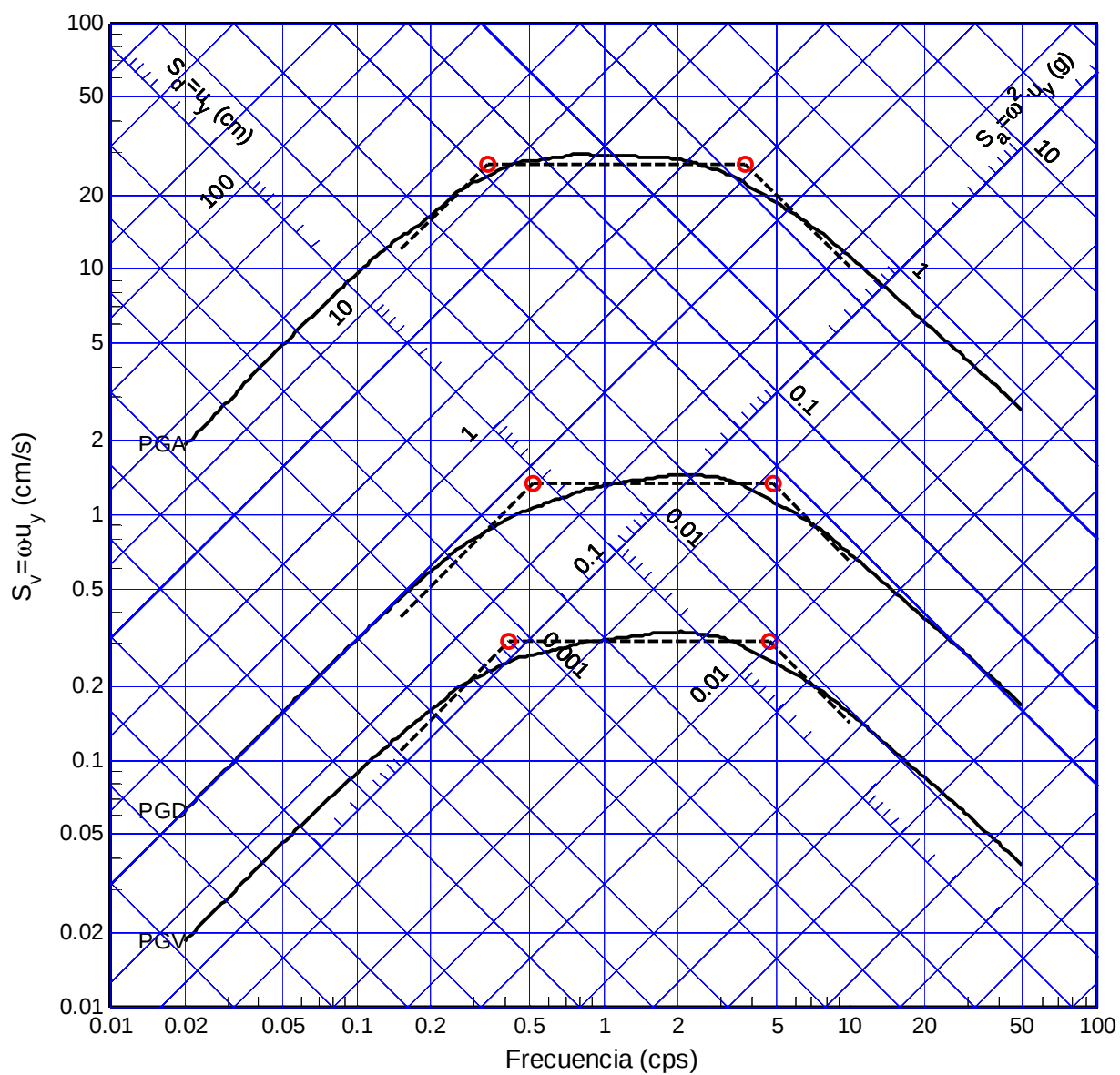


Figura B.75 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=50\%$

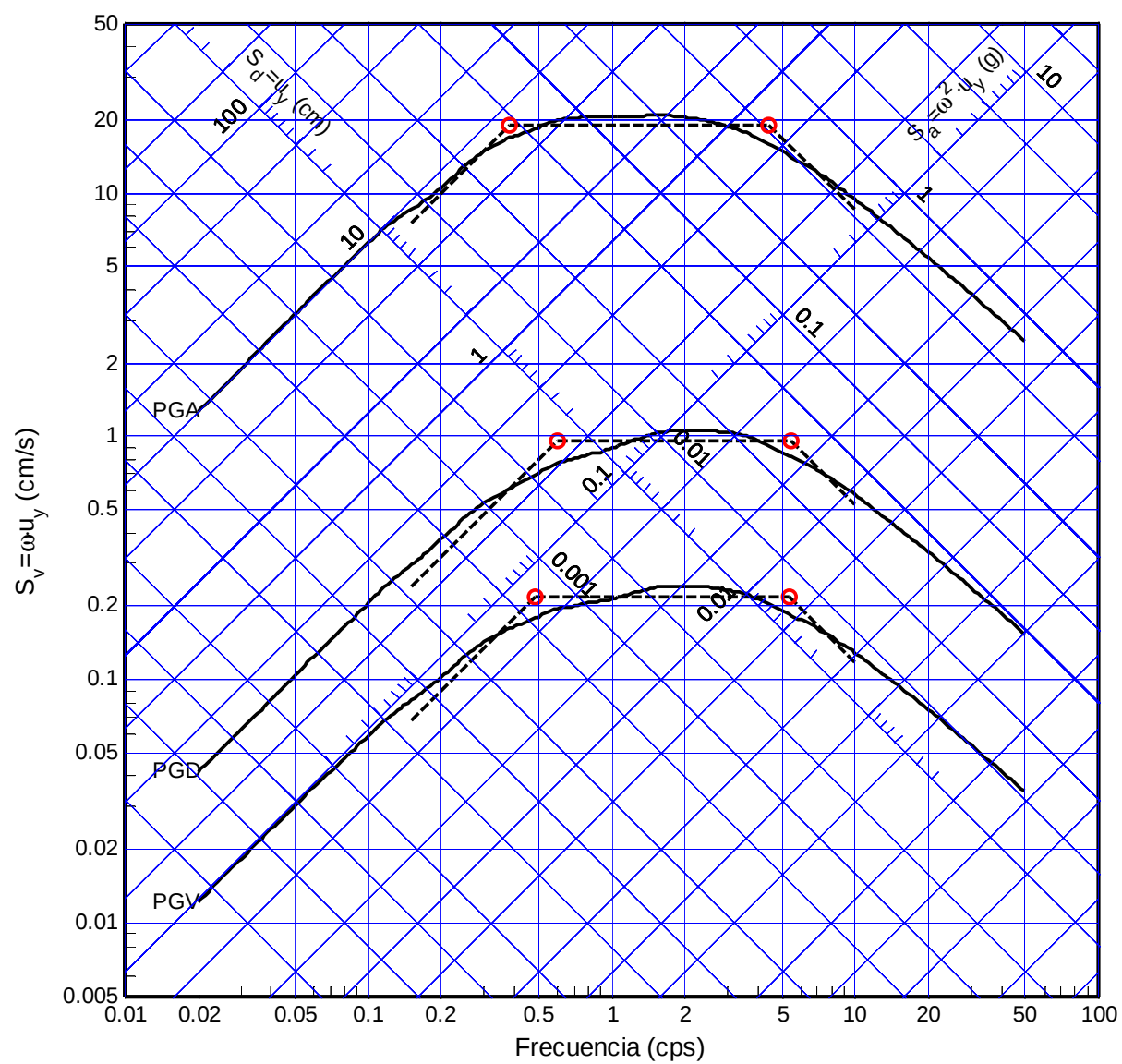


Figura B.76 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=50\%$

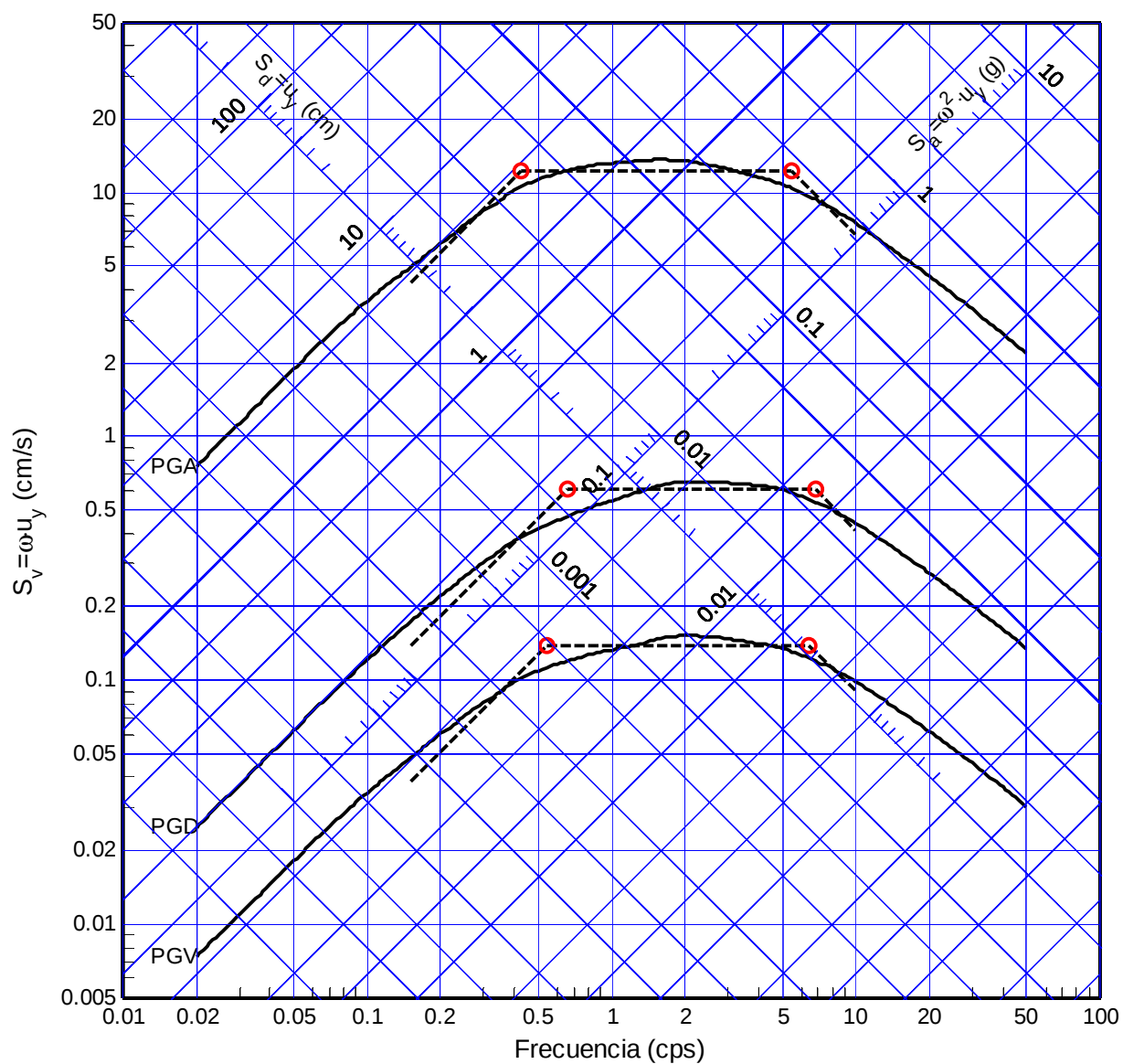


Figura B.77 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=50\%$

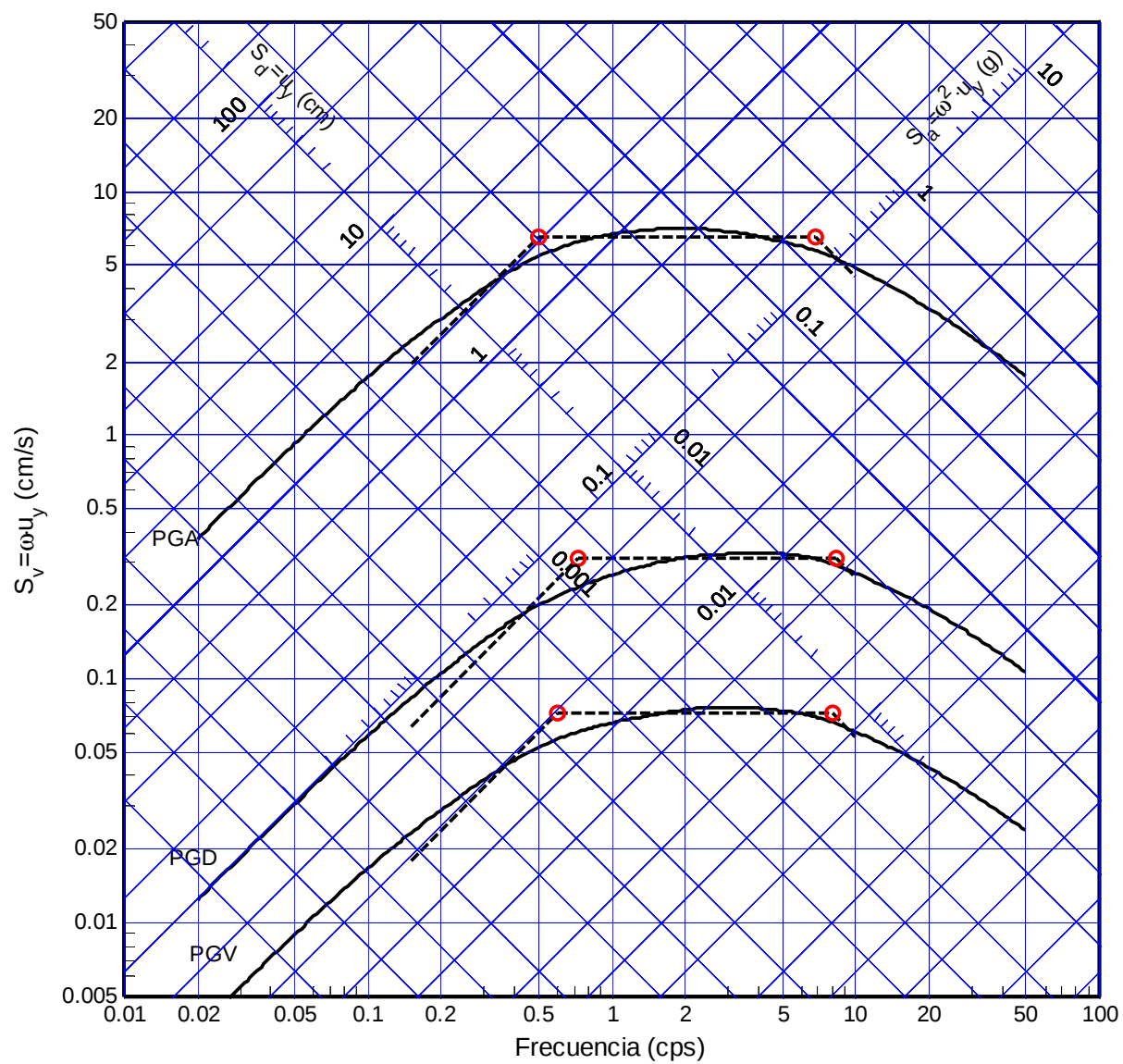


Figura B.78 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=50\%$

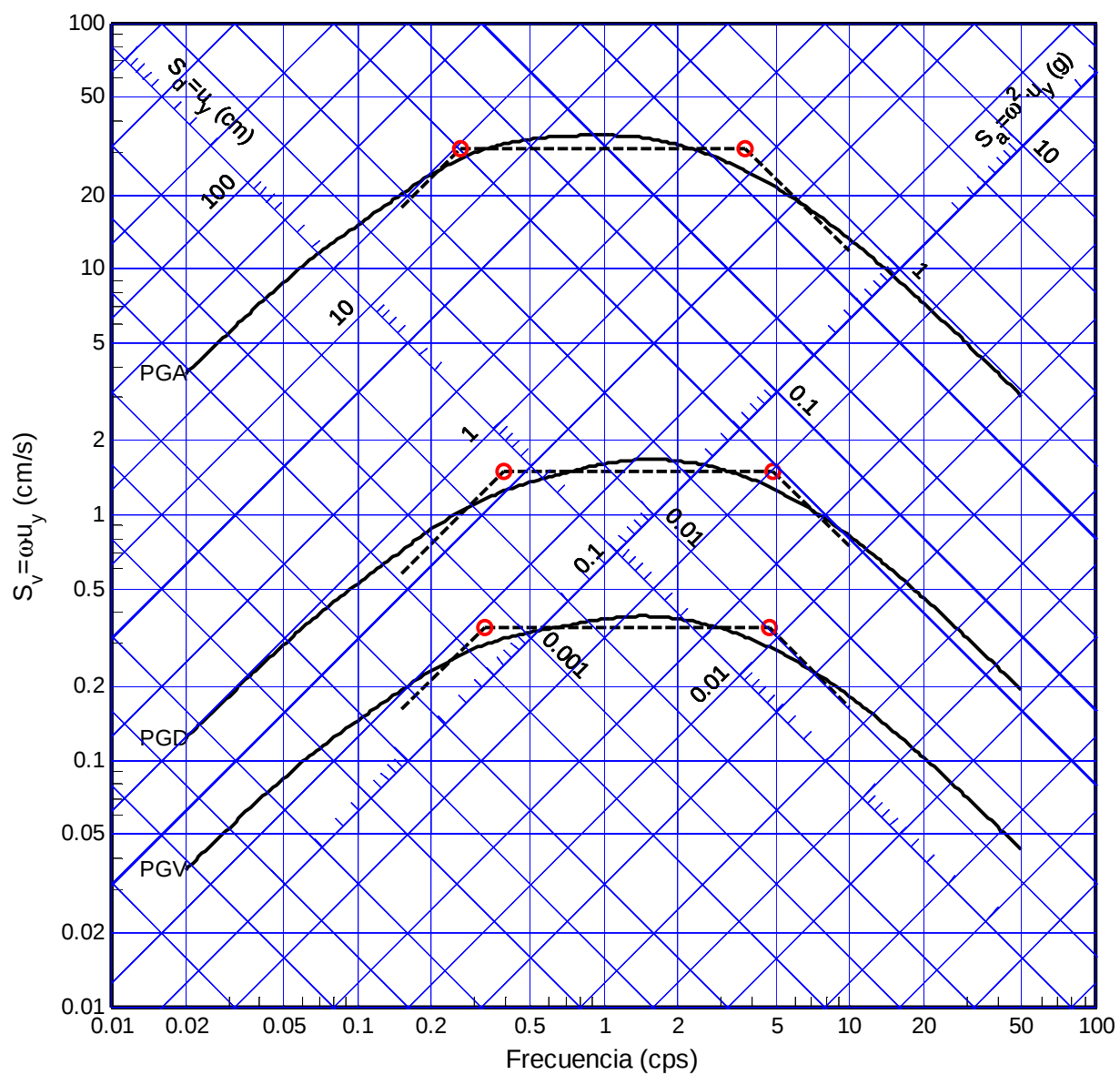


Figura B.79 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=100\%$

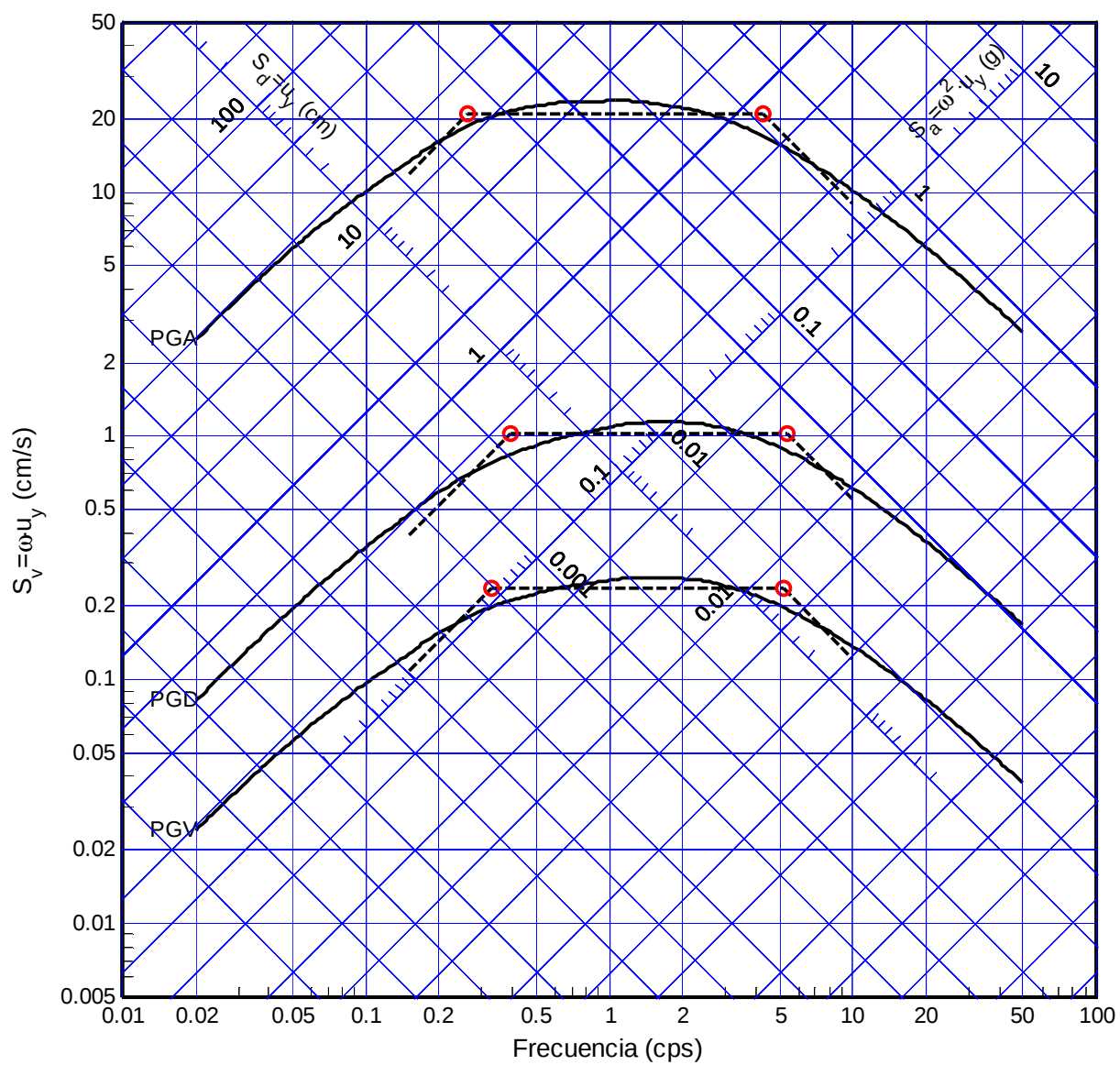


Figura B.80 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=100\%$

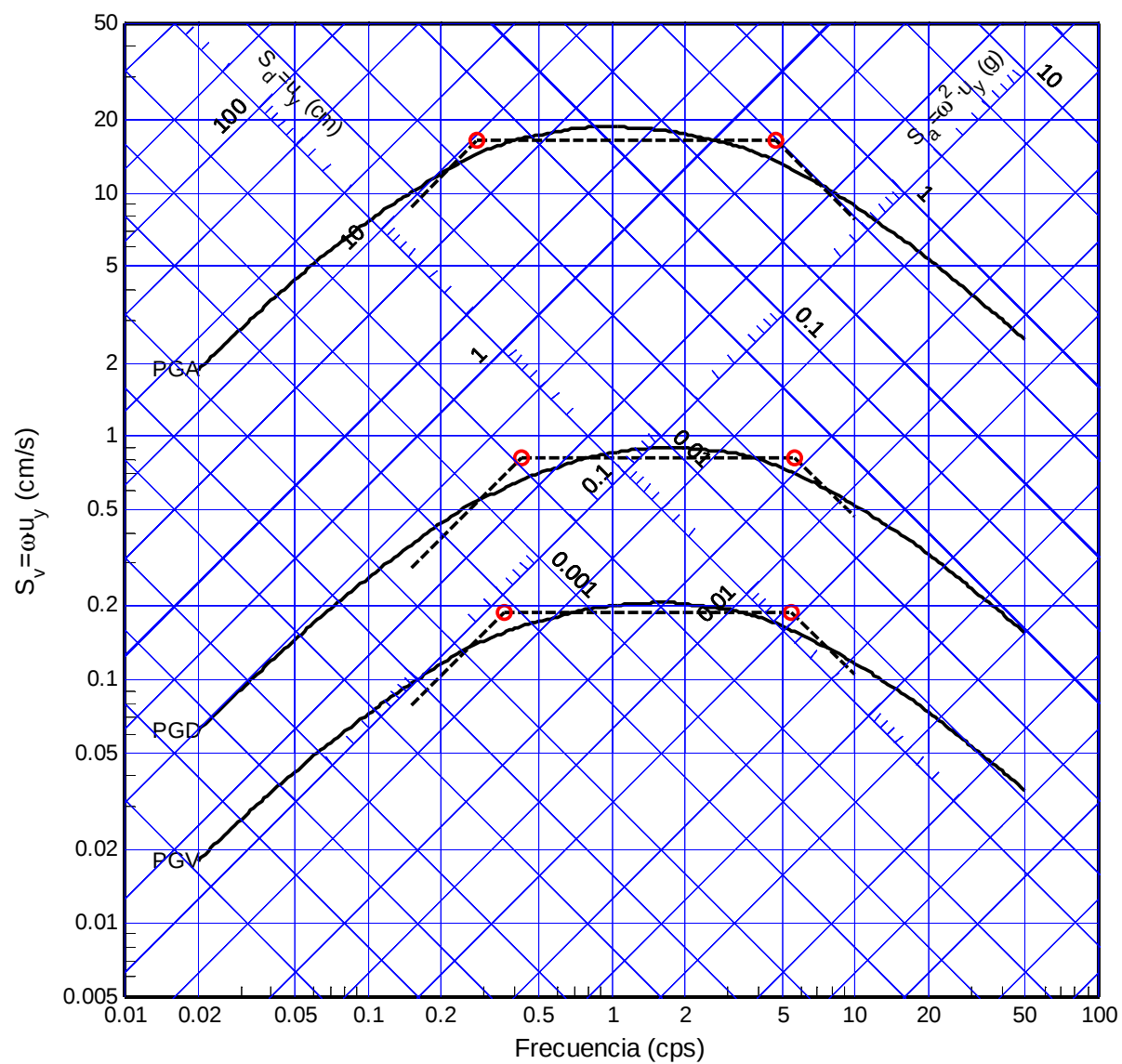


Figura B.81 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=100\%$

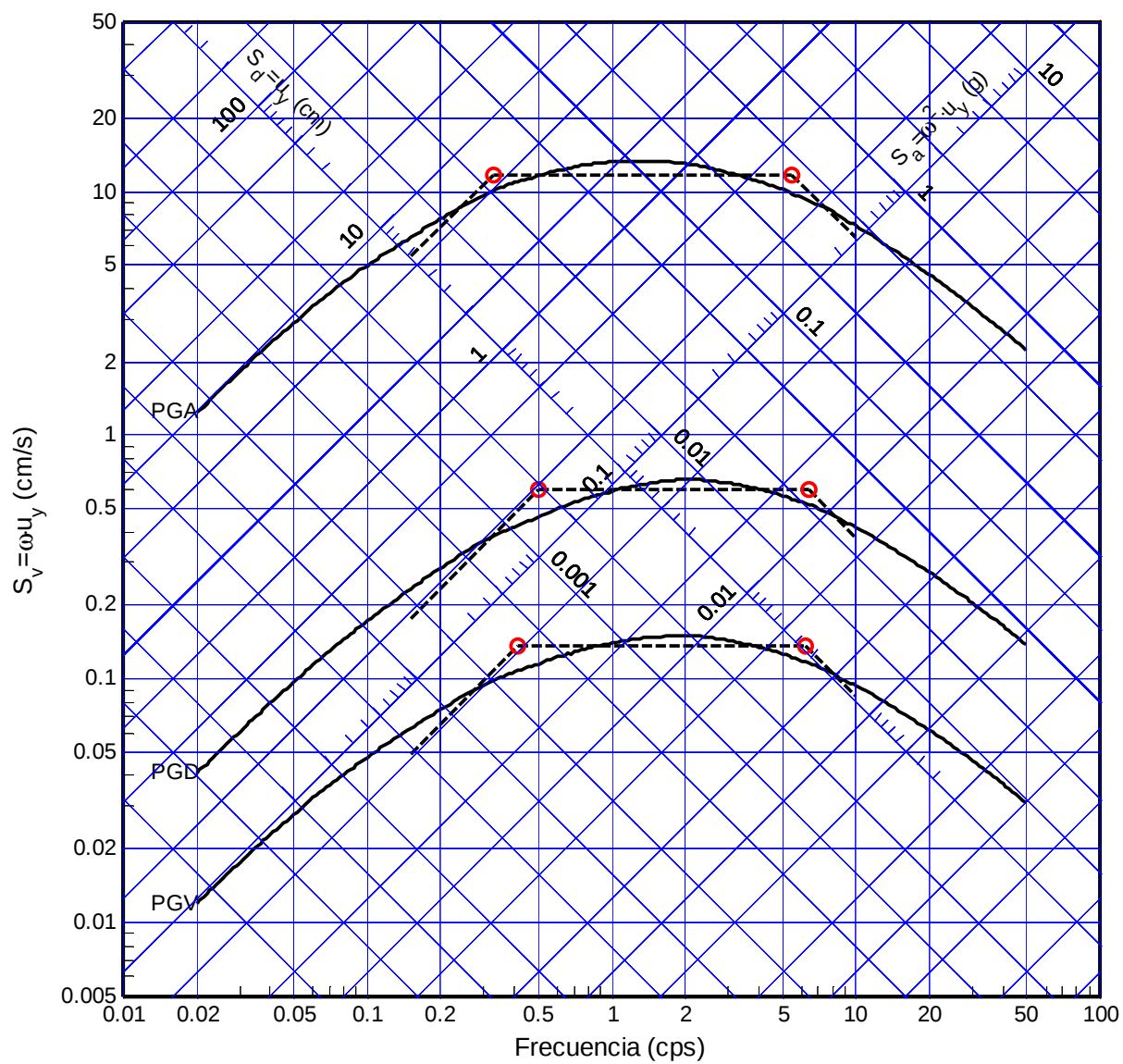


Figura B.82 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=100\%$

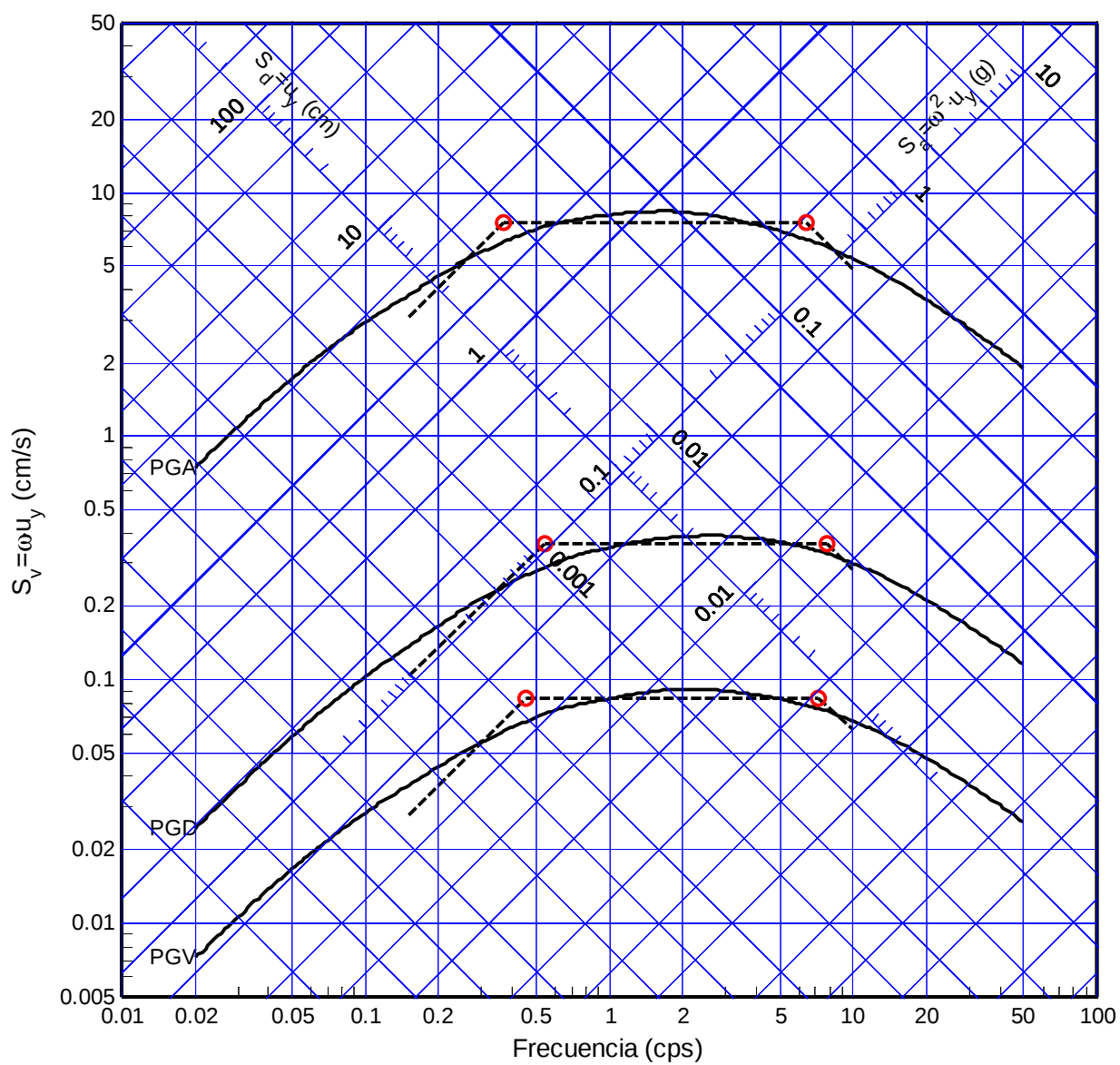


Figura B.83 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=100\%$

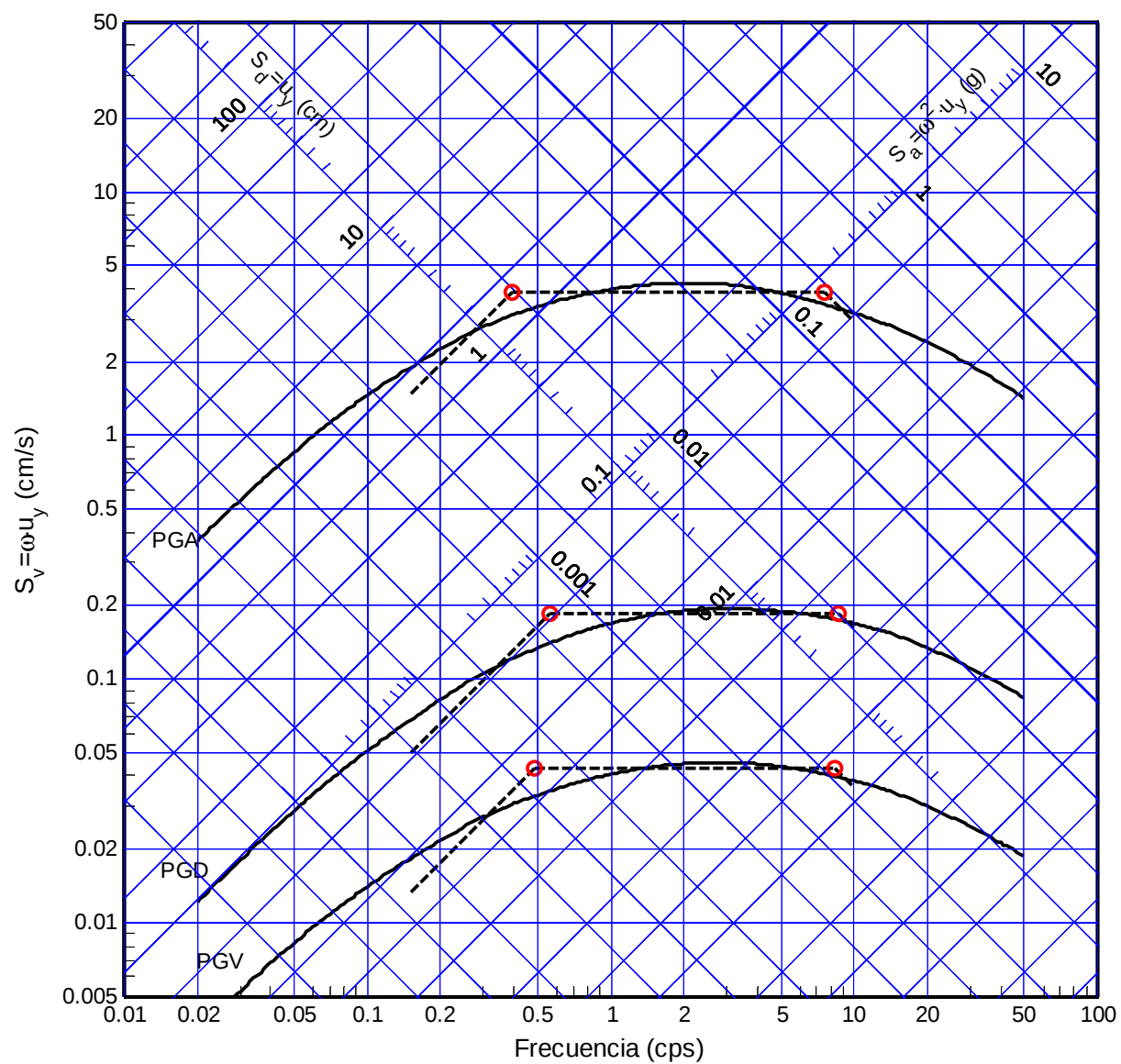


Figura B.84 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema bilineal. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=100\%$

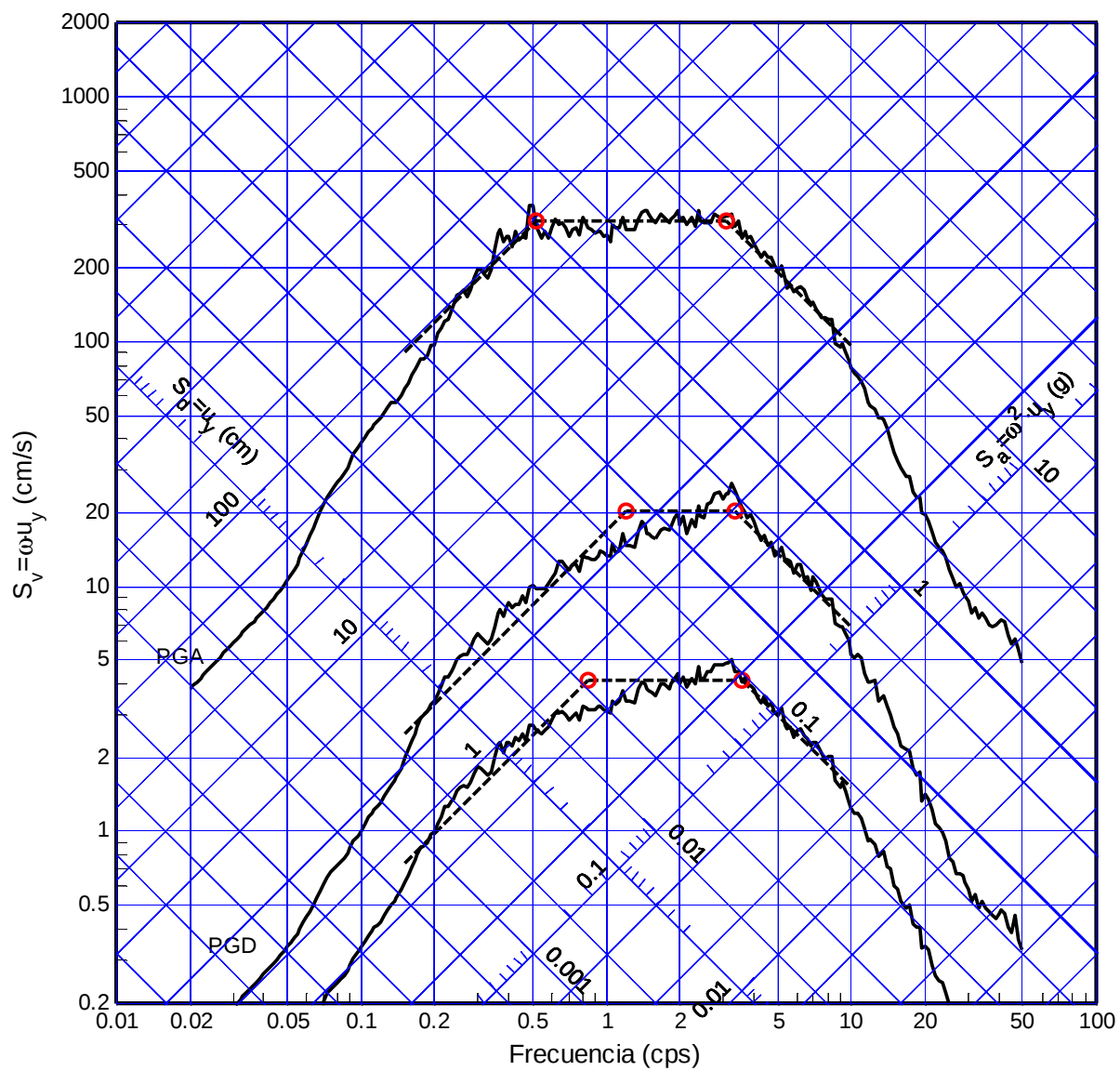


Figura B.85 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=0\%$

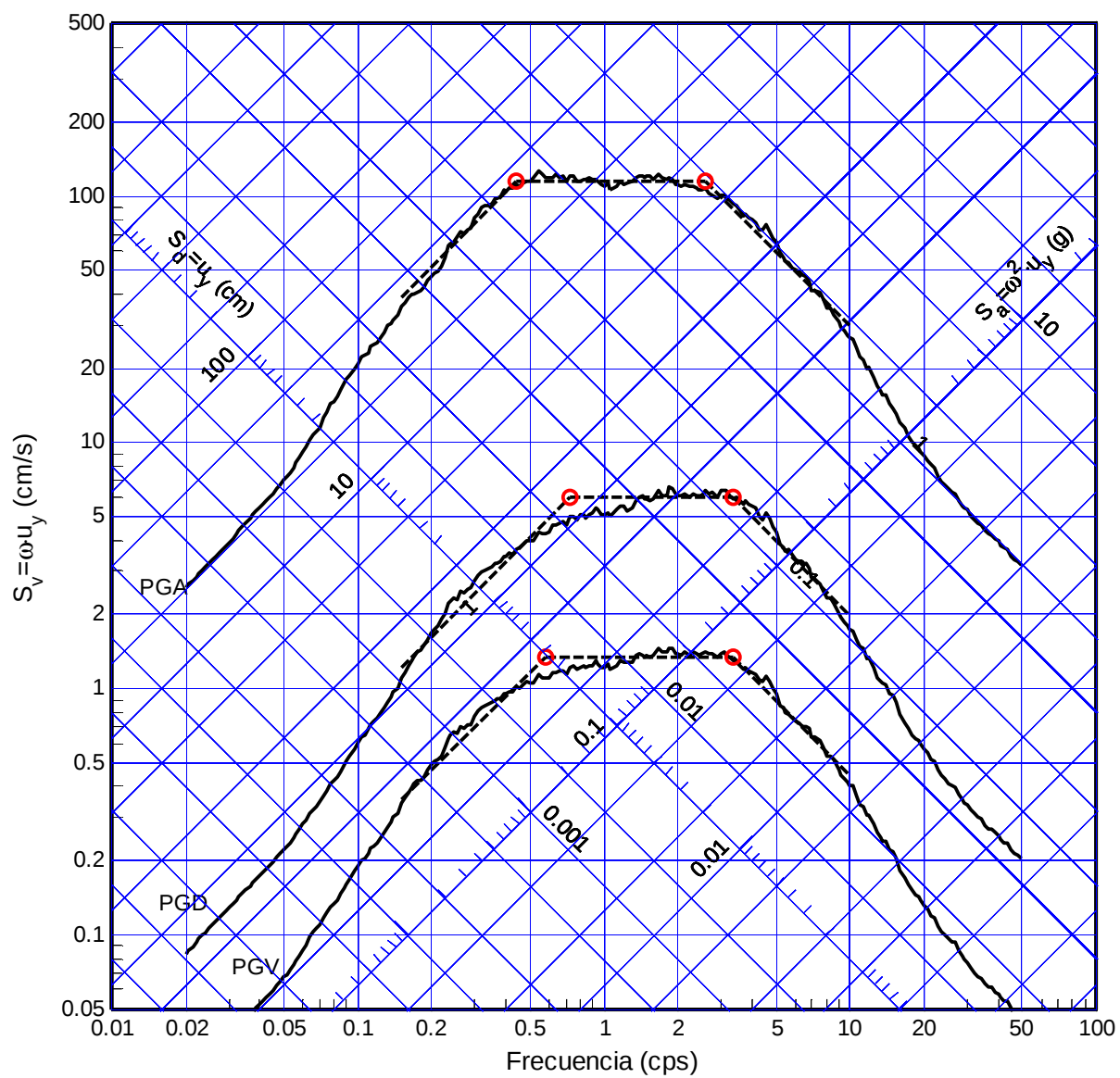


Figura B.86 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=0\%$

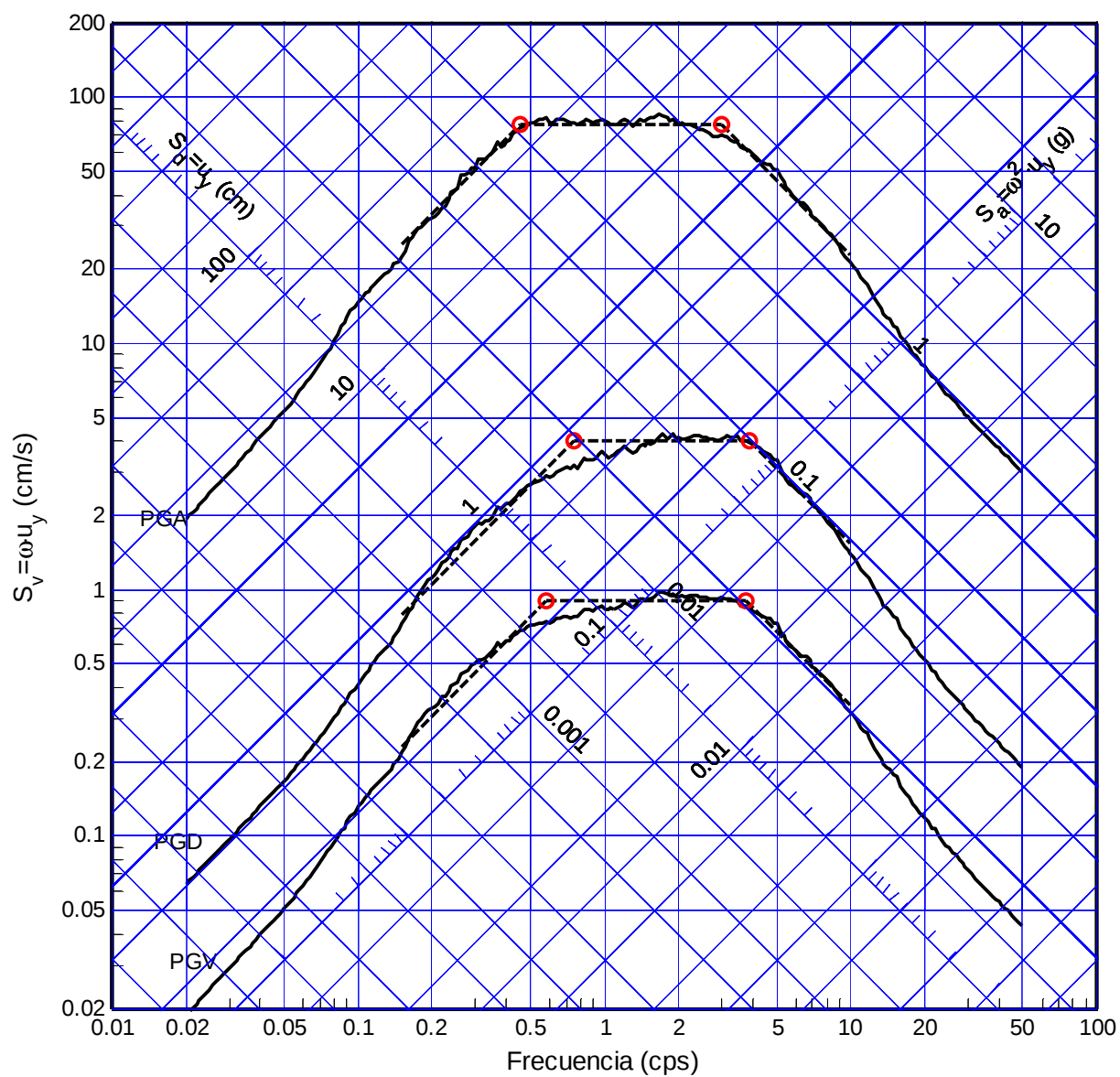


Figura B.87 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=0\%$

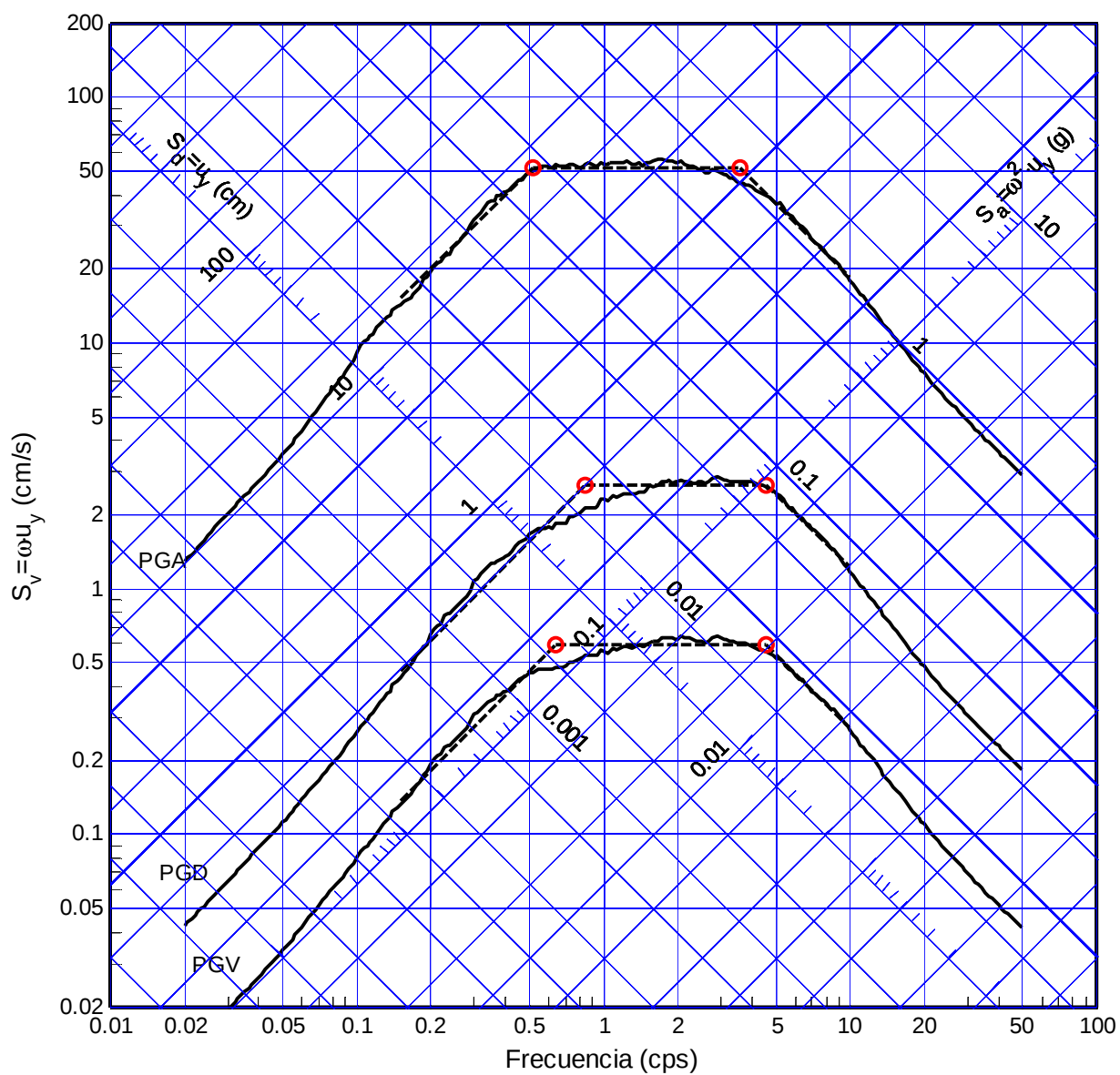


Figura B.88 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=0\%$

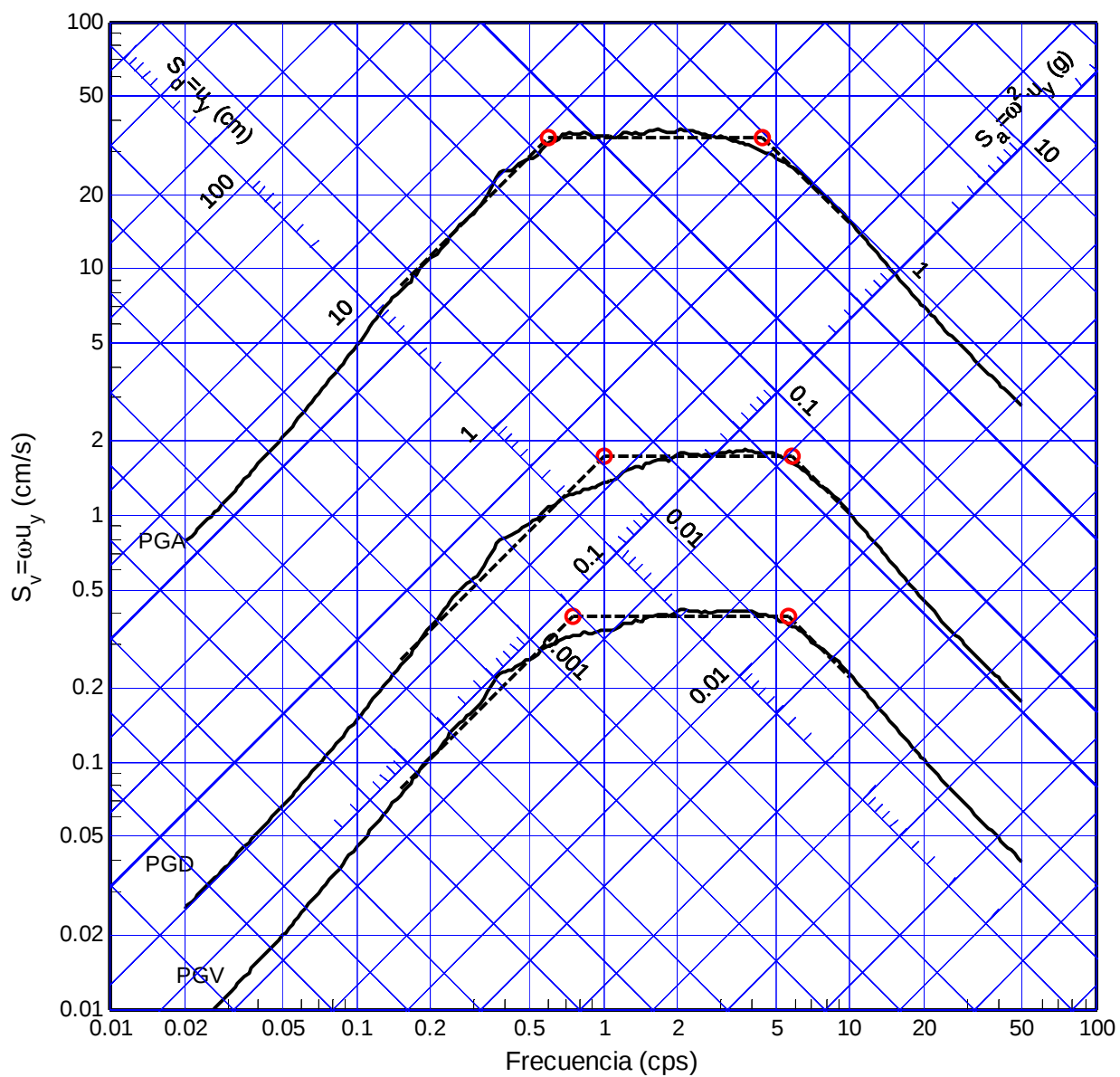


Figura B.89 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=0\%$

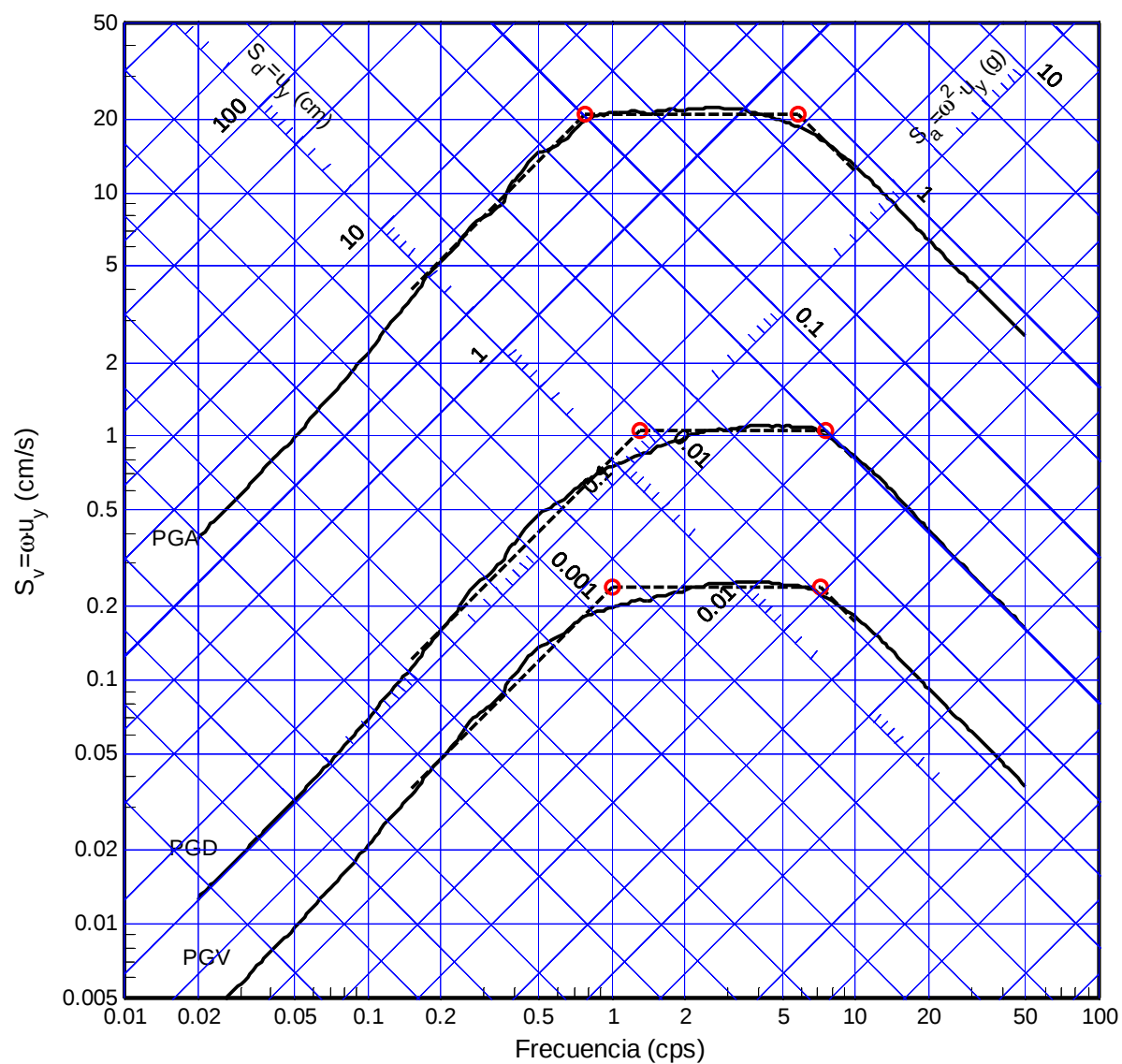


Figura B.90 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=0\%$

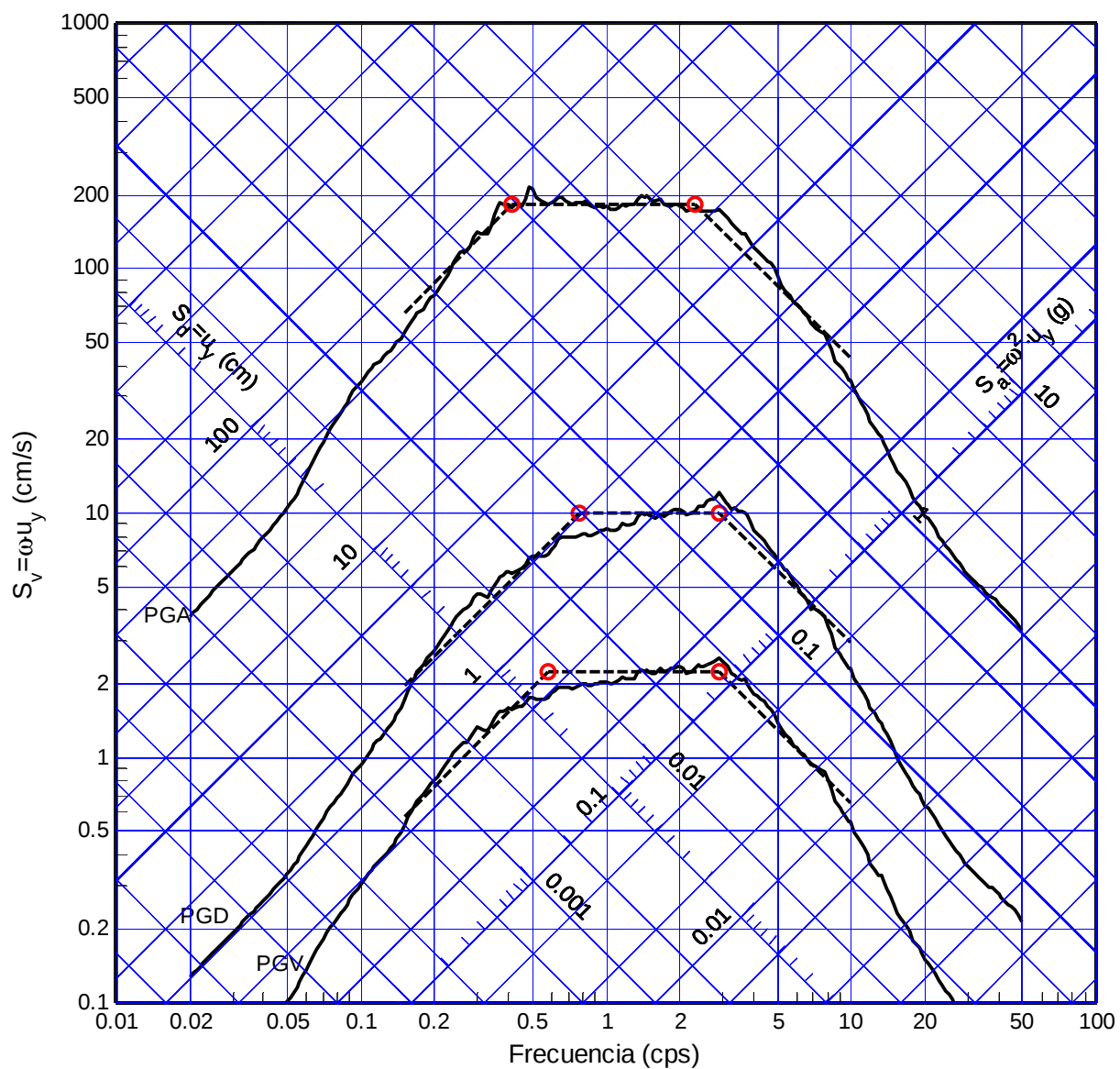


Figura B.91 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=2\%$

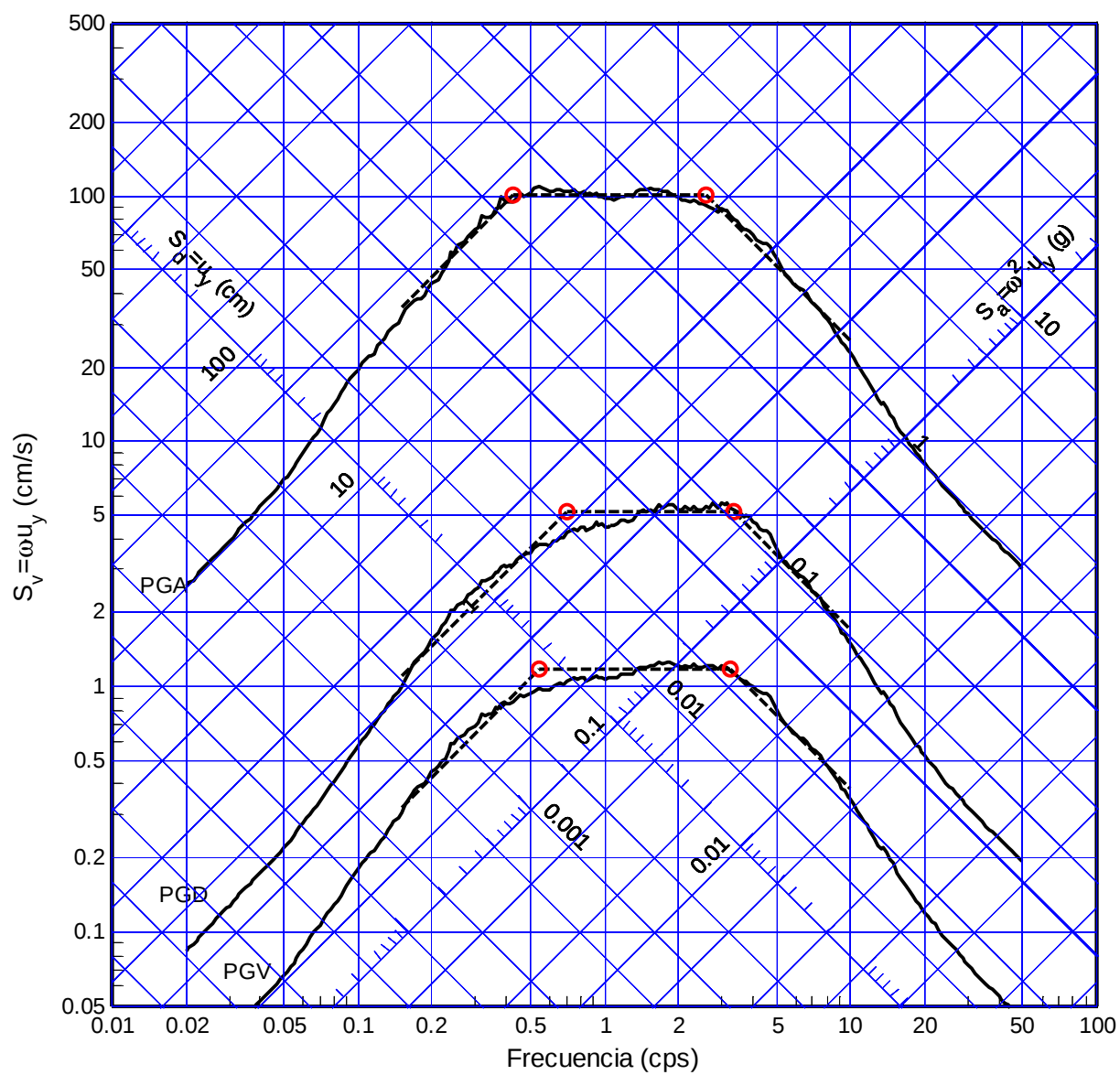


Figura B.92 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=2\%$

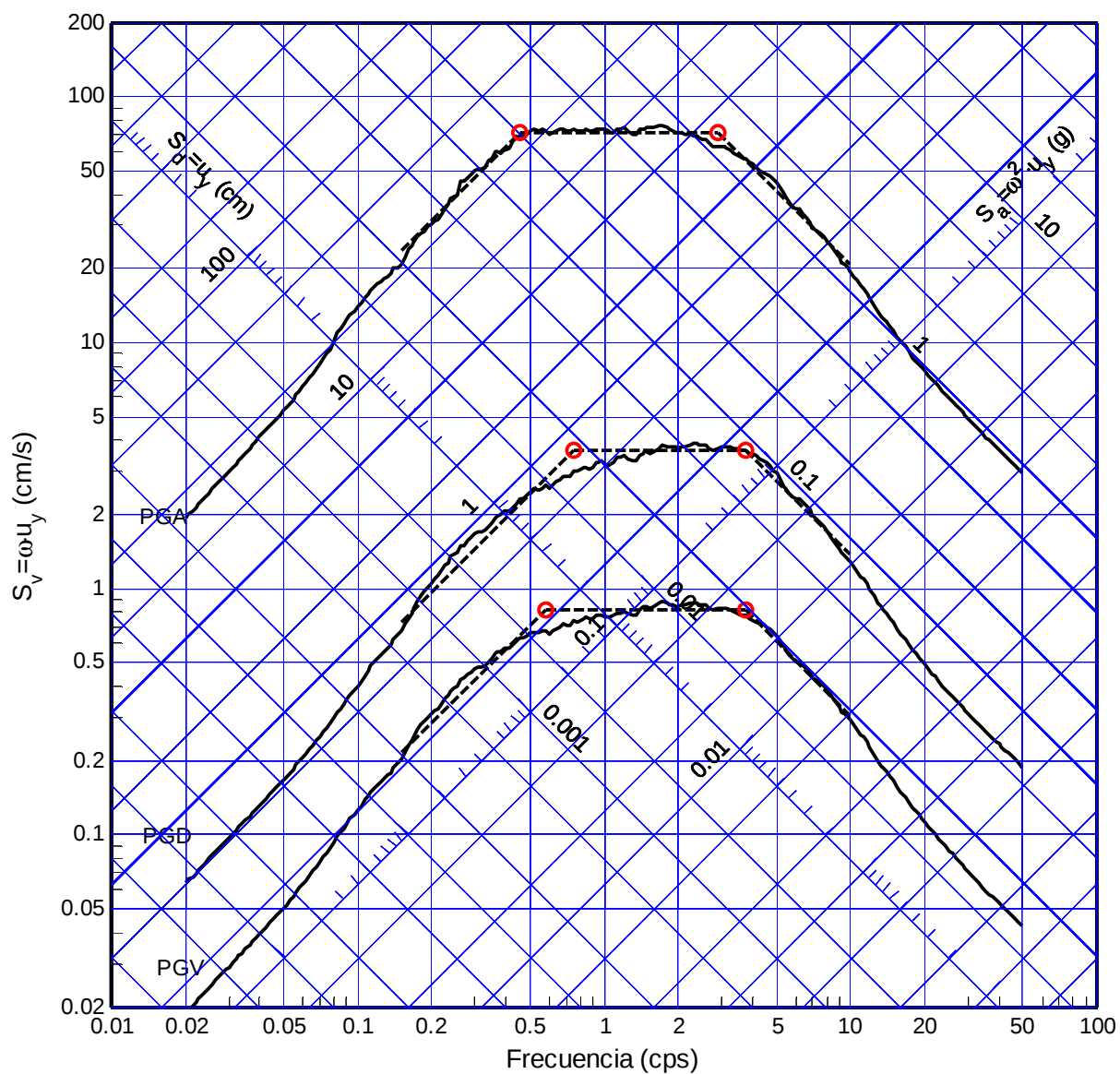


Figura B.93 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=2\%$

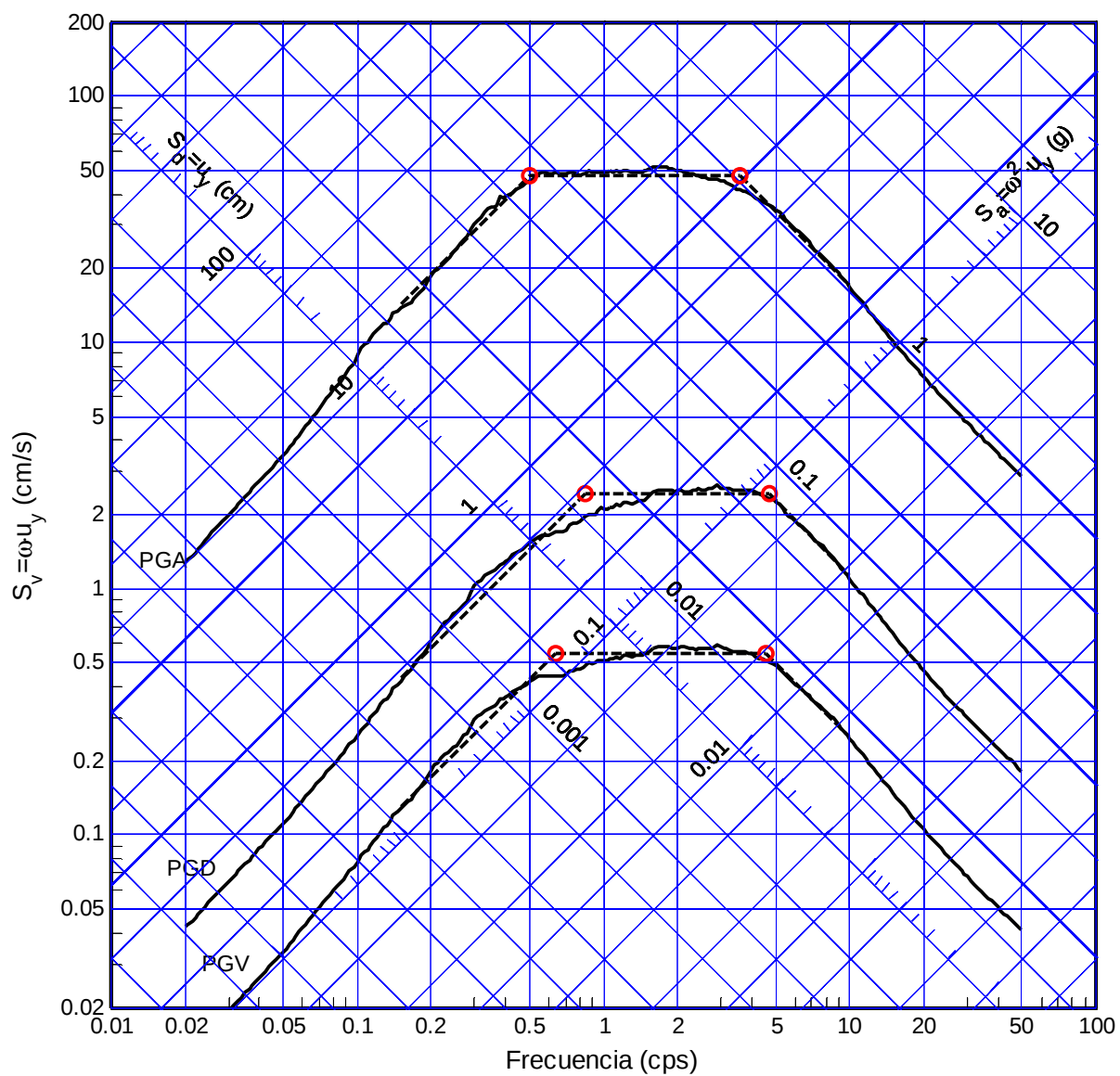


Figura B.94 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=2\%$

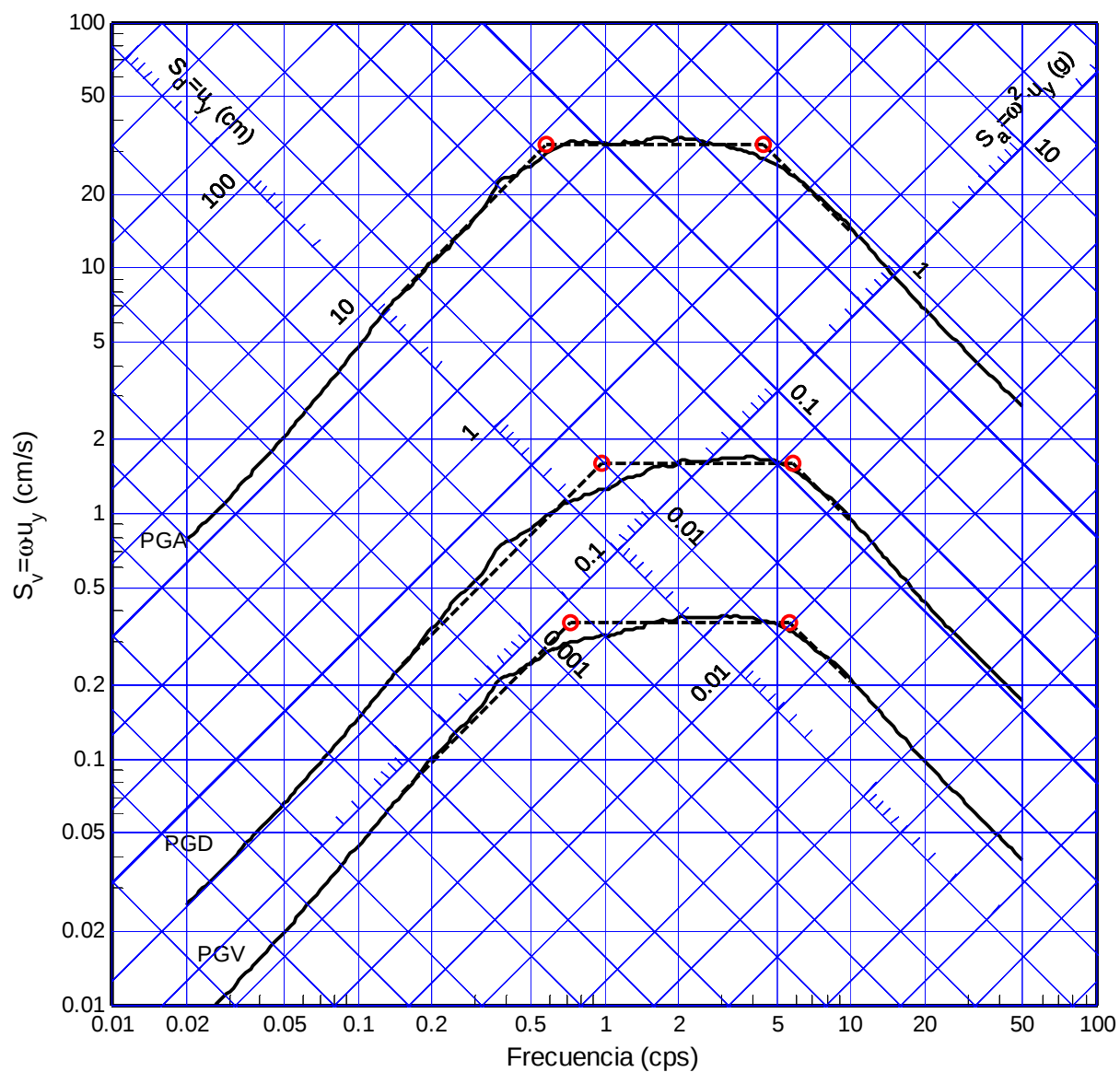


Figura B.95 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=2\%$

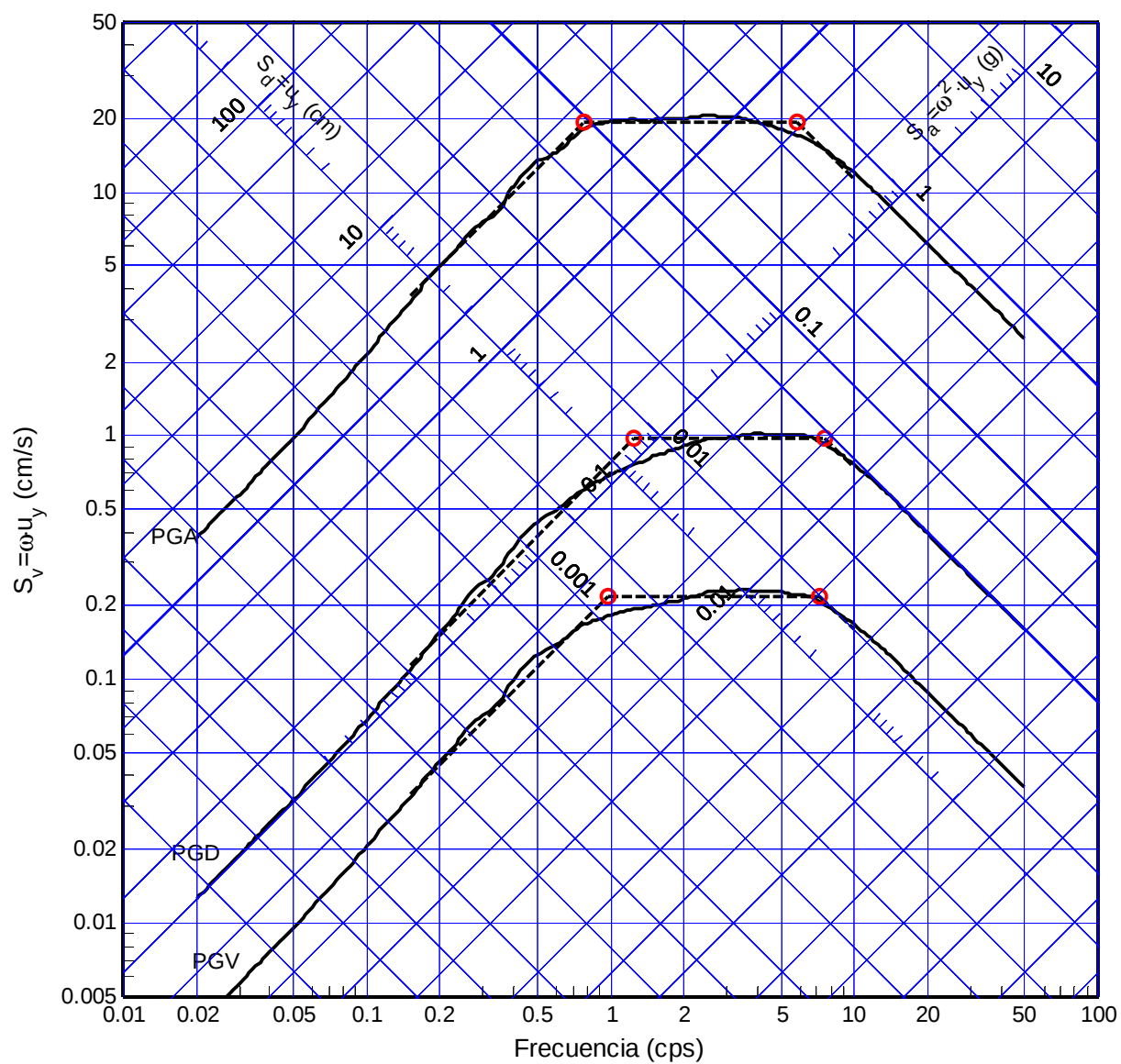


Figura B.96 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=2\%$

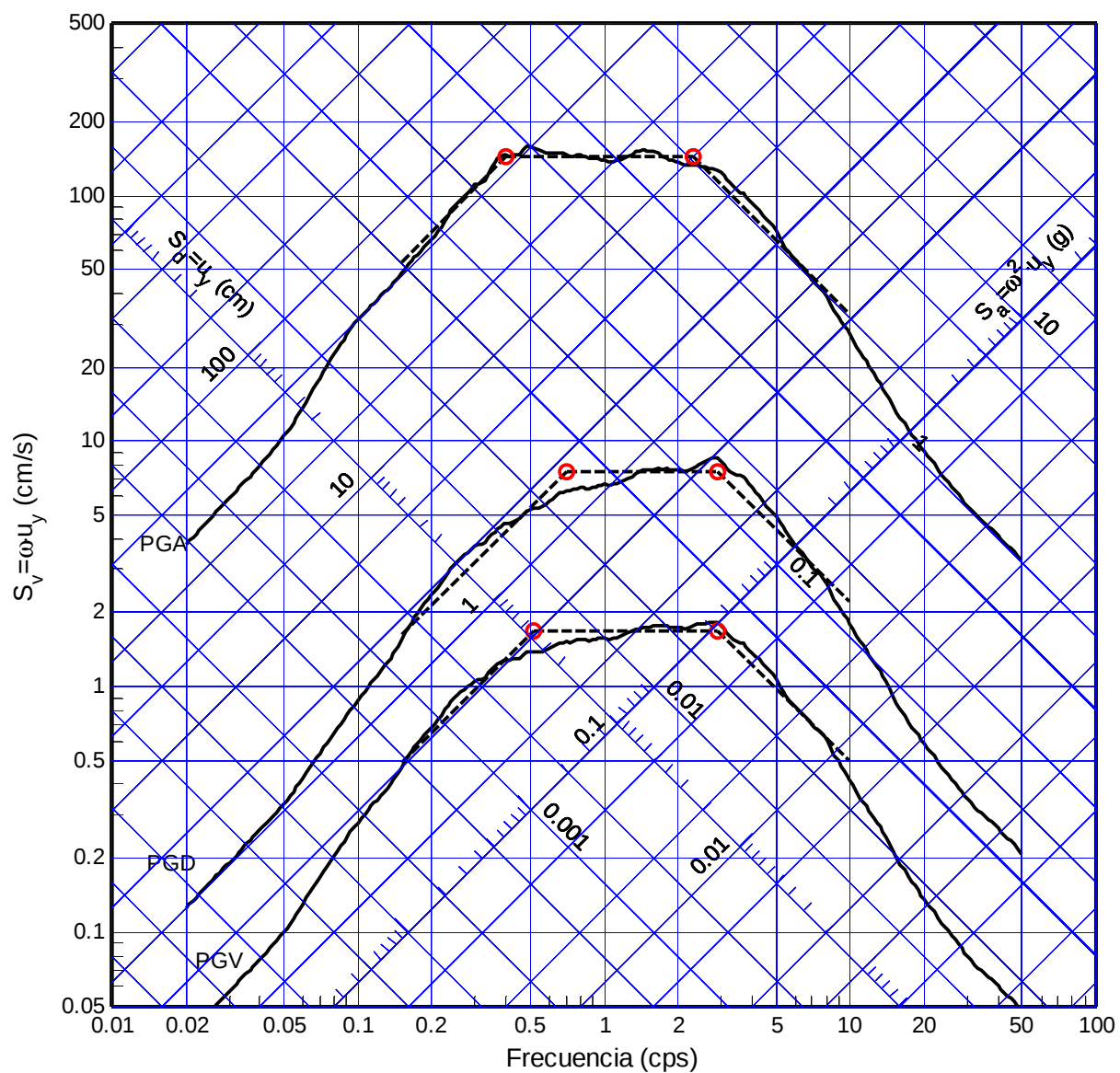


Figura B.97 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=5\%$

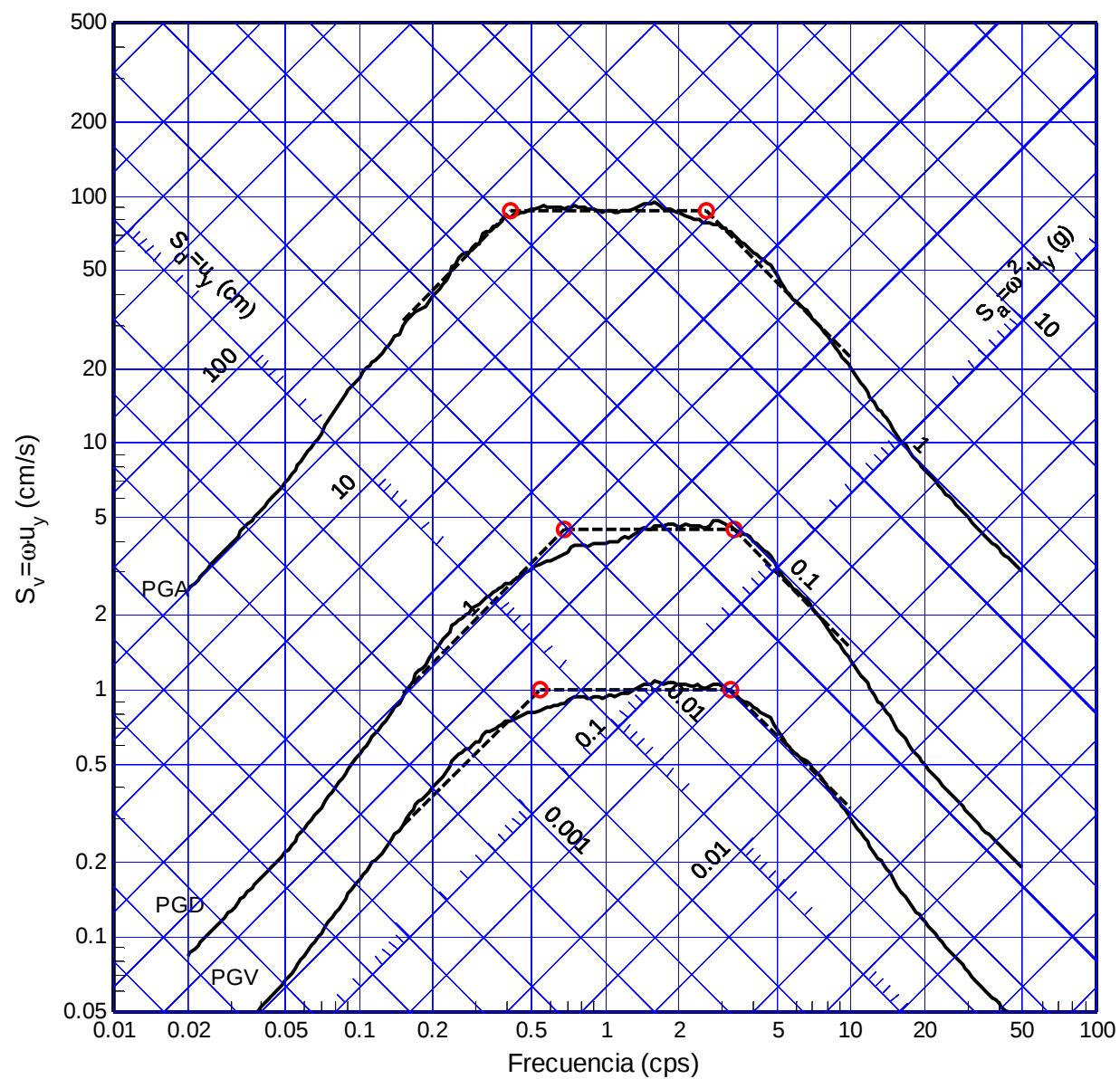


Figura B.98 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=5\%$

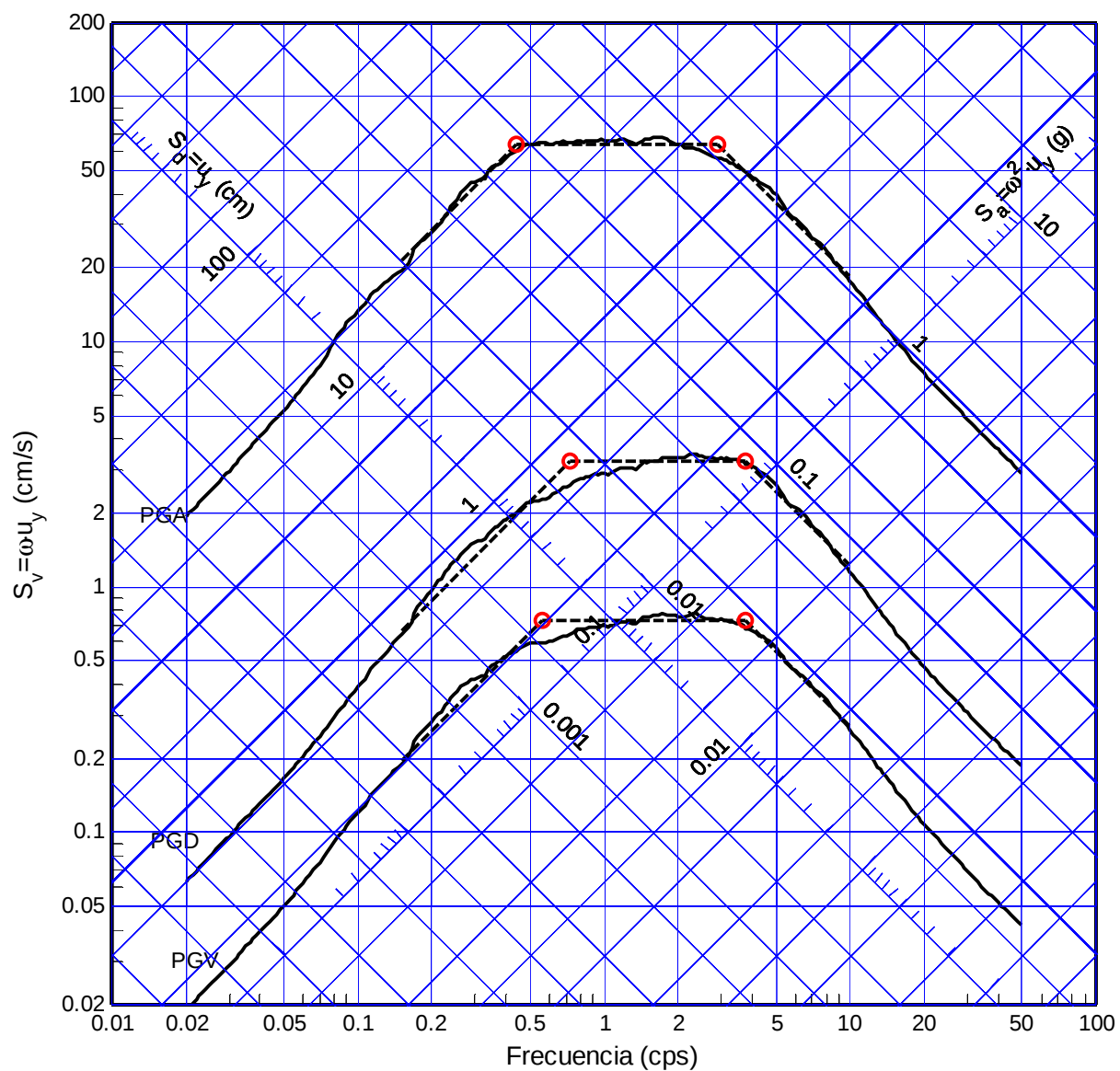


Figura B.99 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=5\%$

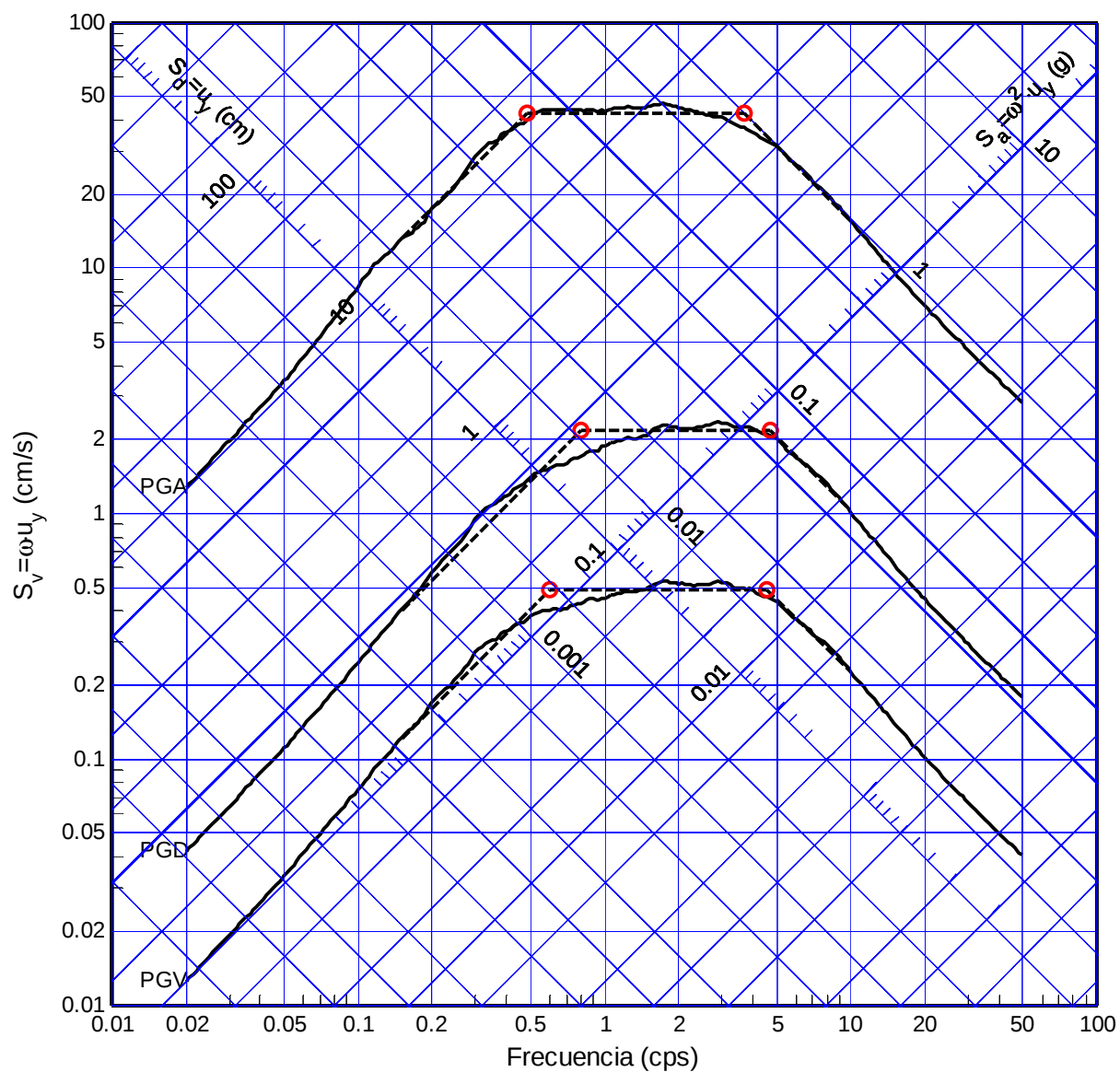


Figura B.100 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=5\%$

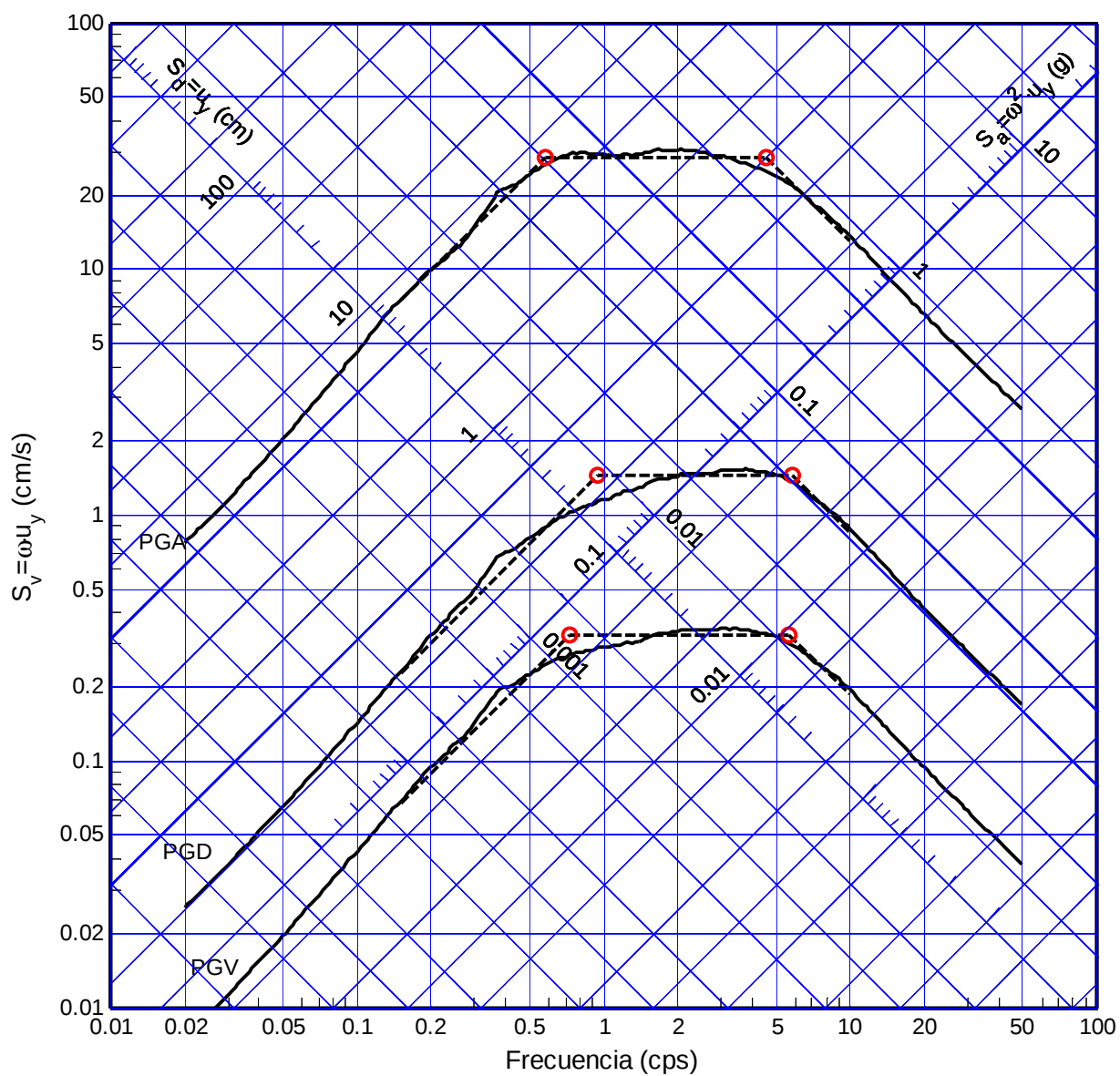


Figura B.101 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=5\%$

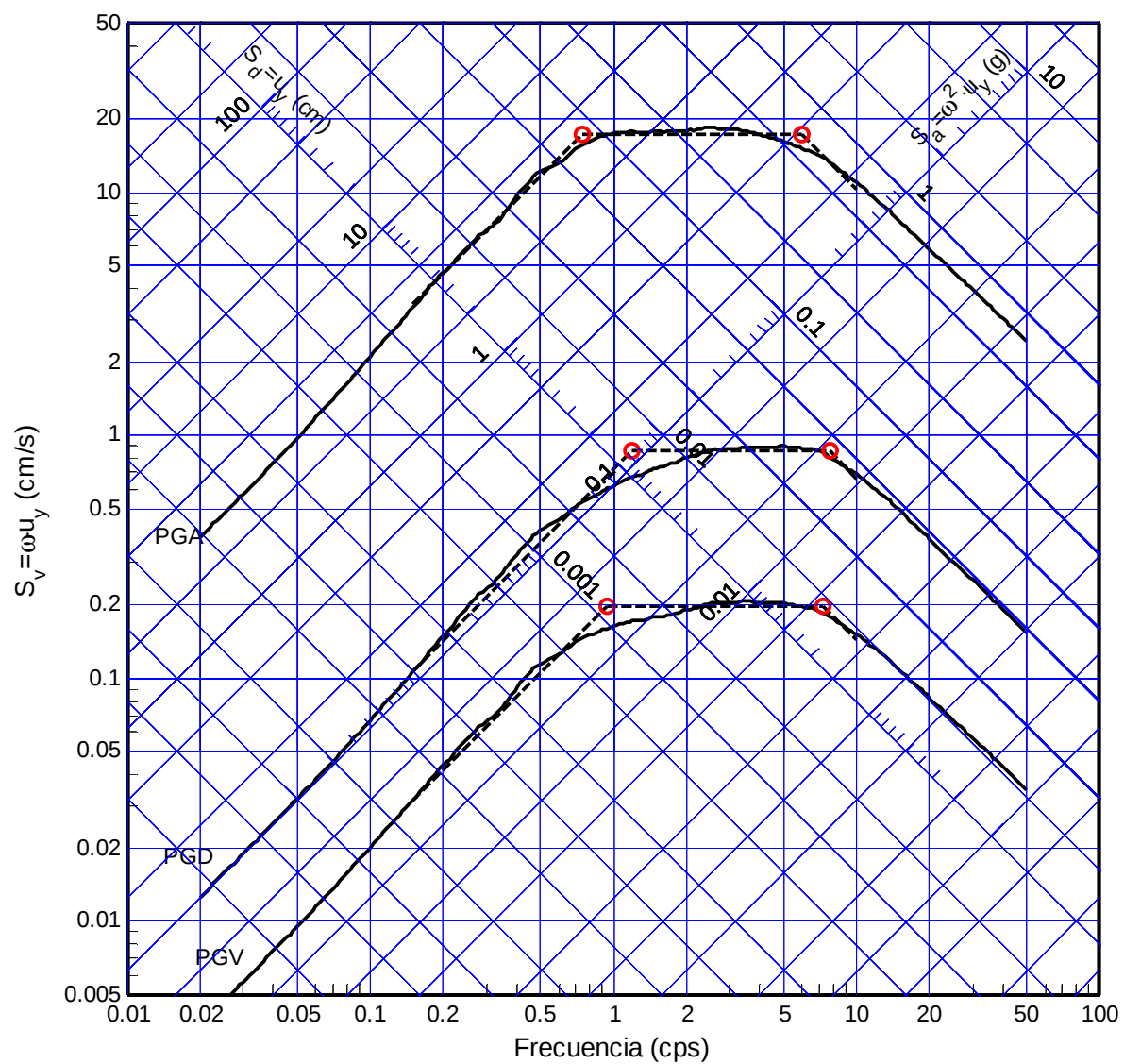


Figura B.102 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=5\%$

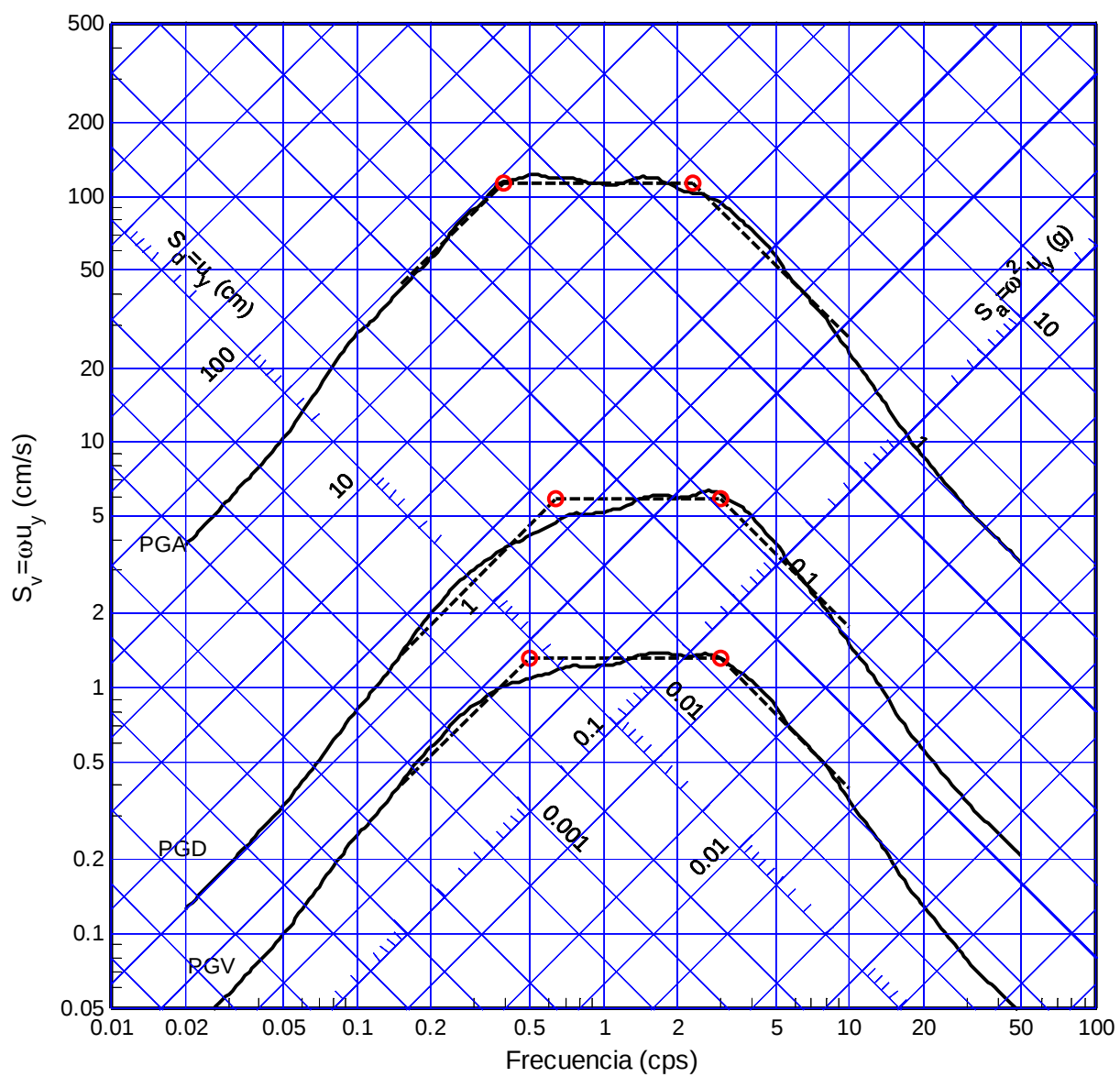


Figura B.103 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=10\%$

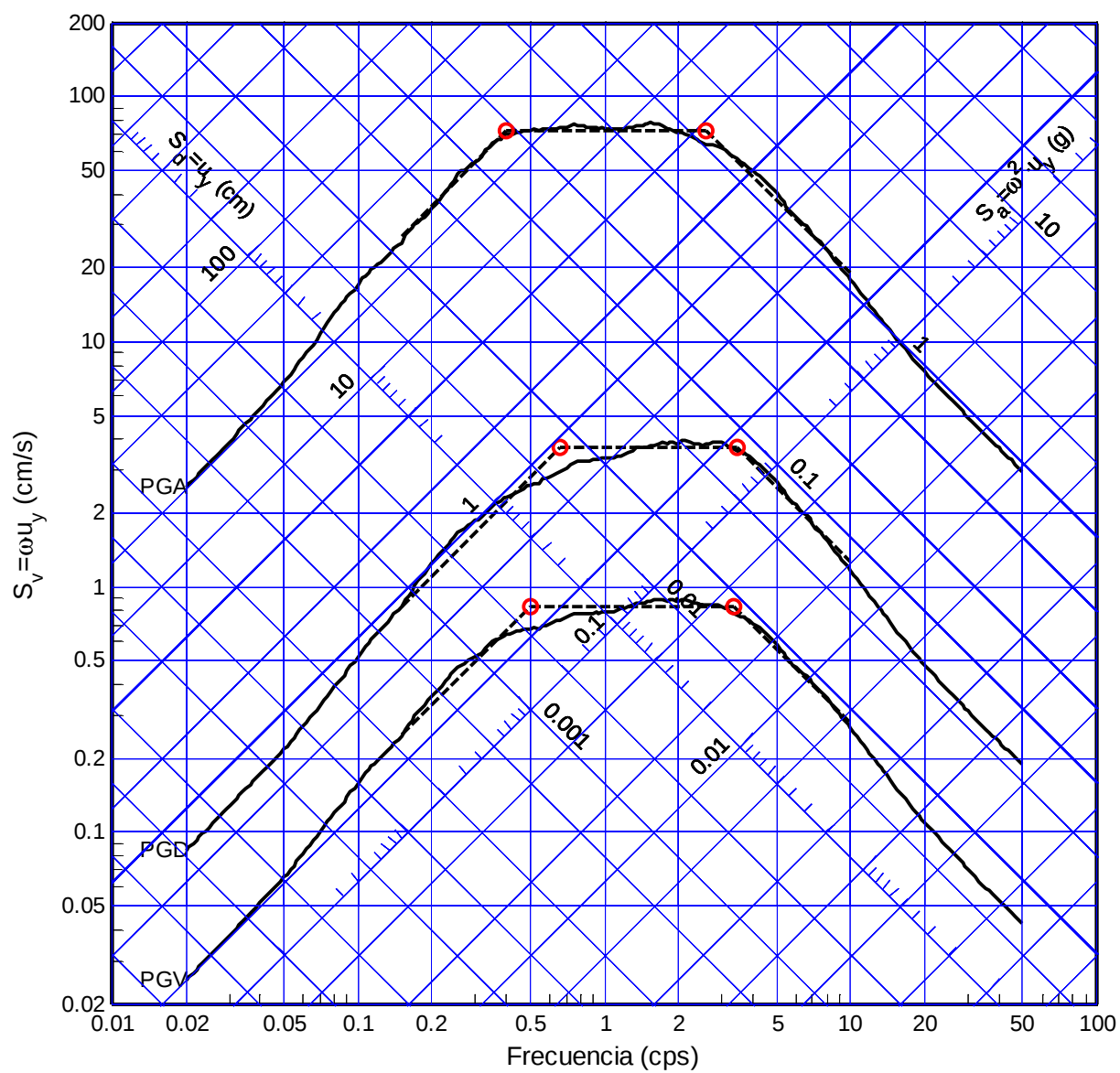


Figura B.104 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=10\%$

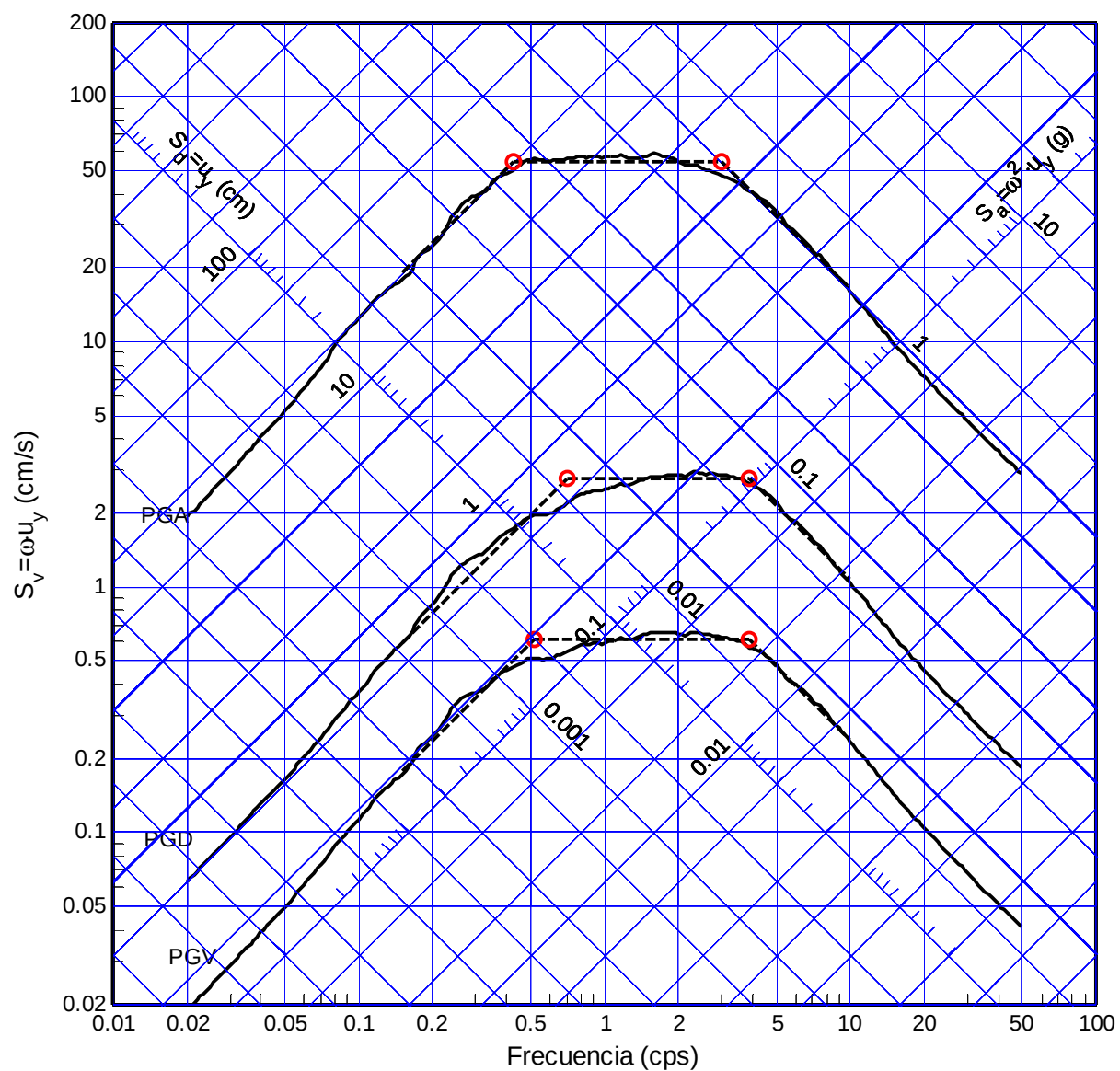


Figura B.105 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=10\%$

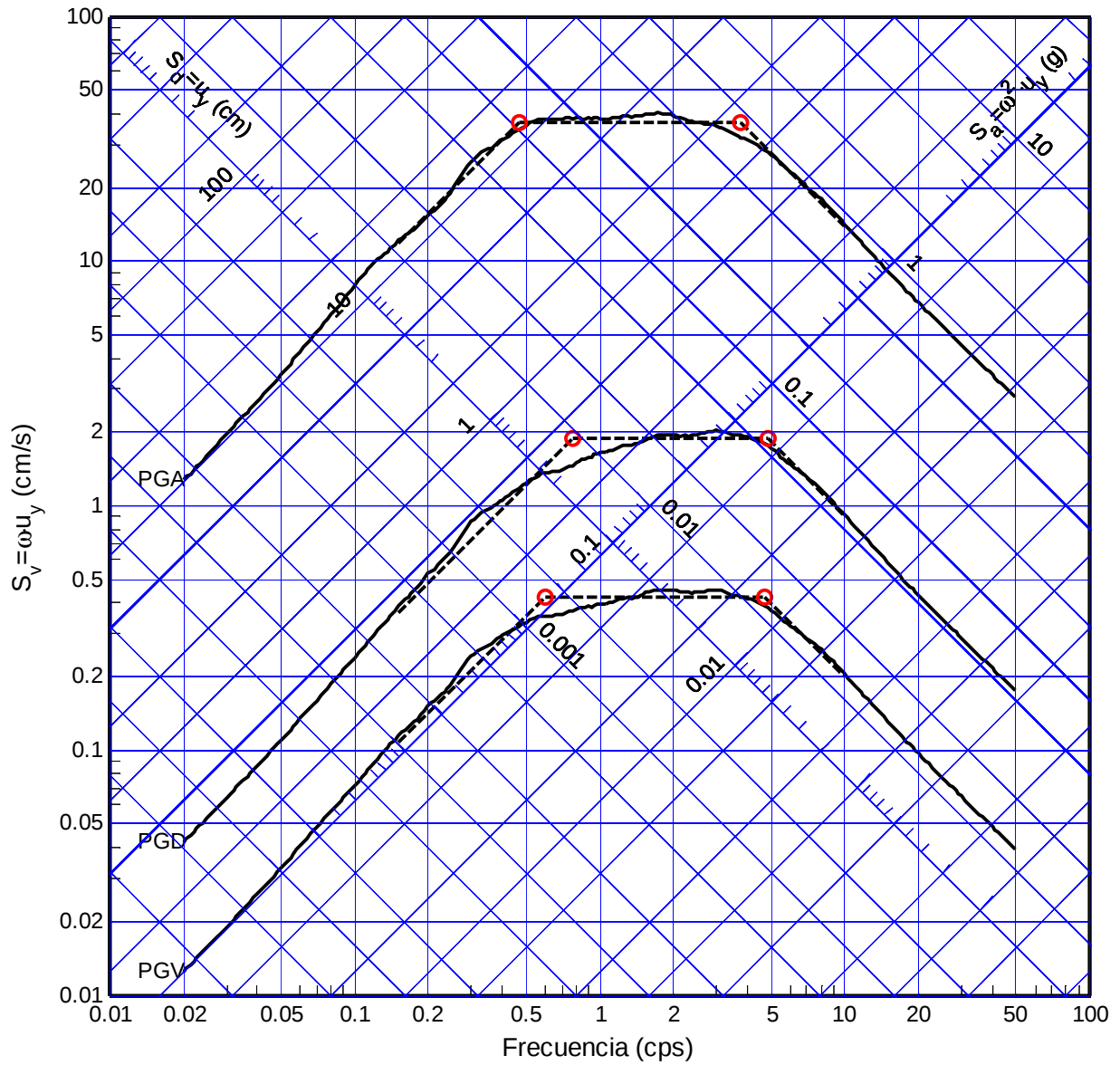


Figura B.106 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=10\%$

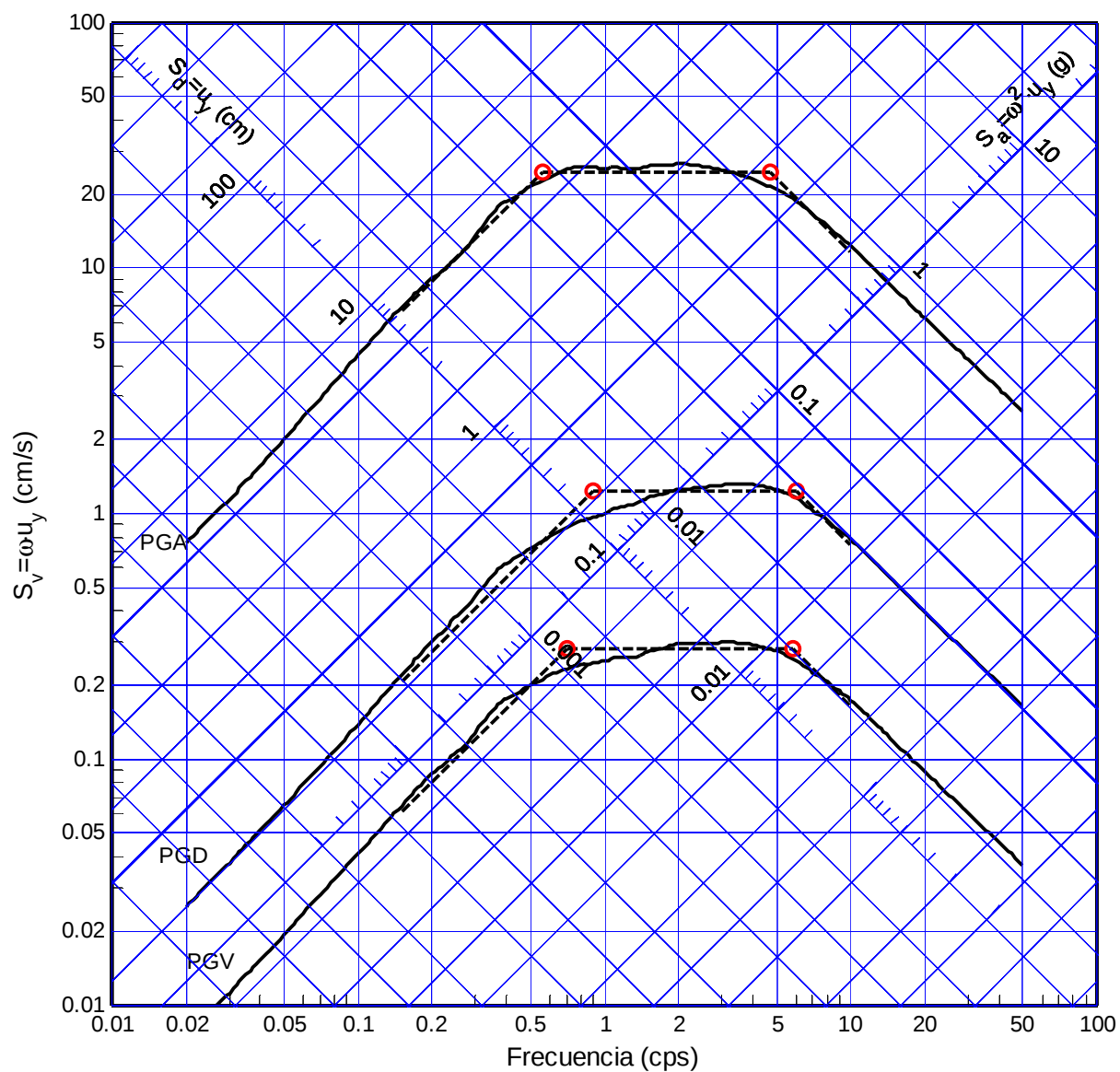


Figura B.107 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=10\%$

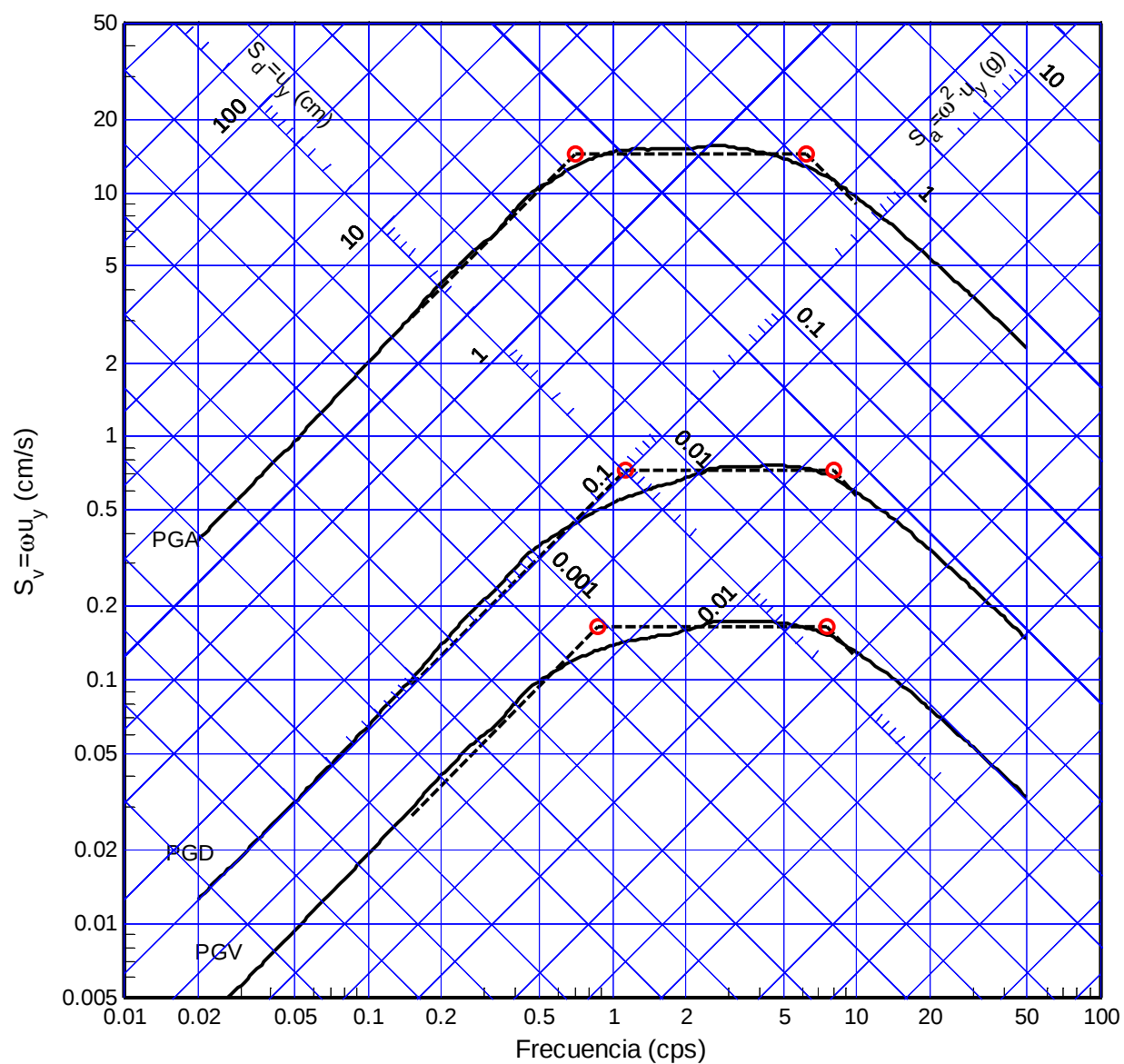


Figura B.108 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=10\%$

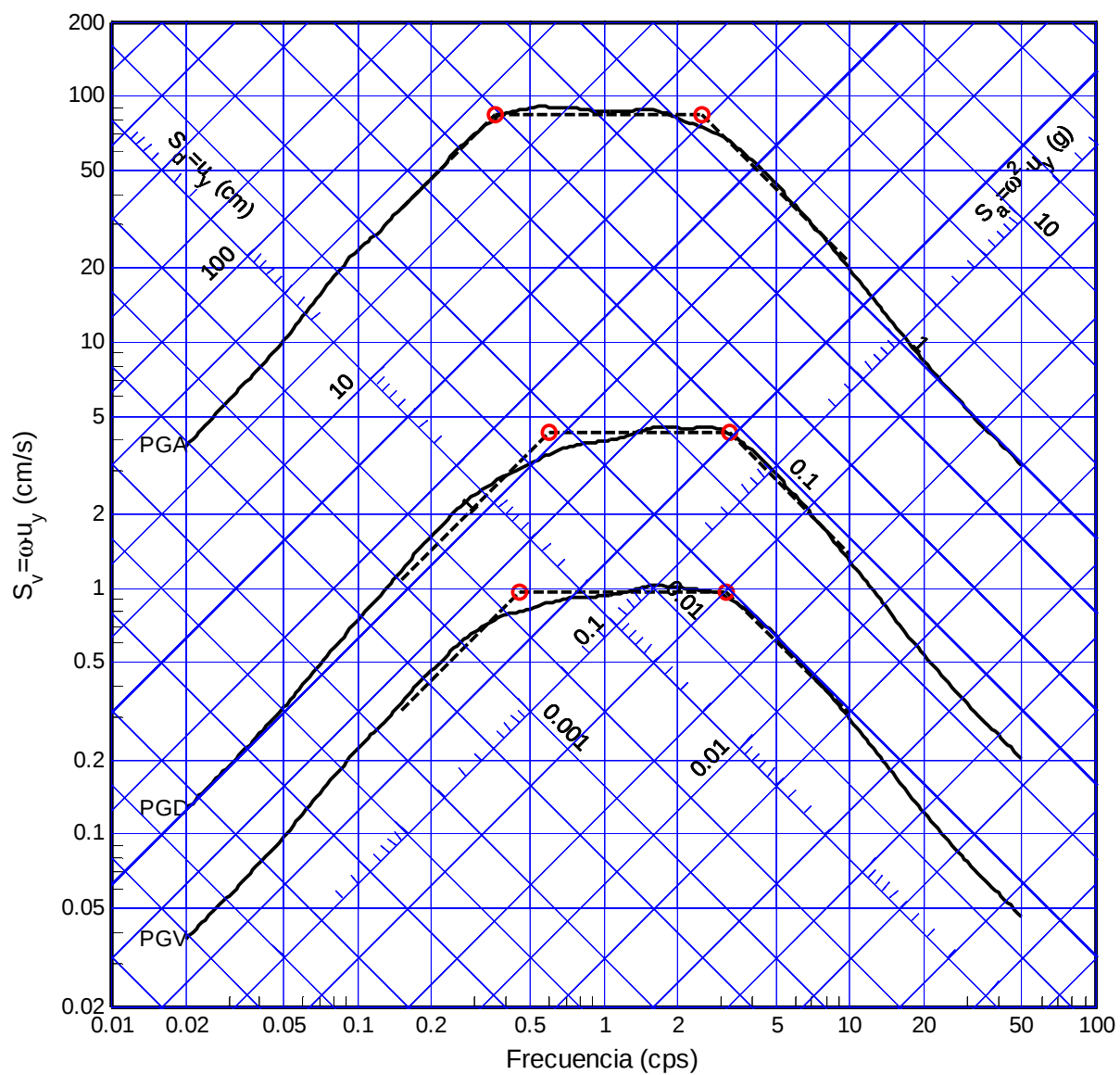


Figura B.109 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=20\%$

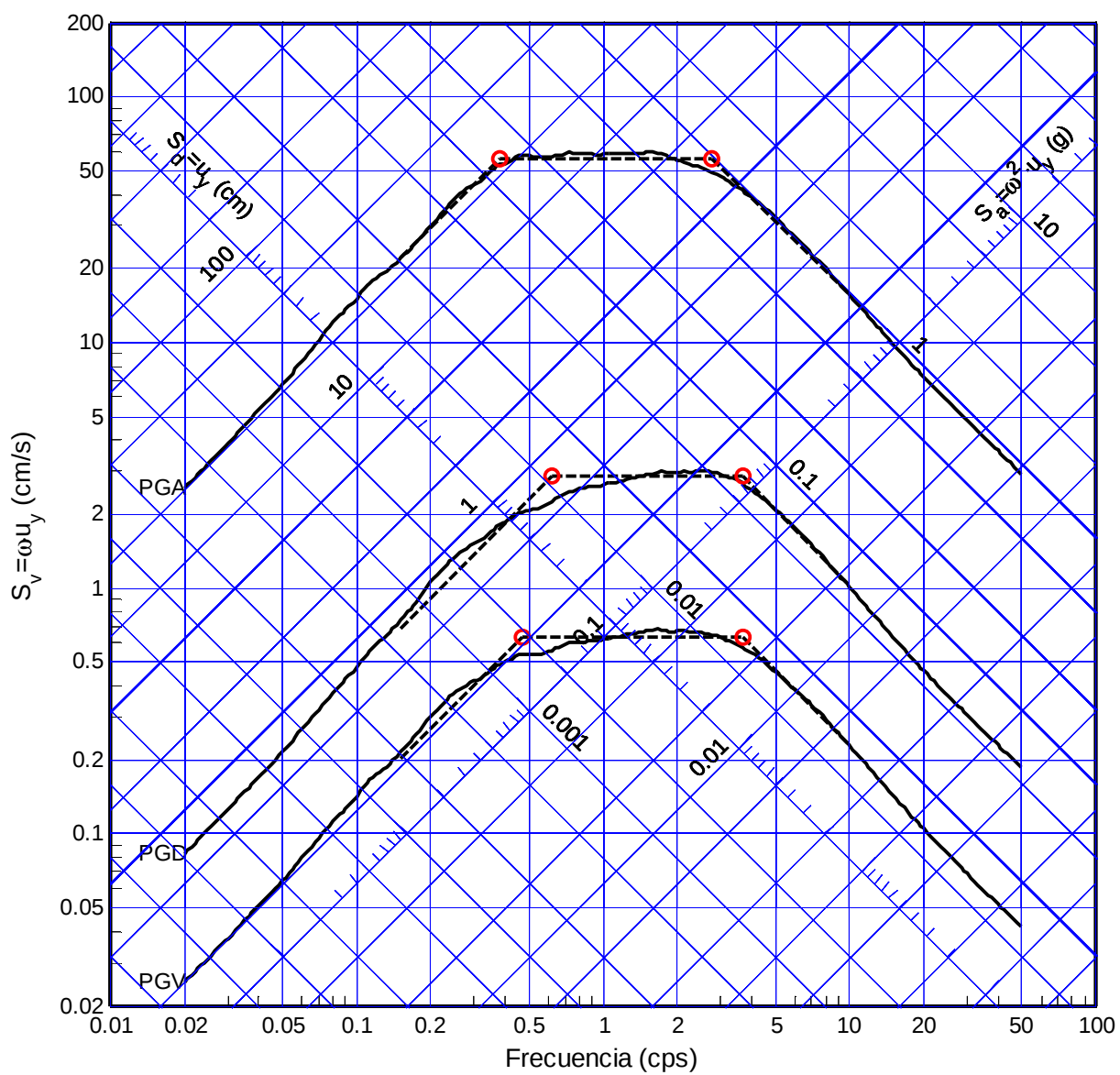


Figura B.110 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=20\%$

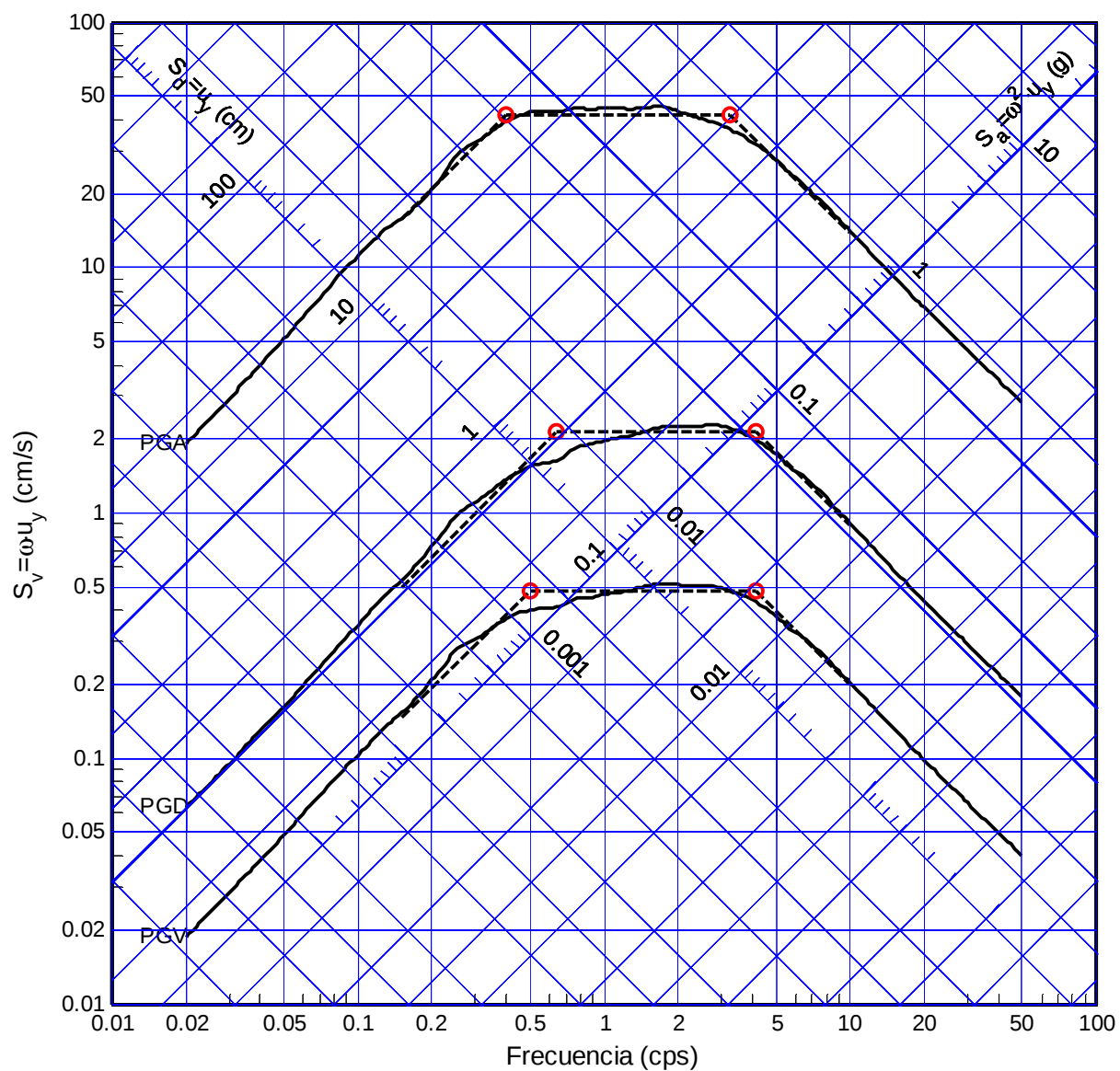


Figura B.111 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=20\%$

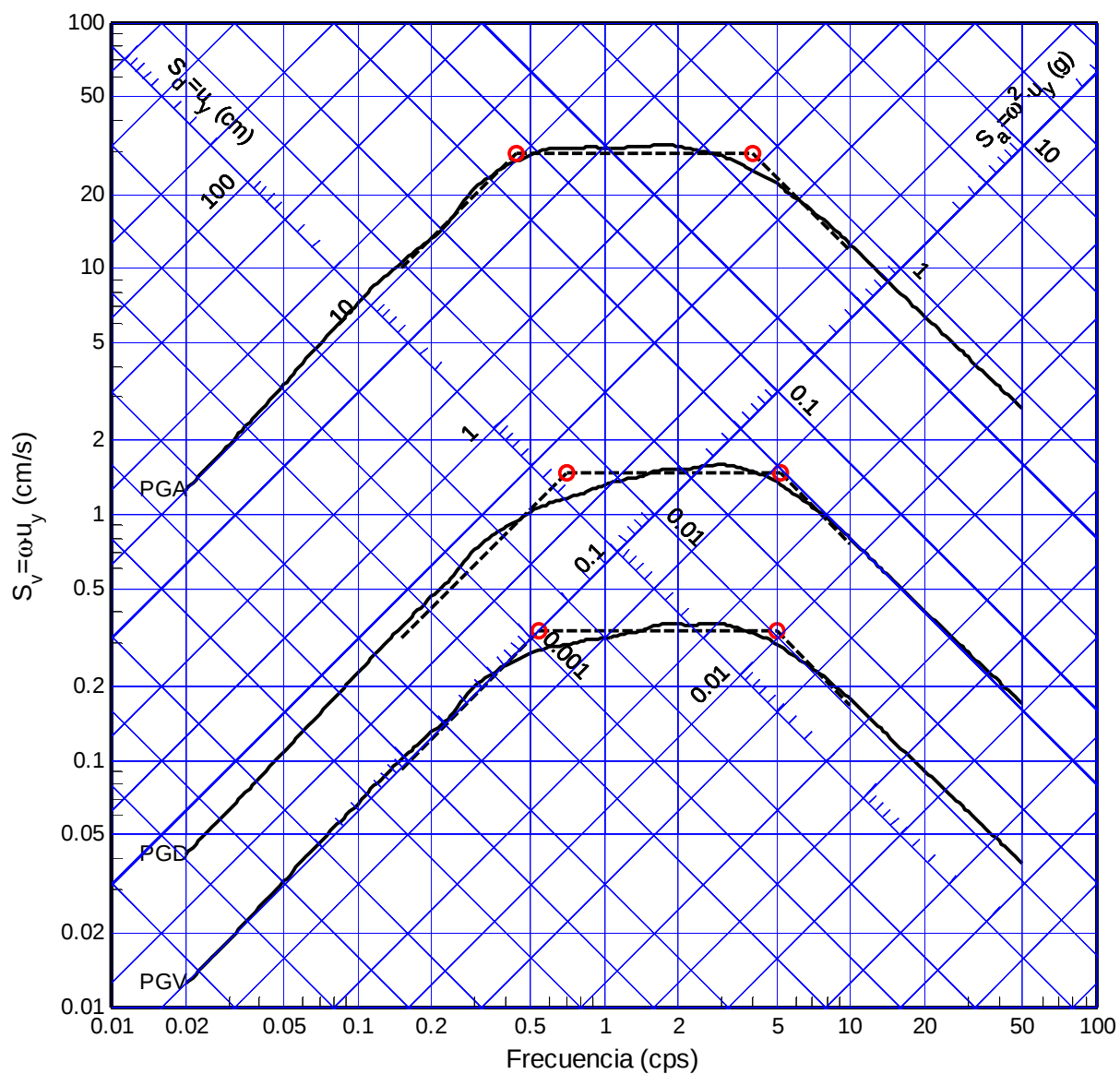


Figura B.112 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=20\%$

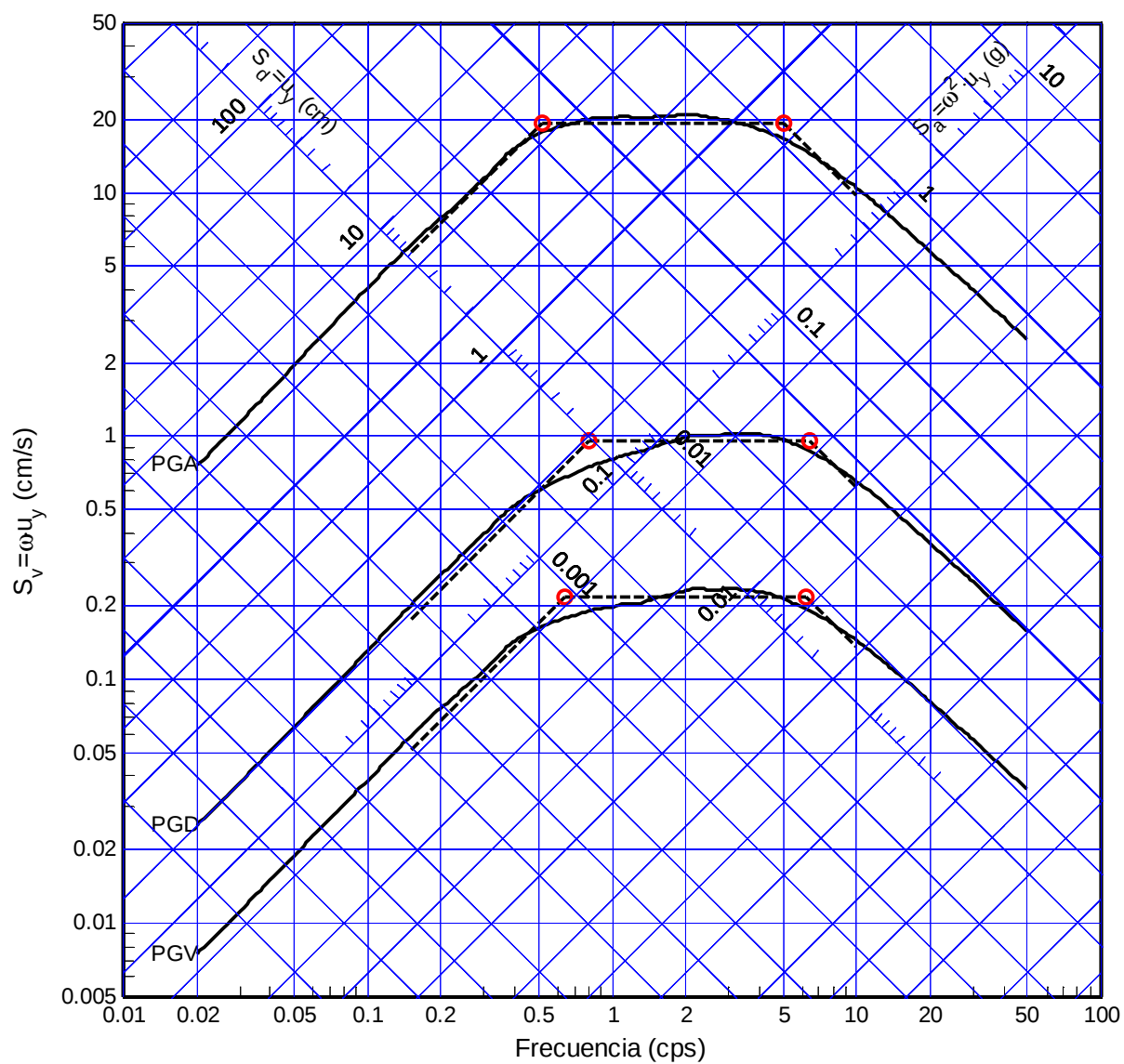


Figura B.113 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=20\%$

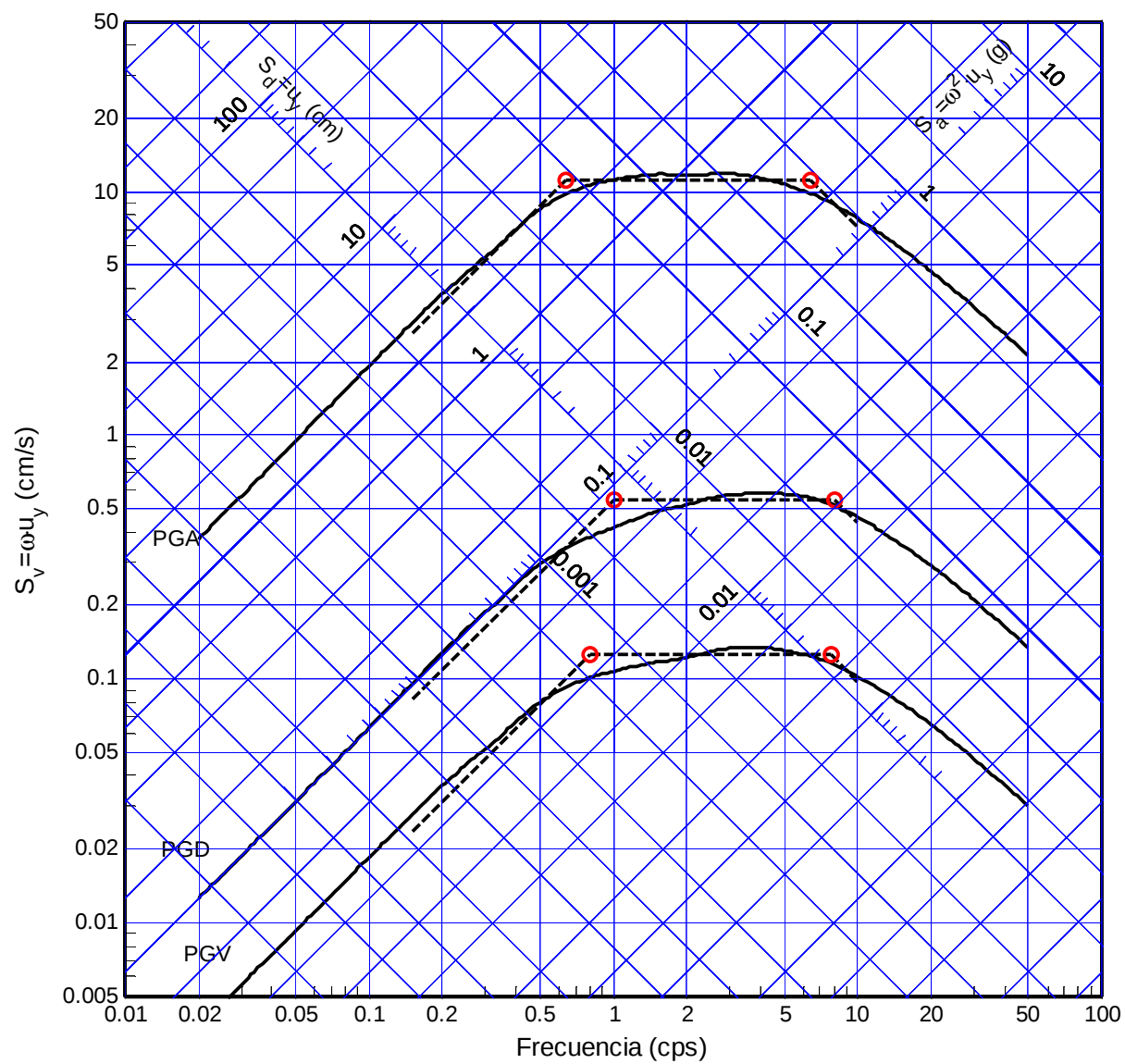


Figura B.114 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=20\%$

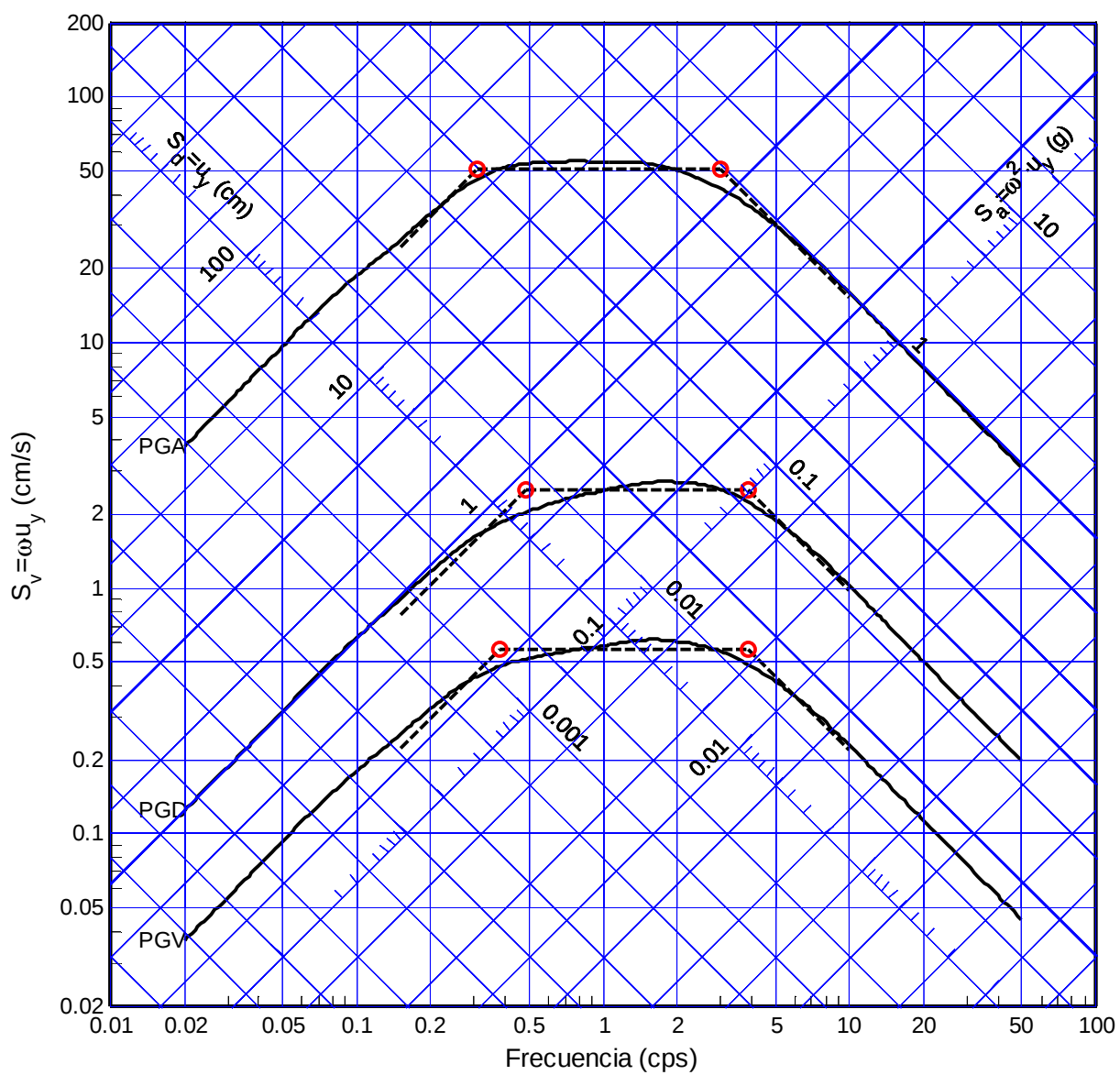


Figura B.115 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=50\%$

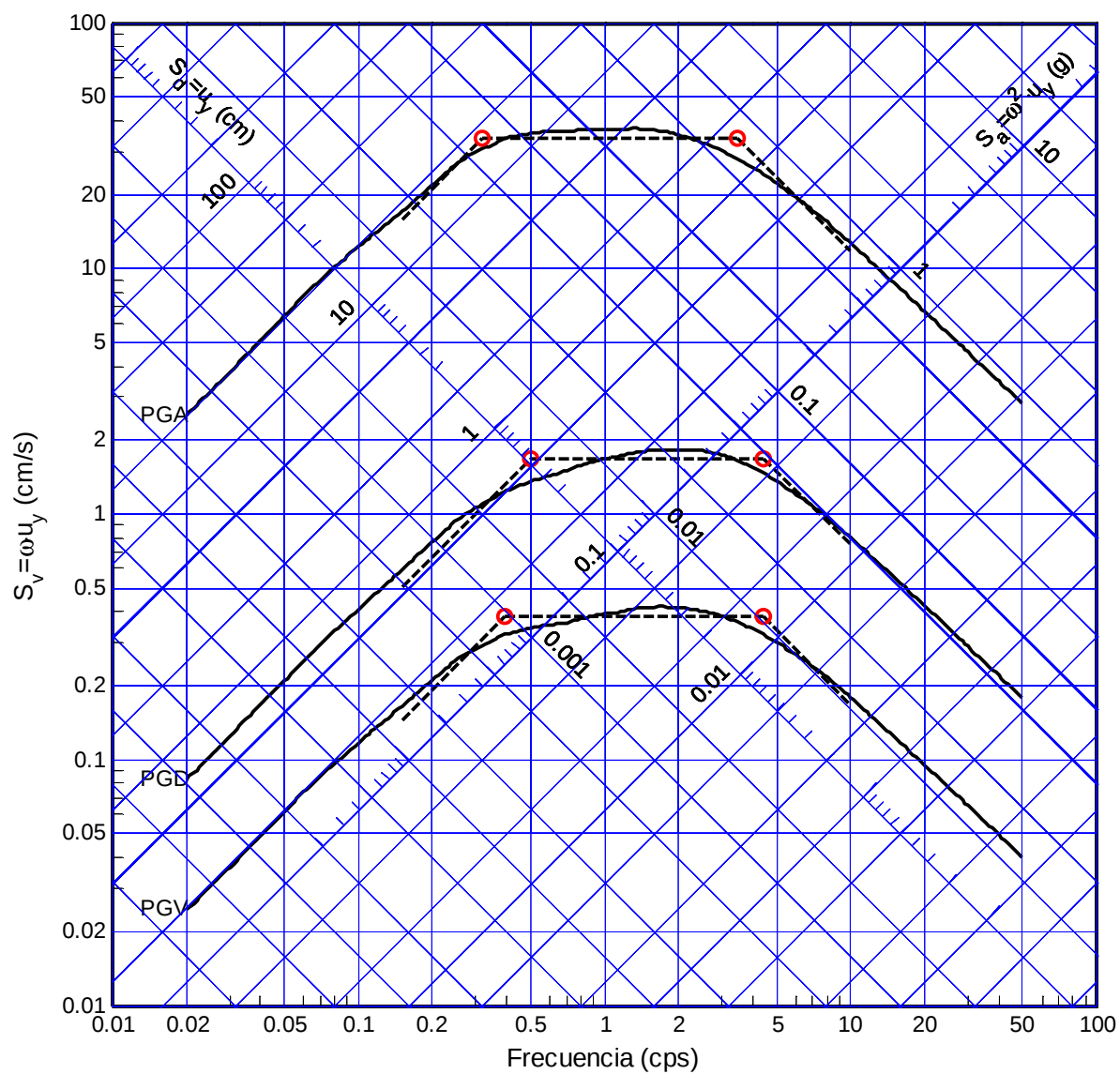


Figura B.116 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=50\%$

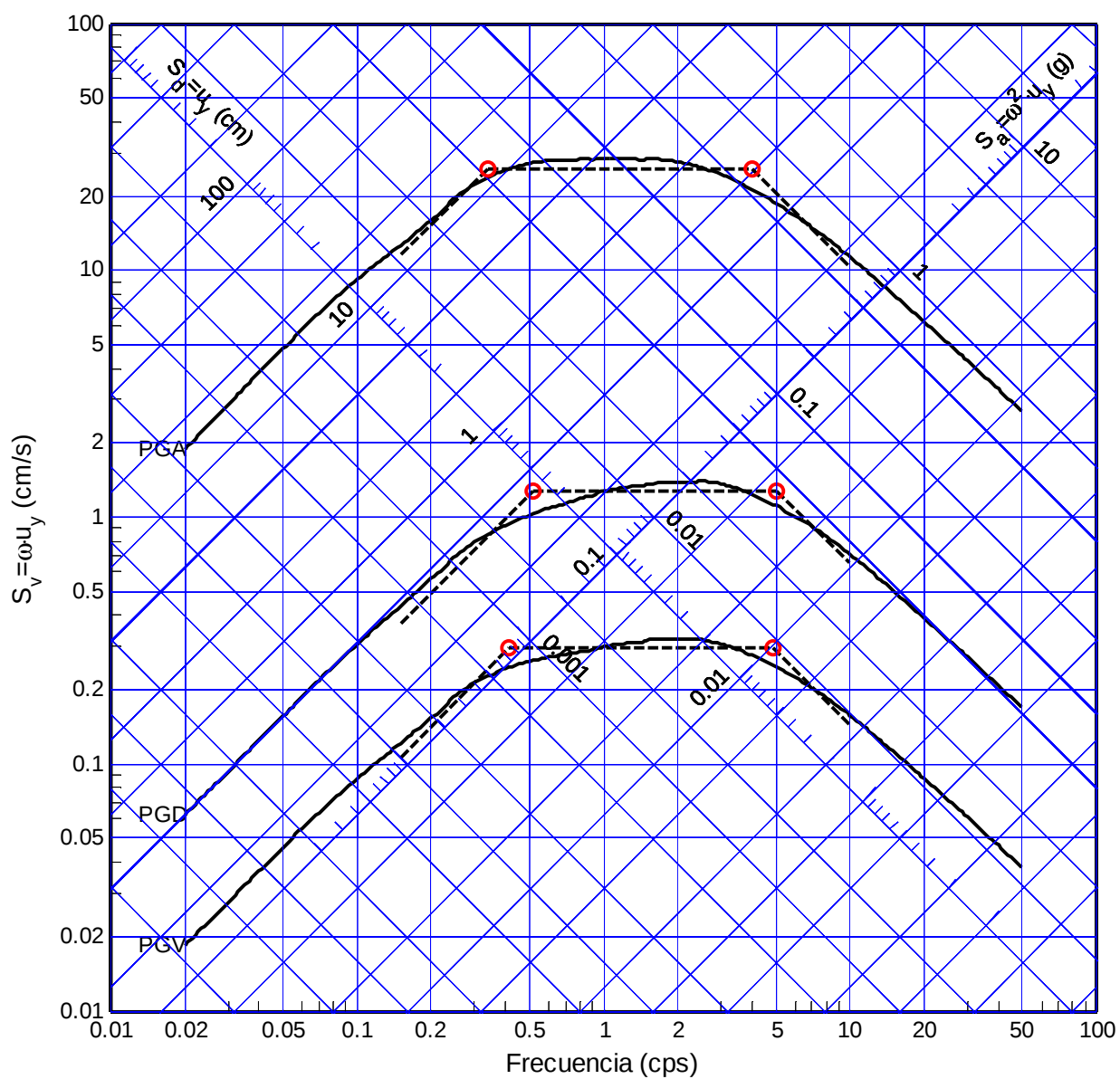


Figura B.117 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=50\%$

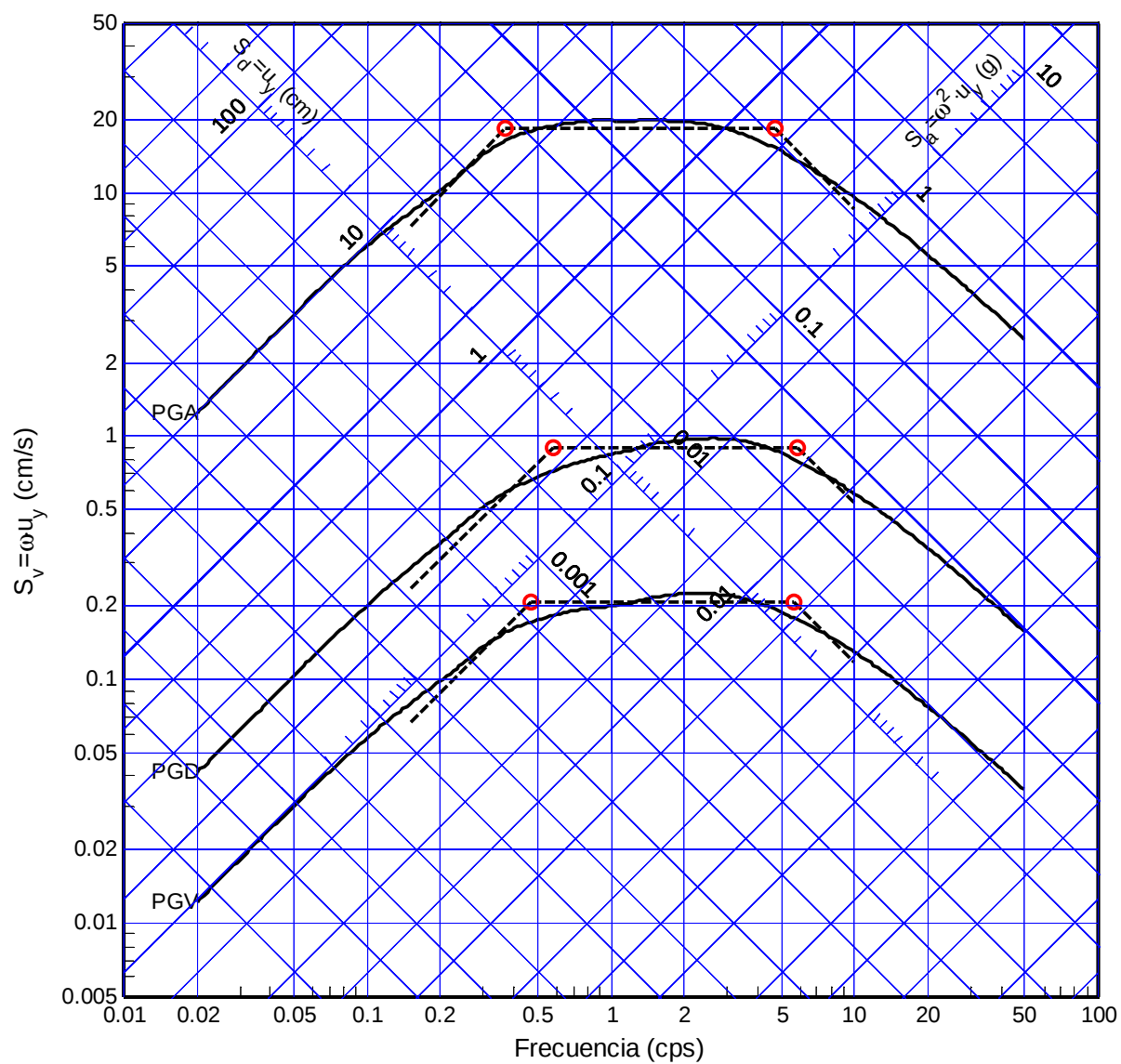


Figura B.118 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=50\%$

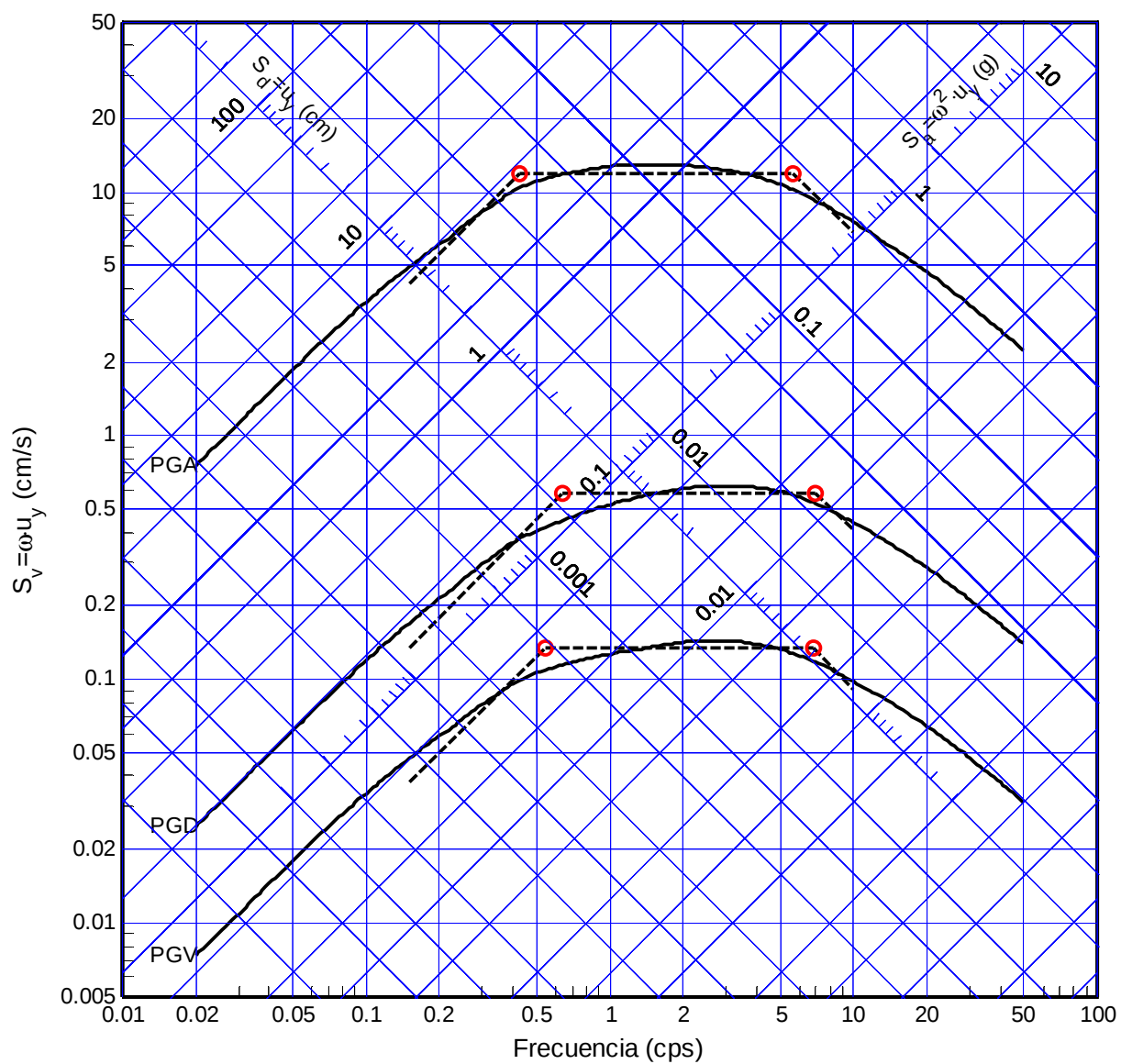


Figura B.119 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=50\%$

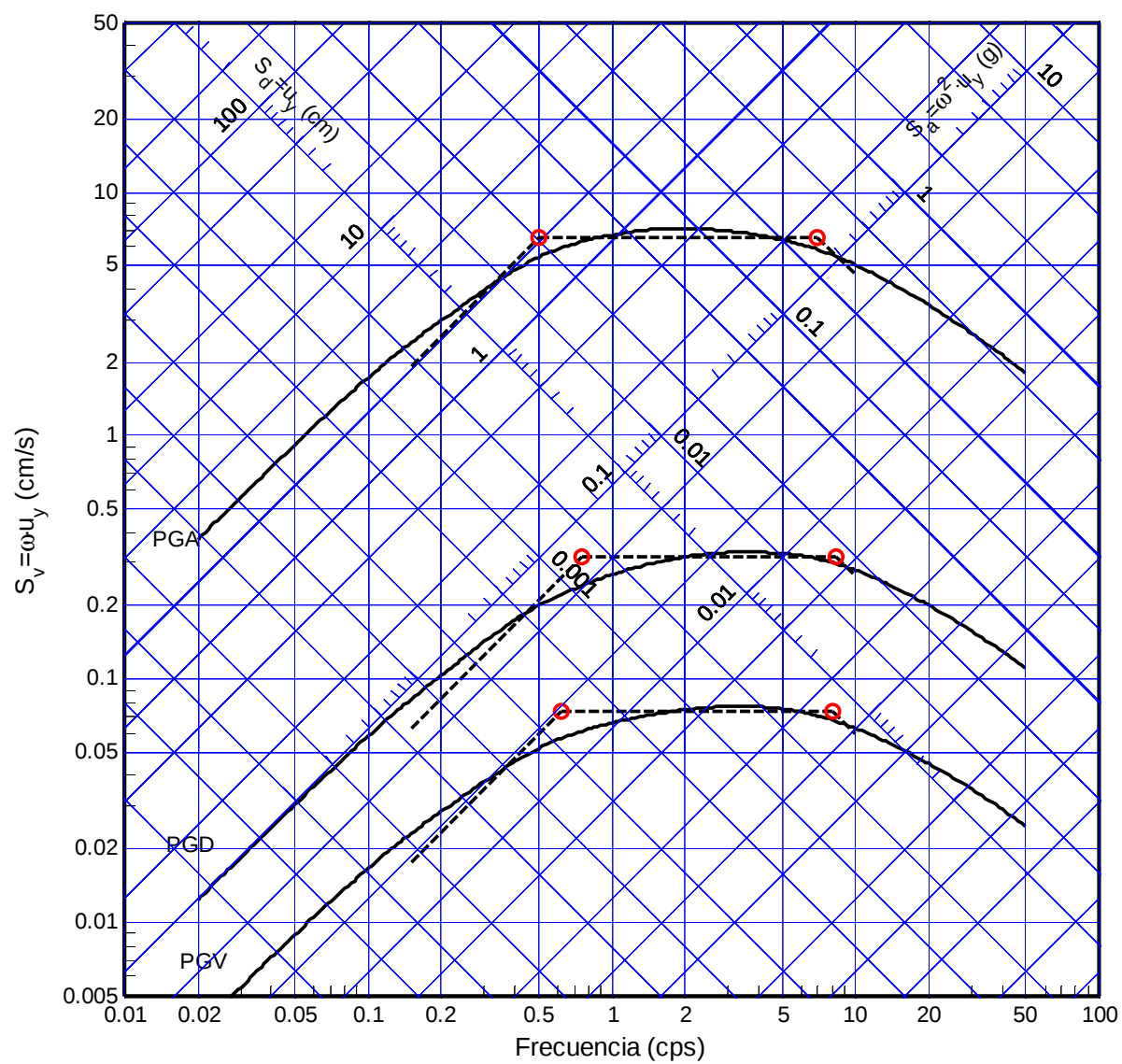


Figura B.120 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=50\%$

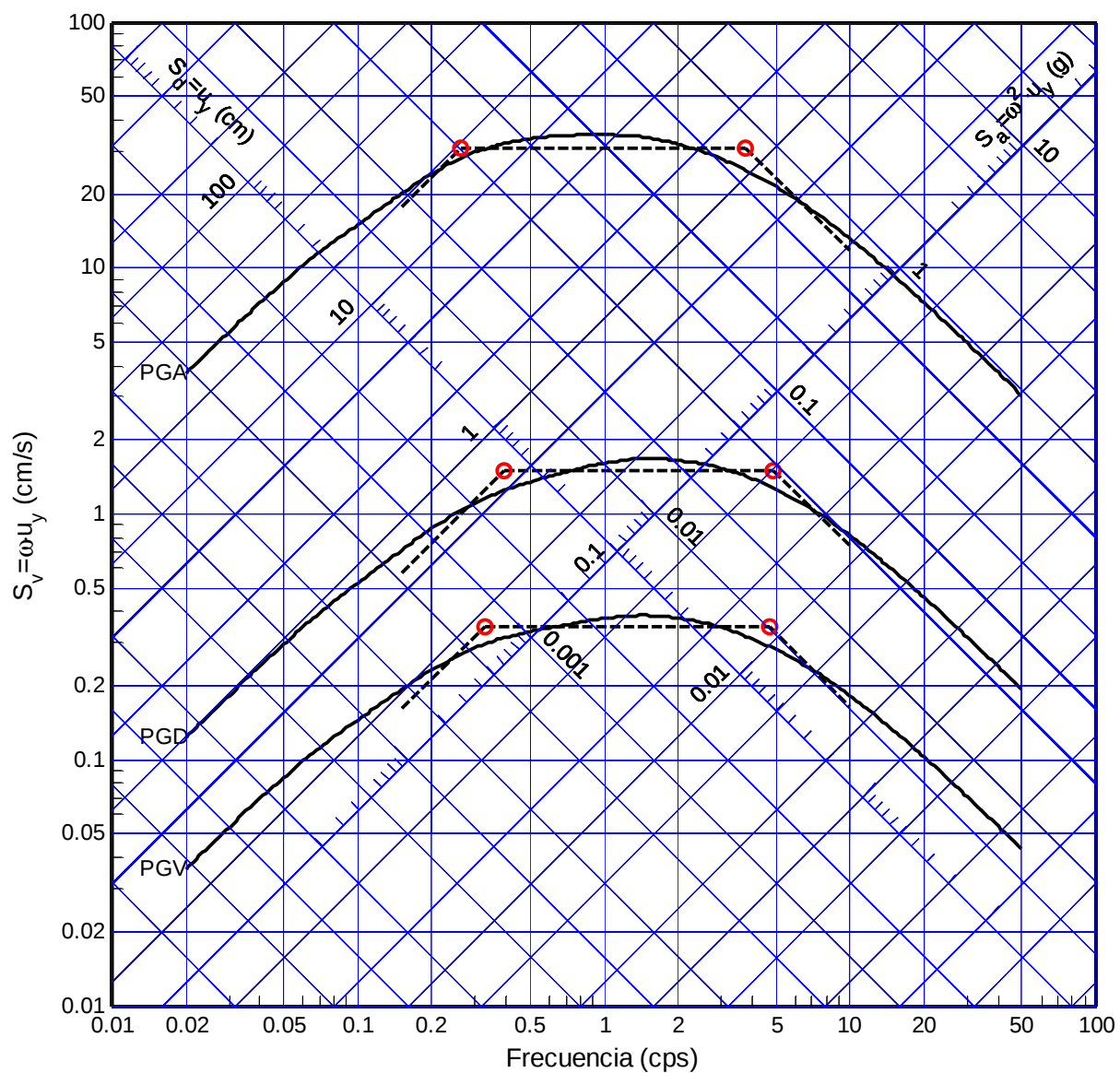


Figura B.121 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1$, amortiguamiento $\xi=100\%$

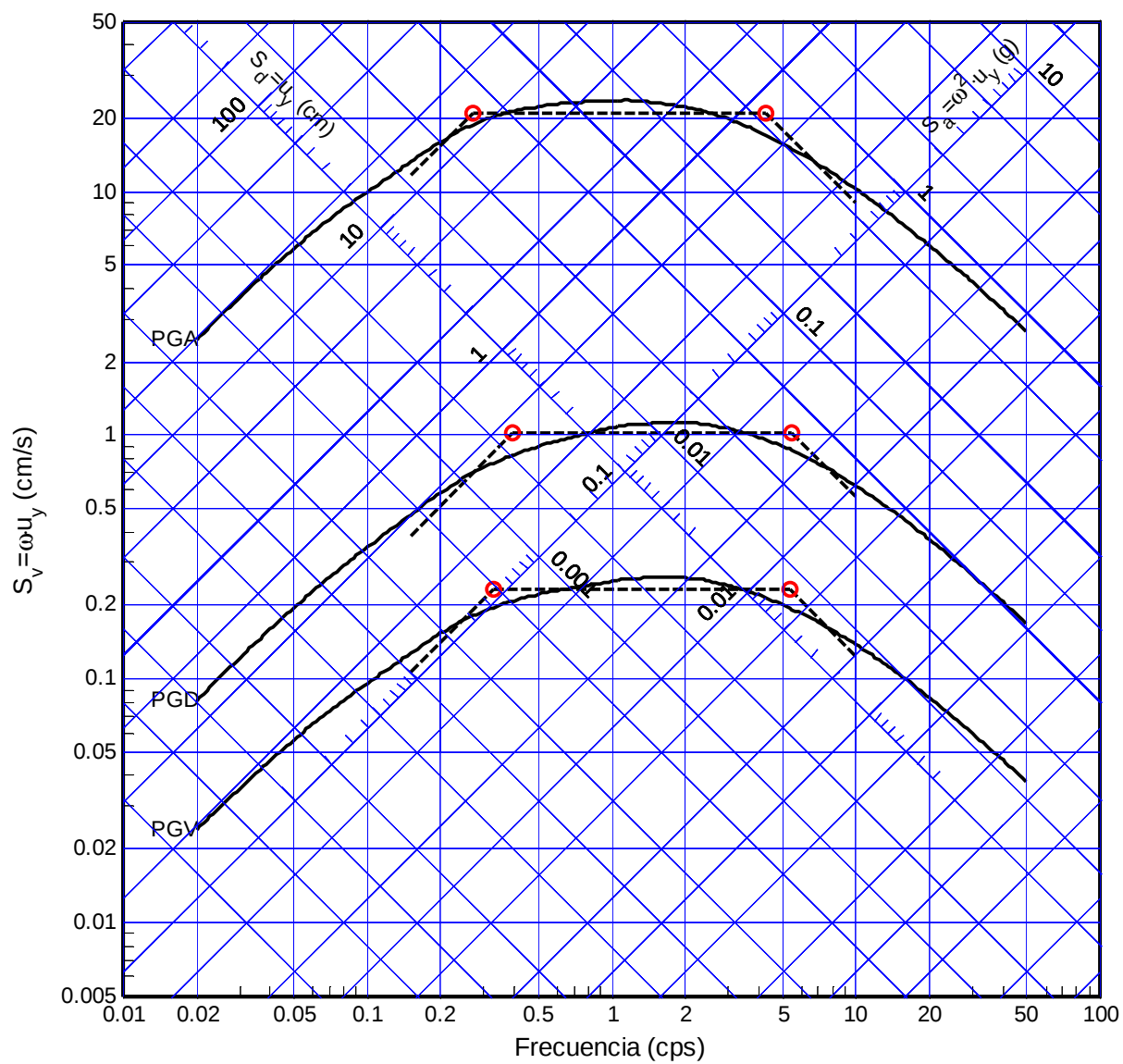


Figura B.122 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=1.5$, amortiguamiento $\xi=100\%$

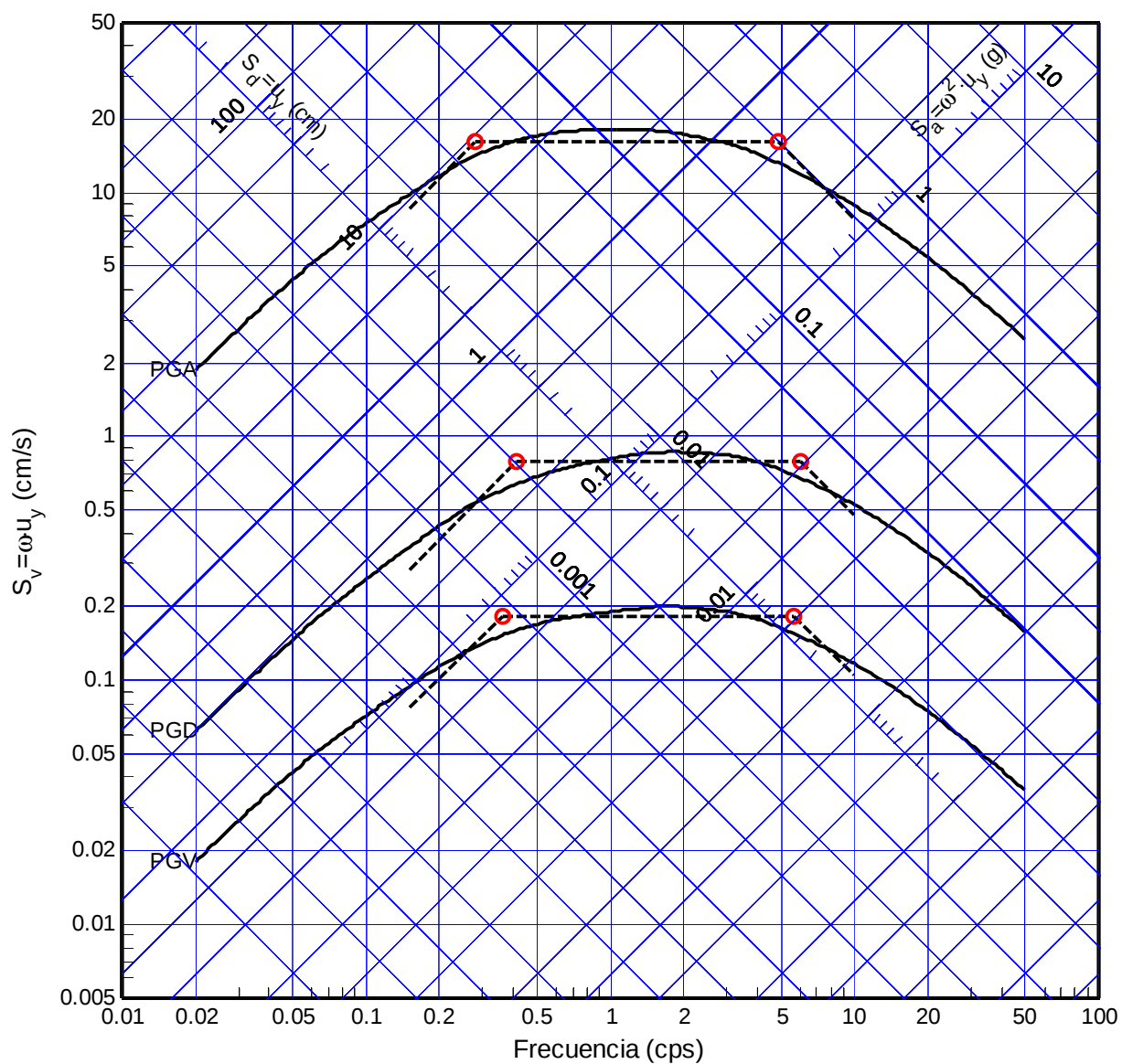


Figura B.123 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=2$, amortiguamiento $\xi=100\%$

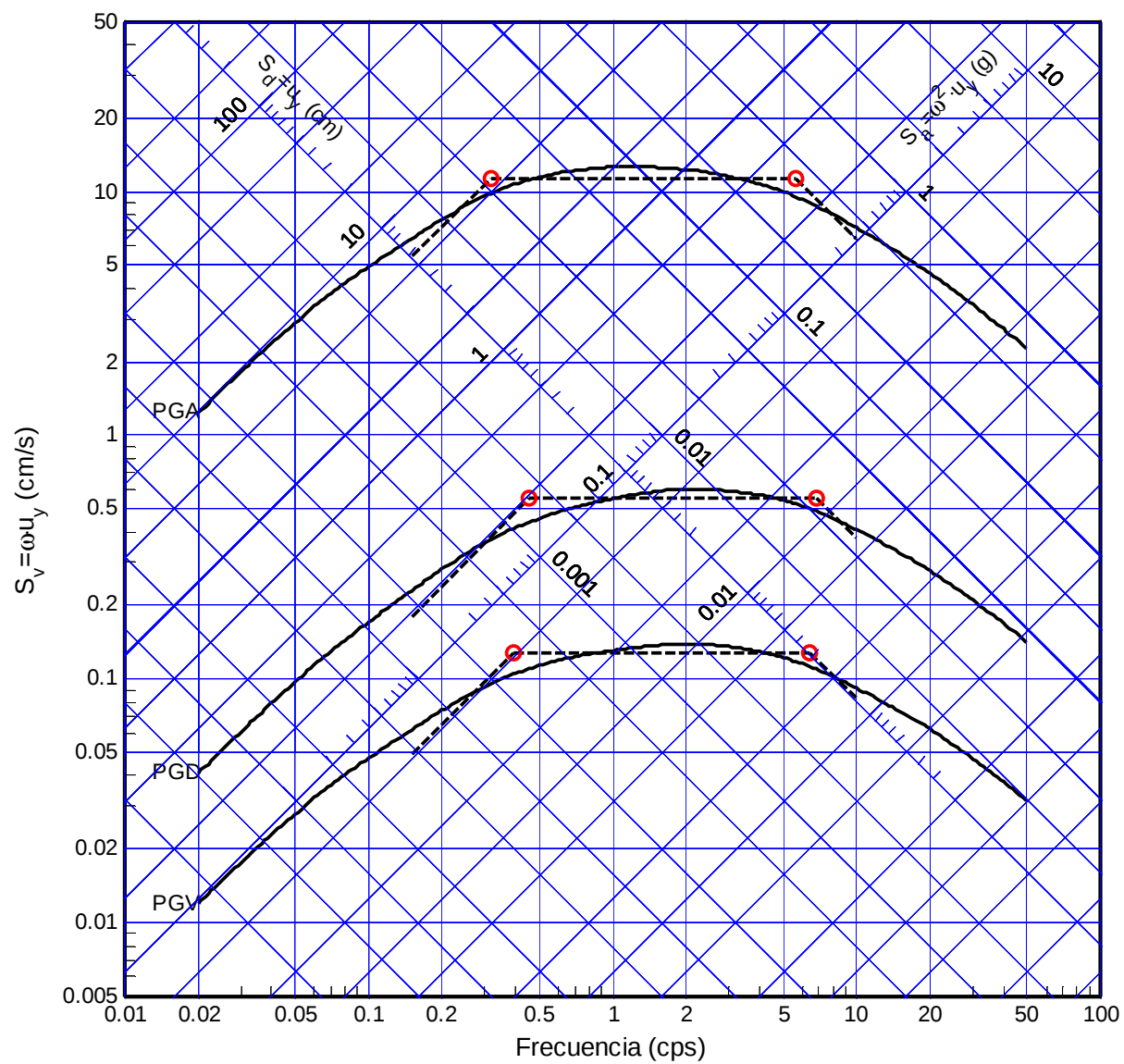


Figura B.124 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=3$, amortiguamiento $\xi=100\%$

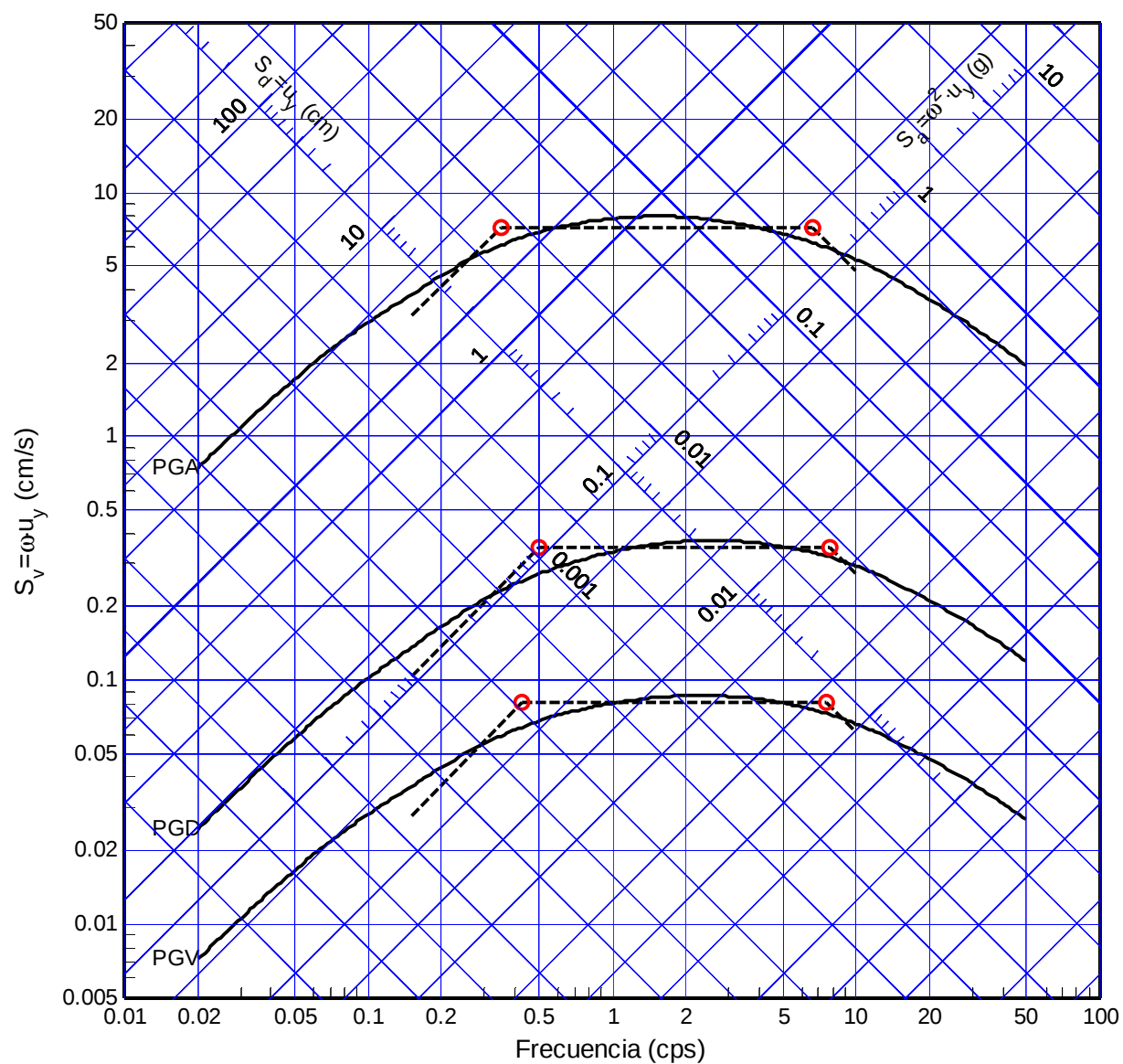


Figura B.125 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=5$, amortiguamiento $\xi=100\%$

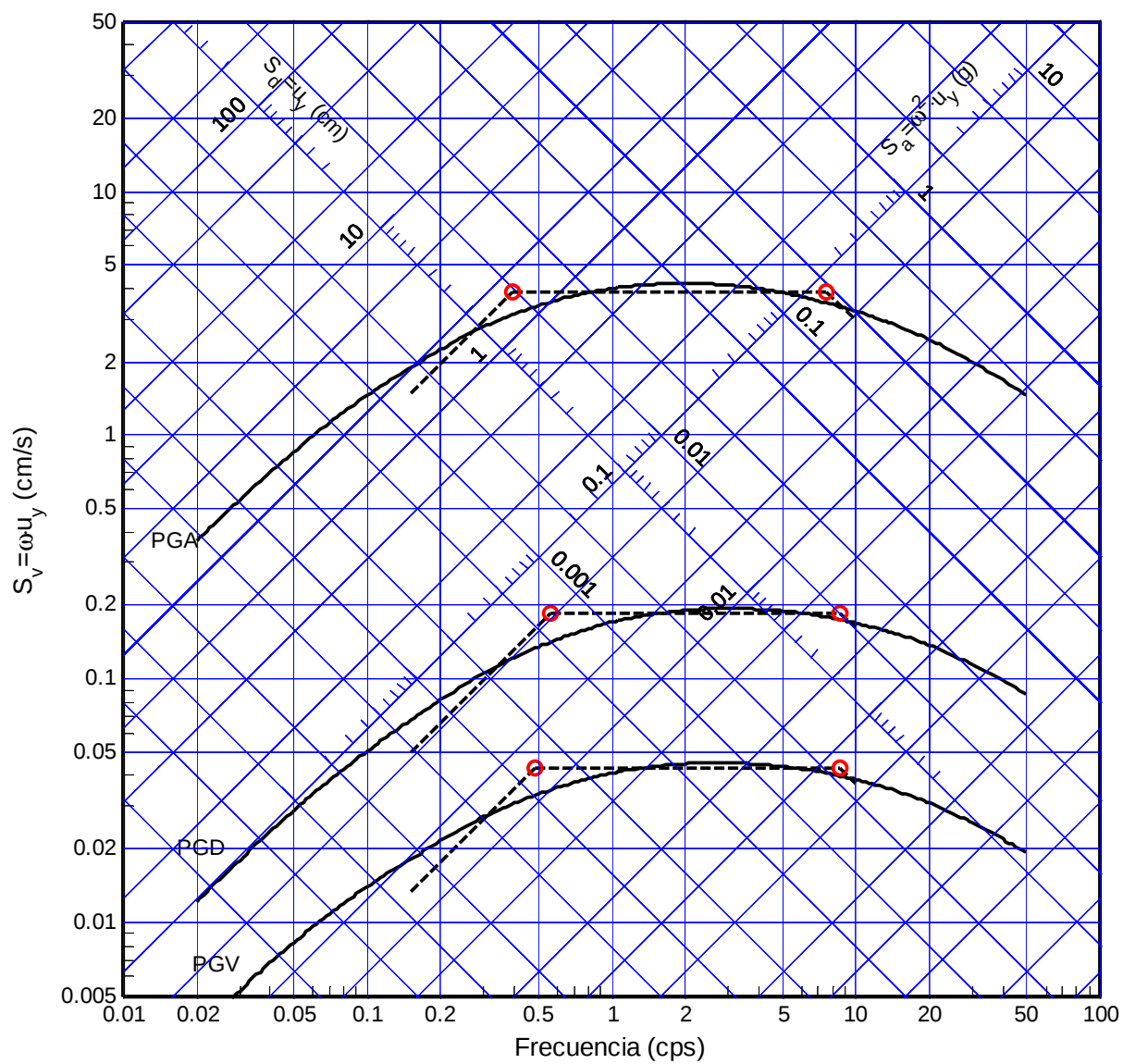


Figura B.126 Ajuste trapezoidal del espectro promedio normalizado (51 registros), sistema con degradación de rigidez. Ductilidad $\mu=10$, amortiguamiento $\xi=100\%$