

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

Universidad Politécnica de Cataluña
Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica

**Propuesta de espectros de energía para
proyecto sismorresistente basados en
registros de Colombia**

Diego Andrés Bravo González

4. Cálculo de espectros de energía en Colombia

4.1 Consideraciones generales

En este capítulo se presentan los espectros de energía que corresponden a los registros seleccionados en el capítulo anterior. En los dos siguientes apartados se presentan los espectros obtenidos mediante análisis dinámicos lineales y no lineales, respectivamente; en el último apartado se incluye una valoración de los resultados obtenidos. Los espectros de energía obtenidos de análisis lineales son válidos para períodos largos; para obtener los valores de los espectros correspondientes a períodos cortos se efectúan análisis dinámicos no lineales a ductilidad constante. En el siguiente capítulo se utilizan los resultados de éste para proponer espectros de proyecto basados en envolventes bilineales de los espectros obtenidos en este capítulo. En el sexto capítulo se utilizan los resultados de los análisis no lineales para proponer expresiones empíricas de la energía histerética en función de la energía de entrada. En este apartado se describe a continuación la formulación utilizada para obtener los espectros.

Como se indica en el capítulo 2, la energía introducida en la estructura por un determinado sismo E_I es un parámetro muy estable de la respuesta estructural dependiendo sólo de la masa total m y del período fundamental de la estructura T , y se ve escasamente afectada por su fuerza de plastificación Q_y o por sus propiedades histeréticas. Tal como se comenta en el capítulo 2, la única excepción relevante la constituyen los movimientos “de banda estrecha” (es decir, con un contenido de frecuencias muy concentrado) y con una aportación importante de energía. La débil dependencia de E_I respecto a estos dos factores permite utilizar la respuesta obtenida para sistemas elásticos de un grado de libertad para obtener los espectros de energía de proyecto para sistemas no lineales en general, como se indica en el capítulo 2. Un sistema elástico de un grado libertad se caracteriza por tener un período único y constante T_0 , que gobierna la entrada de energía E_I . Sin embargo, si el sistema experimenta deformaciones plásticas, el período cambia de T_0 a un valor mayor T' . En este caso, Akiyama [Akiyama, 1999; Akiyama, 2003] demostró que la energía en un sistema no lineal de un grado de libertad, E_I' , es un promedio con respecto a T de la energía E_I proporcionada por un espectro elástico entre T_0 y T' ($> T_0$); es decir:

$$E_I' = \frac{\int_{T_0}^{T'} E_I(T) dT}{T_0 - T'} \quad (4.1)$$

La forma típica de los espectros de energía de un determinado movimiento del suelo comienza en el origen y aumenta aproximadamente de forma lineal hasta un valor máximo $E_{I,\max}$ en el período predominante del suelo T_G y luego E_I oscila alrededor de $E_{I,\max}$ para un rango de períodos entre T_G y un período mayor T_E ; y más allá de T_E la energía de entrada E_I tiende a disminuir con T (Figura 4.1).

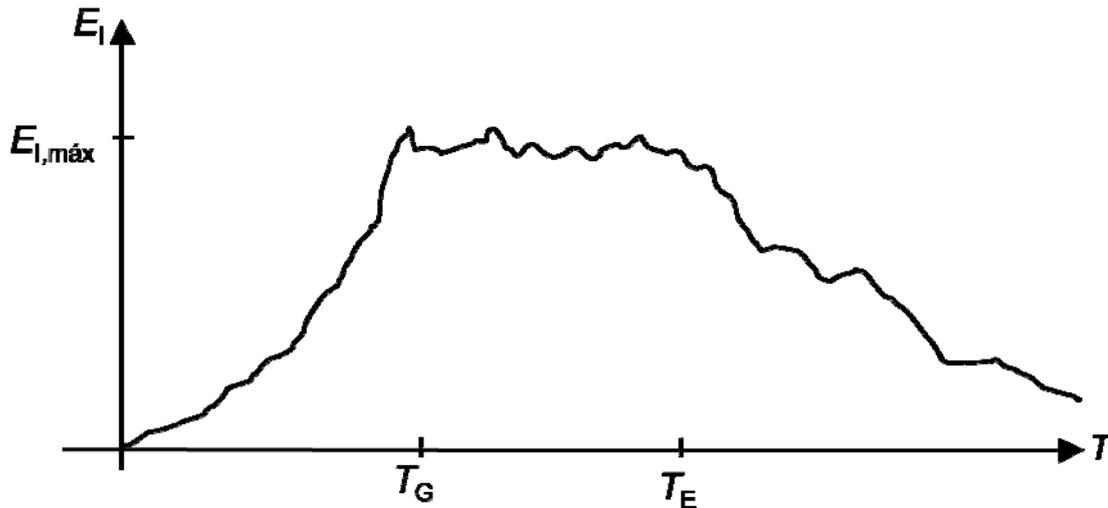


Figura 4.1. Espectro típico de energía

En sistemas de un grado de libertad con un período elástico T_0 inferior a T_G ($T_0 < T_G$), la plastificación del sistema implica un incremento de la absorción de energía con respecto al valor de E_I dado por el espectro elástico en T_0 porque en esta región del espectro la energía de entrada aumenta con T . Para utilizar el espectro de energía de entrada de proyecto desarrollado para sistemas elásticos de un grado de libertad para sistemas no lineales de un grado de libertad caracterizados por el período elástico T_0 , Akiyama [Akiyama, 1999; Akiyama, 2003] propone multiplicar la pendiente del segmento inicial de la envolvente del espectro por un factor 1,20, tal como se indica en el capítulo 2. Akiyama obtiene este valor de 1,20 [Akiyama, 1999] de un número muy limitado de registros (básicamente, del terremoto de El Centro, 1940). Por tanto, puede ser necesaria una evaluación más precisa de este factor ya que en países con numerosos edificios de baja a media altura, los períodos fundamentales en el rango entre 0 y T_G son comunes. Con este fin, se calculan espectros lineales y no lineales (en los subapartados 4.2 y 4.3, respectivamente) de energía basados en el amplio conjunto de registros usados en este estudio para Colombia; y en el subapartado 4.4 se discuten los resultados. Los resultados de los análisis lineales sirven para obtener los espectros elásticos individuales y extraer las envolventes bilineales (capítulo 5). Los análisis no lineales tienen dos objetivos principales: (i) evaluar el valor de 1,2 usado para modificar la pendiente de la envolvente de los espectros individuales en el rango de períodos cortos y (ii) el desarrollo de una expresión empírica para la estimación del cociente V_D/V_E , que mejora las propuestas en la literatura (capítulo 6). Por último, cabe señalar que en el intervalo T_G - T_E , la ampliación del período debido a la plastificación del sistema no se traduce en un aumento significativo de la energía de entrada, ya que en este rango E_I permanece aproximadamente constante. Más allá de T_E , la ampliación del período asociado con la plastificación implica una reducción de la energía de entrada, y el hecho de despreciar dicho efecto (para simplificar la obtención de los espectros) está del lado de la seguridad. En consecuencia, como se indica en el capítulo 2, la envolvente del espectro de energía de entrada elástico individual será revisada sólo en el rango de períodos inferiores a T_G para obtener espectros de energía de entrada de proyecto.

4.2 Análisis lineales

Para cada uno de los 144 registros de movimiento del terreno seleccionados, el espectro de energía de entrada, V_E vs. T , se obtuvo como se indica en el capítulo 2. De acuerdo con la información disponible, los espectros resultantes se agrupan en suelo y roca; por otra parte los registros de suelo se subdividen en las categorías de “suelo C” y “suelo D”. A su vez, los tres grupos se clasifican de acuerdo a la aceleración máxima de proyecto PGA_d prescrita por el código sismorresistente de Colombia NSR-98 [NSR-98, 1998], que va desde $PGA_d = 0,05$ g hasta 0,40 g, como se muestra en la Figura 3.3. Las Figuras 4.2 a 4.16 muestran los espectros

obtenidos para cada movimiento sísmico registrado en roca o en suelo (C o D) clasificados según los valores de PGA_d ; las Figuras 4.2 a 4.6 corresponden a roca, las Figuras 4.7 a 4.11 corresponden a suelo C y las Figuras 4.12 a 4.16 corresponden a suelo D. Los casos para suelo con $PGA_d < 0,15$ g y $PGA_d = 0,15$ g y para roca con $PGA_d = 0,35$ g se han omitido ya que no hay registros en tales condiciones. En estas Figuras, los espectros V_E-T correspondientes a los movimientos de tierra impulsivos (con índice $I_D < 10$, ver la ecuación (3.1)) han sido omitidos.

Las Figuras 4.2 a 4.16 muestran que los espectros con mayor V_E corresponden a regiones con PGA_d 0,2 g y 0,25 g; los movimientos registrados en las otras regiones poseen una intensidad (en términos de V_E) bastante menor. Concentrándose en los espectros para roca en estas regiones (Figuras 4.3 y 4.4) los valores máximos de V_E son $\max\{V_E\} = 78,4$ cm/s y $\max\{V_E\} = 107,6$ cm/s, respectivamente; los cocientes $\max\{V_E\}/PGA_d$ presentan valores similares: $78,4/0,2$ g = 0,40 s y $107,6/0,25$ g = 0,44 s. En suelo de tipo C (Figura 4.8) es $\max\{V_E\} = 222,3$ cm/s para la región con $PGA_d = 0,25$ g, y en suelo de tipo D (Figura 4.12) es $\max\{V_E\} = 104,6$ cm/s para la región con $PGA_d = 0,20$ g; los cocientes $\max\{V_E\}/PGA_d$ son $222,3/0,25$ g = 0,91 s y $104,6/0,2$ g = 0,53 s.

Como la mayoría de los registros se obtuvieron en la región con $PGA_d = 0,25$ g, los espectros obtenidos (V_E) para los movimientos de tierra registrados en dicha región se utilizaron para obtener la envolvente bilineal descrita en el capítulo 2. Estas envolventes son representadas con líneas de trazos en negrita en las Figuras 4.4 y 4.8, y están dadas por las siguientes fórmulas:

$$\text{Roca: } T \leq T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 2,2T; \quad T > T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 0,44 \quad \text{en donde } T_G = 0,2 \text{ s} \quad (4.2)$$

$$\text{Suelo tipo C: } T \leq T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 1,3T; \quad T > T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 0,91 \quad \text{en donde } T_G = 0,7 \text{ s} \quad (4.3)$$

Estas envolventes bilineales se representan en las Figuras 4.2 a 4.11 con trazos discontinuos.

Debe subrayarse que la envolvente dada por la ecuación (4.2) se rige por los registros 19 y 20 (ver la Tabla 3.4), cuyas aceleraciones máximas del suelo PGA (139 y 402 cm/s^2 , respectivamente) son 0,56 y 1,61 veces la aceleración máxima de proyecto PGA_d (0,25 g) prescrita por el código NSR-98 [NSR-98, 1998]. Del mismo modo, la envolvente dada por la ecuación (4.3) se rige por el registro 66, cuya aceleración máxima PGA (314 cm/s^2) también está cerca de la aceleración máxima de proyecto PGA_d (0,25 g). Esto significa que las envolventes propuestas en las ecuaciones (4.2) y (4.3) ofrecen niveles de V_E que corresponden a movimientos sísmicos, cuyo riesgo está en proporción con el nivel de peligrosidad sísmica en términos de aceleración máxima de proyecto (PGA_d). En el caso del suelo D, los espectros de V_E corresponden a movimientos sísmicos con pequeña aceleración máxima PGA (bastante por debajo de PGA_d). Por tanto, en este caso en vez de obtener el espectro de proyecto bilineal a partir de los espectros de energía V_E sin escalar se ha decidido obtenerlo a partir de los registros escalados a PGA_d en la zona de $PGA_d = 0,25$ g. Los espectros de los registros escalados a PGA_d se muestran en las Figuras 4.17 a 4.21 para roca, 4.22 a 4.26 para suelo tipo C y 4.27 a 4.31 para suelo tipo D, respectivamente. Las envolventes bilineales de proyecto de los espectros escalados $V_E(PGA_d/PGA)$ de los registros individuales en suelo tipo D (ver la Figura 4.28) han sido elegidas para abarcar al menos el 84% de los espectros individuales. El percentil resultante de los espectros de proyecto $V_E(PGA_d/PGA)$ adoptados para suelo tipo D (88%), es similar al de los espectros de proyecto escalados $V_E(PGA_d/PGA)$ para suelo tipo C (85%) (ver la Figura 4.23). Estos percentiles están próximos al 84% considerado habitualmente en estudios anteriores [Seed et al., 1976] y se considera que aportan un nivel de confianza suficiente [Clough, Penzien, 1993]. La envolvente para suelo de tipo D obedece a la siguiente expresión:

$$\text{Suelo tipo D: } T \leq T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 1,3T ; T > T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 1,43 \text{ en donde } T_G = 1,1 \text{ s} \quad (4.4)$$

Las ecuaciones (4.2) y (4.3) se superponen en el espectro de V_E de las Figuras 4.3 y 4.7 imponiendo $PGA_d = 0,2 \text{ g}$; se puede observar que dichas ecuaciones también proporcionan una razonable envolvente de los espectros para $T > T_G$ en roca, y en el rango $T < T_G$ en suelo tipo C. Las ecuaciones (4.2) y (4.3) se han representado igualmente en el resto de los gráficos de las Figuras 4.2 a 4.31 utilizando los valores apropiados de PGA_d . El pequeño número de registros disponibles en roca y en suelo tipo C en regiones con PGA_d distinto de $0,2 \text{ g}$ y $0,25 \text{ g}$, junto con los pequeños valores máximos de V_E , no proporcionan la obtención de resultados concluyentes de la comparación de la envolvente propuesta V_E-T y los espectros individuales calculados. Por lo tanto, en roca y en suelo tipo C en las regiones con PGA_d diferente de $0,2 \text{ g}$ y $0,25 \text{ g}$, las ecuaciones (4.2) y (4.3) deben tomarse de modo provisional, a la espera de obtener más datos.

El coeficiente de variación (COV) asociado con los espectros definidos por las relaciones (4.2), (4.3) y (4.4) se calcula para grupo de movimientos sísmicos (agrupados en roca, suelo tipo C y suelo tipo D) escalados previamente a $PGA = 0,25 \text{ g}$. El COV es el cociente entre la desviación típica y los valores medios del coeficiente de error C_d definido como el cociente entre los valores calculados y predichos de V_E . Los resultados son $COV(C_d) = 0,88$ para los registros en roca; $COV(C_d) = 1,01$ para los registros en suelo tipo C; and $COV(C_d) = 0,82$ para los registros en suelo tipo D.

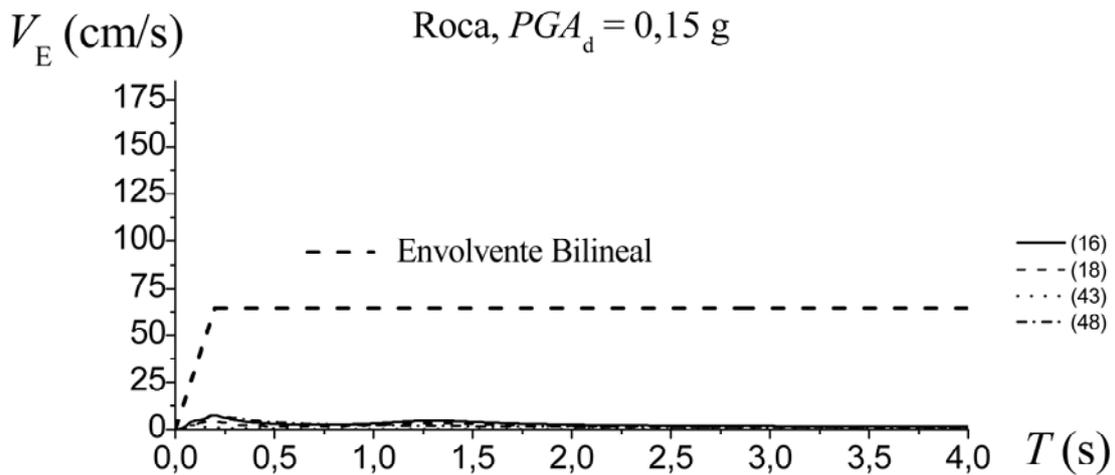


Figura 4.2. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,15 \text{ g}$.

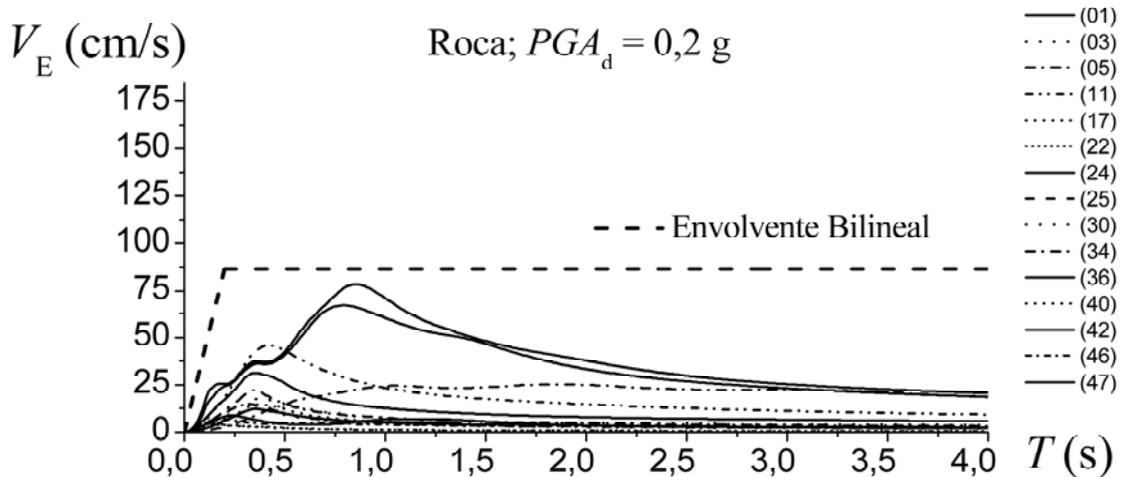


Figura 4.3. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,20 \text{ g}$.

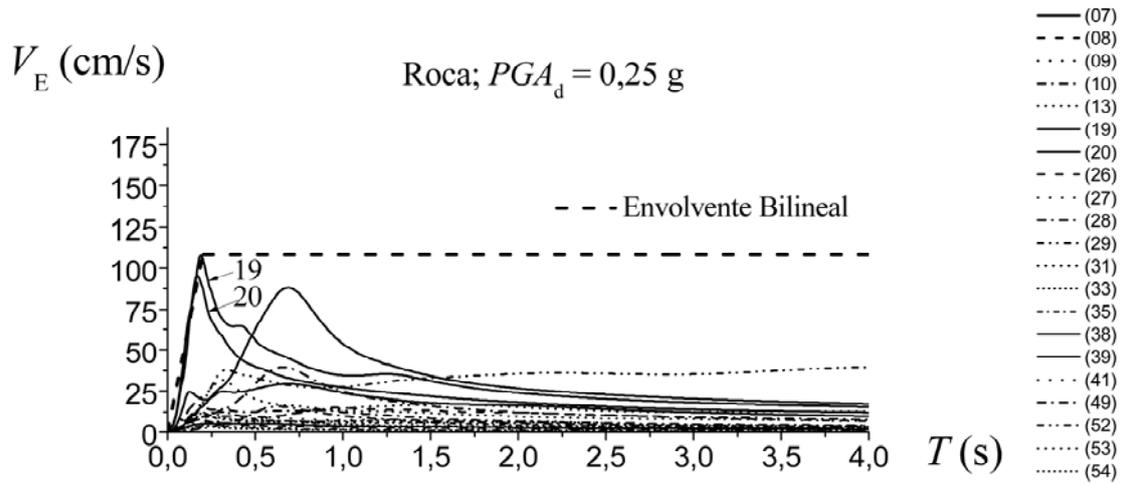


Figura 4.4. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,25$ g.

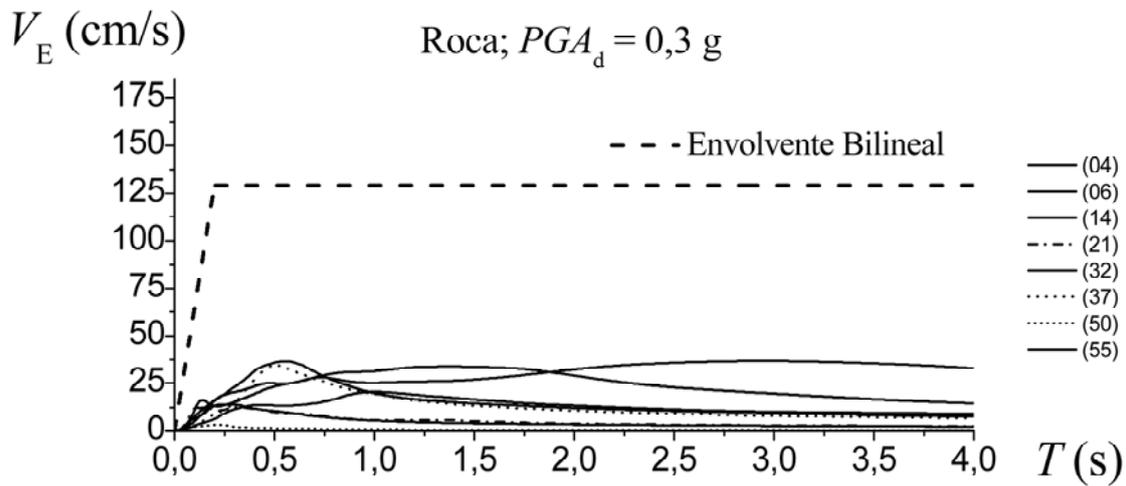


Figura 4.5. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,30$ g.

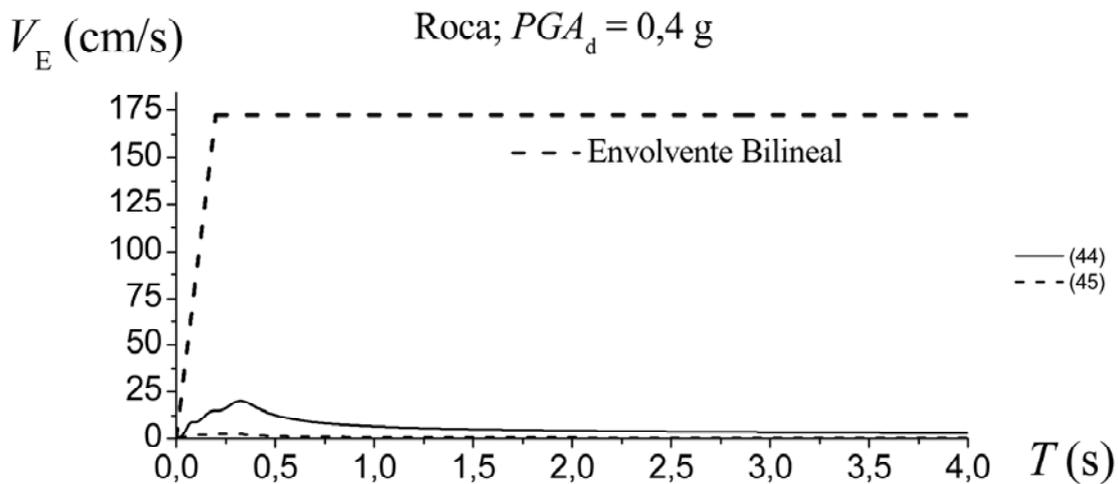


Figura 4.6. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,40$ g.

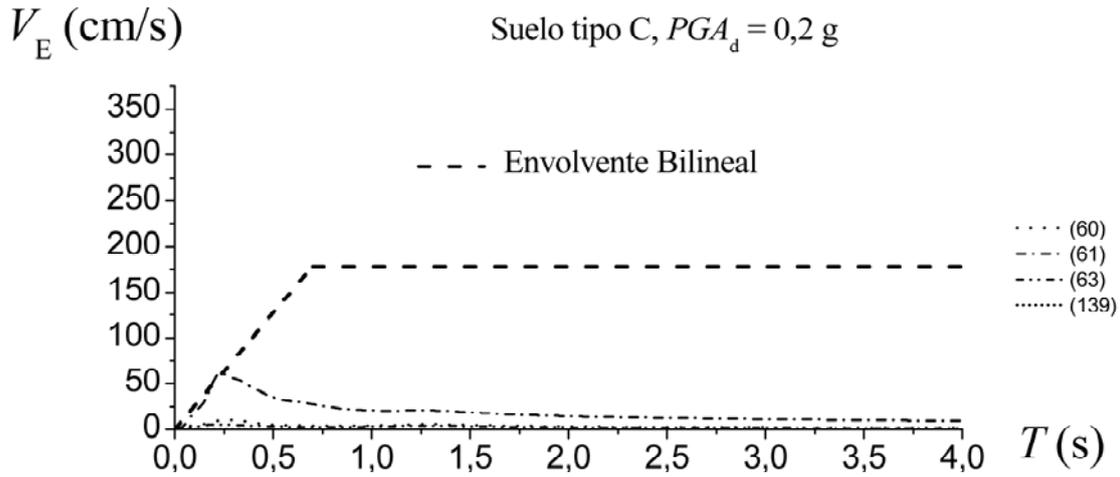


Figura 4.7. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,20$ g.

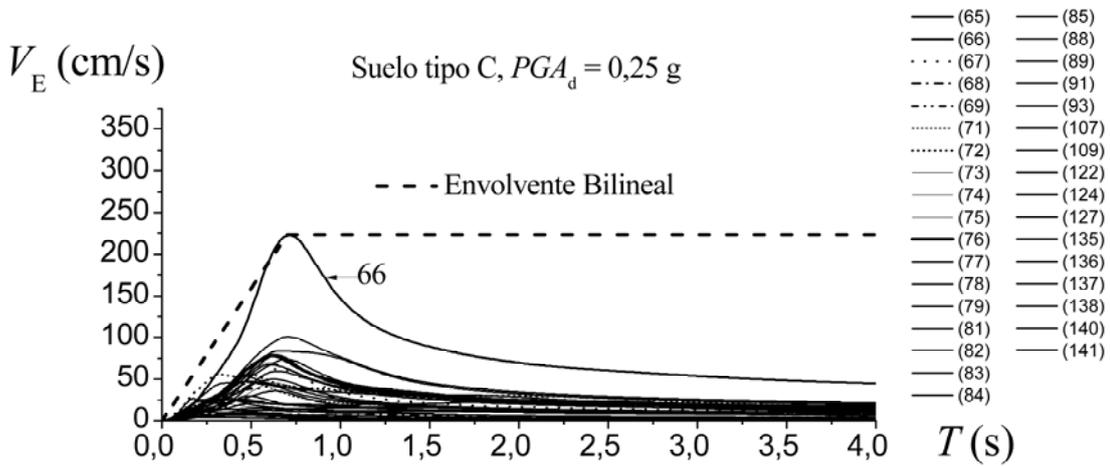


Figura 4.8. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,25$ g.

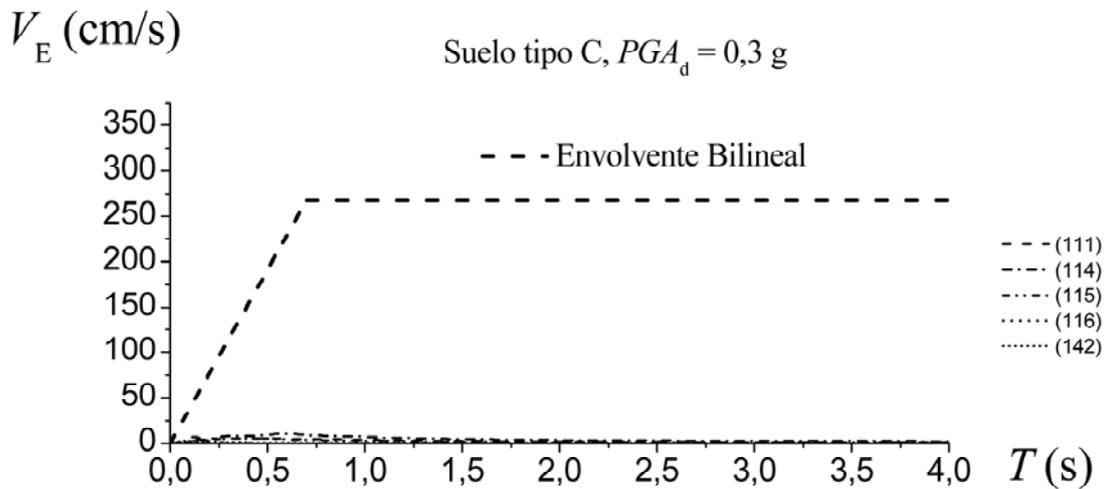


Figura 4.9. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,30$ g.

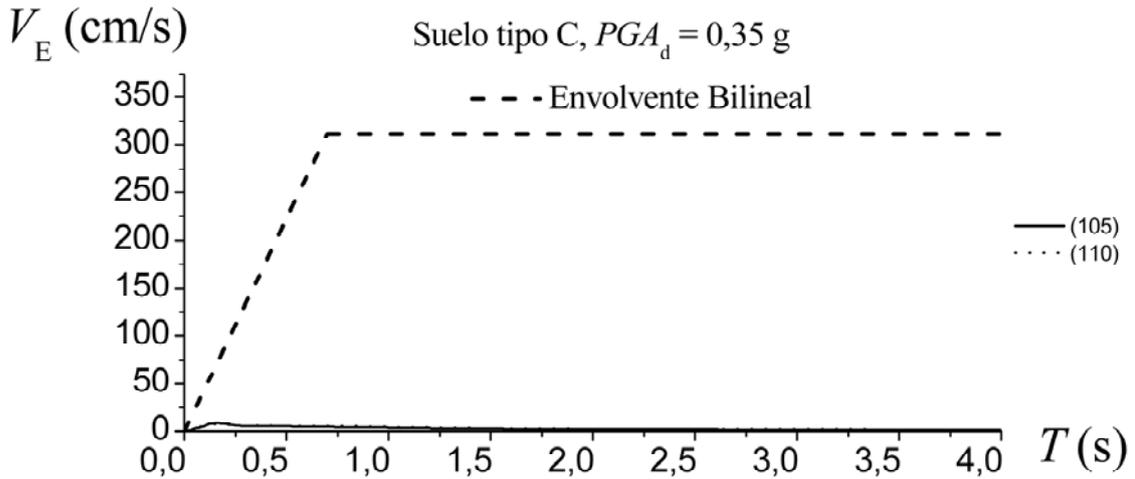


Figura 4.10. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,35$ g.

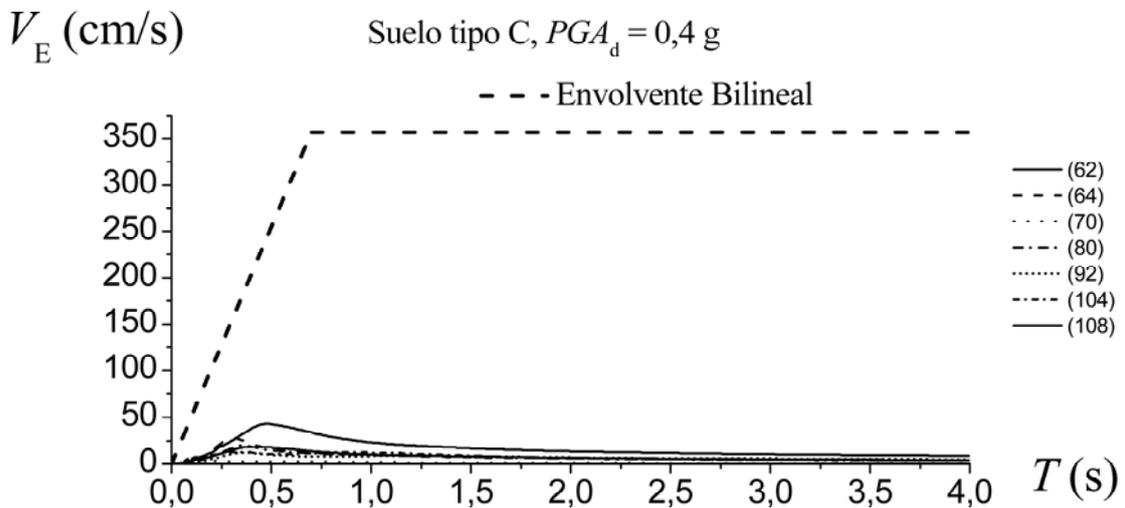


Figura 4.11. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,40$ g.

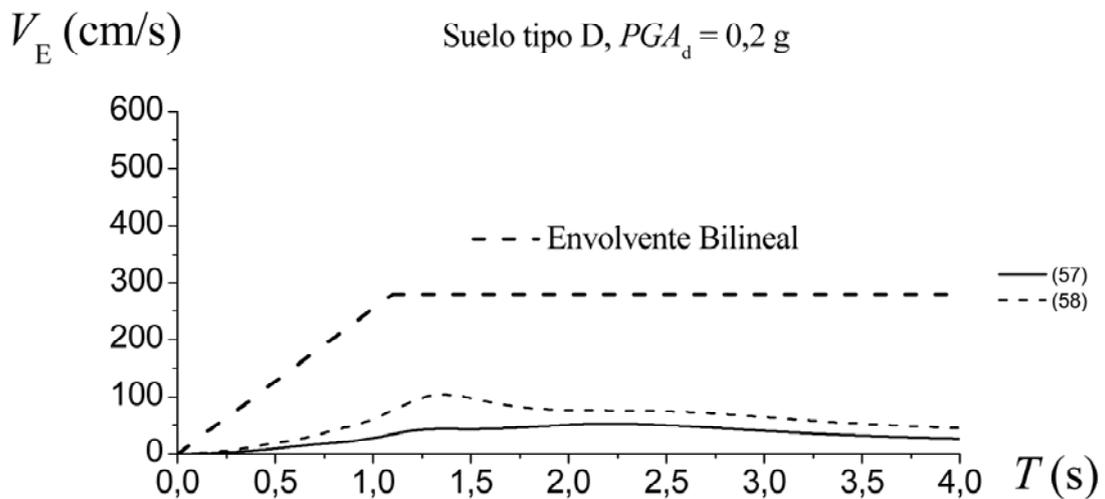


Figura 4.12. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,20$ g.

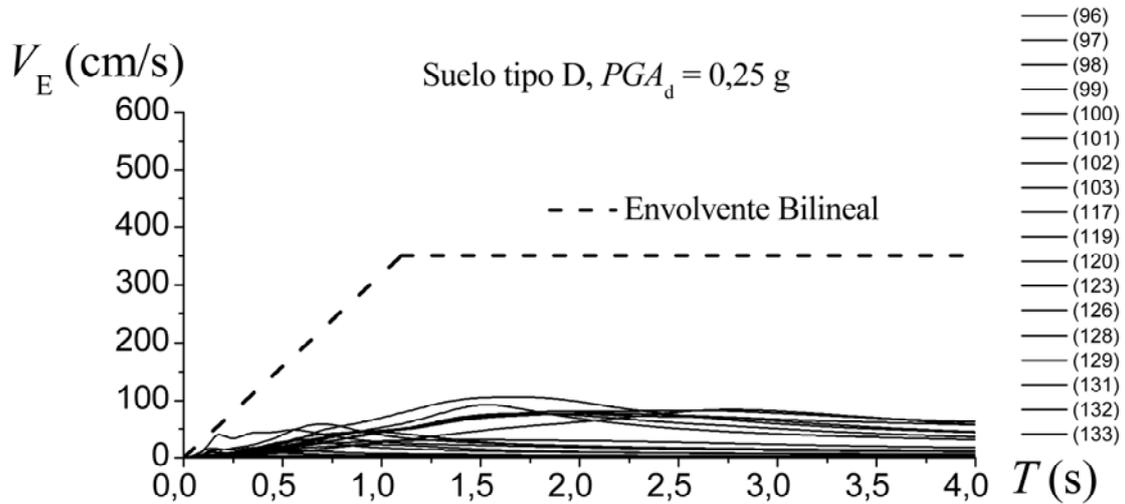


Figura 4.13. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,25$ g.

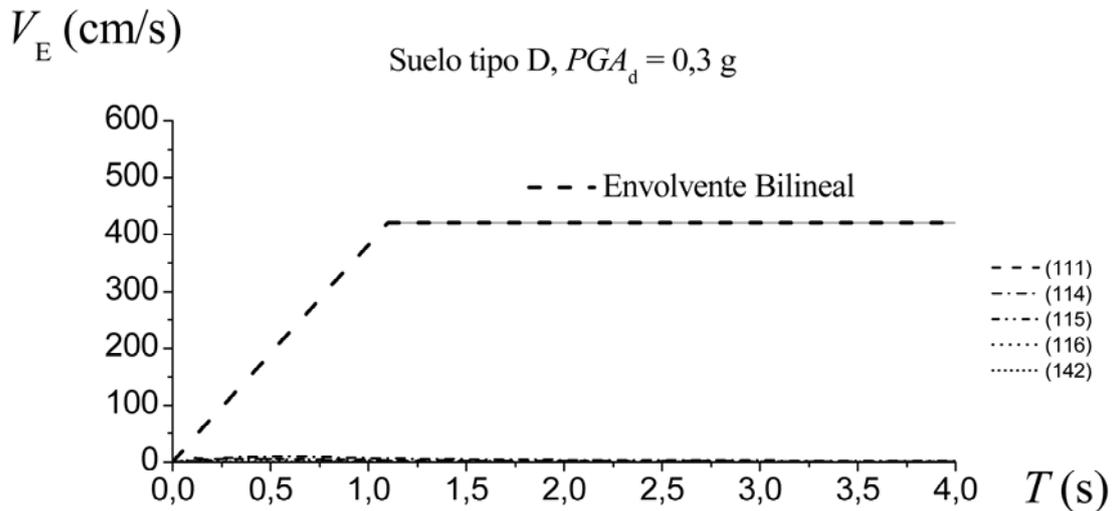


Figura 4.14. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,30$ g.

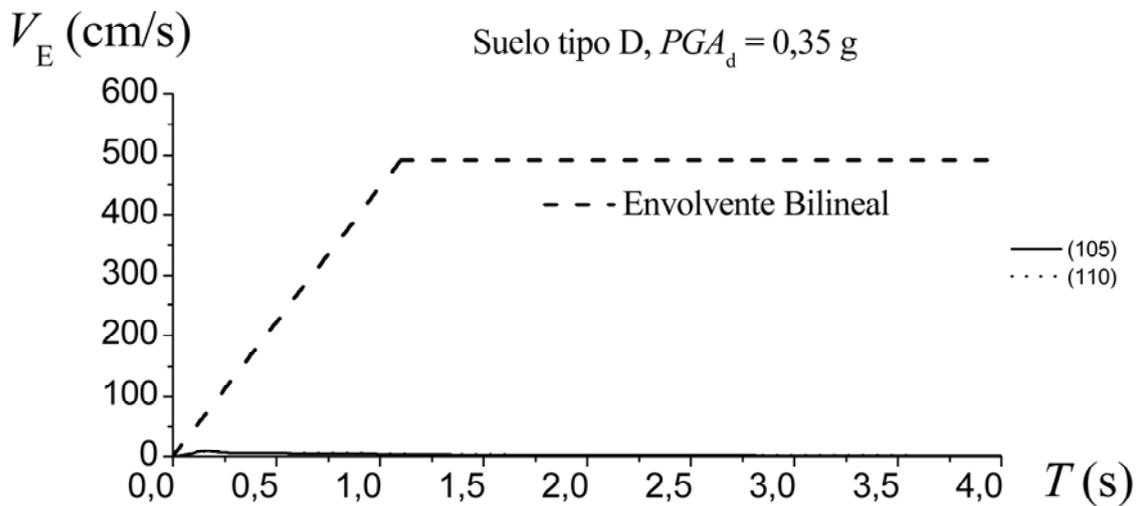


Figura 4.15. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,35$ g.

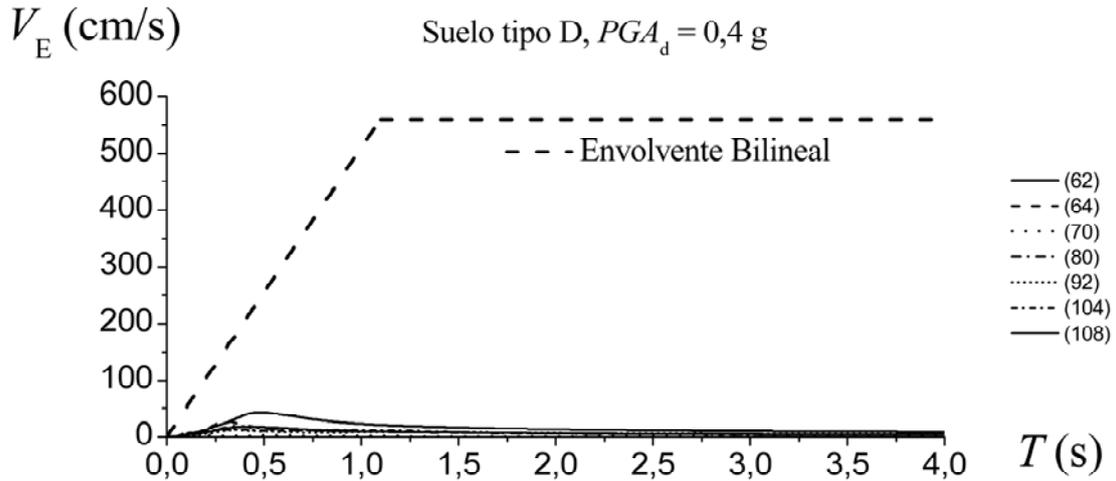


Figura 4.16. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,40$ g.

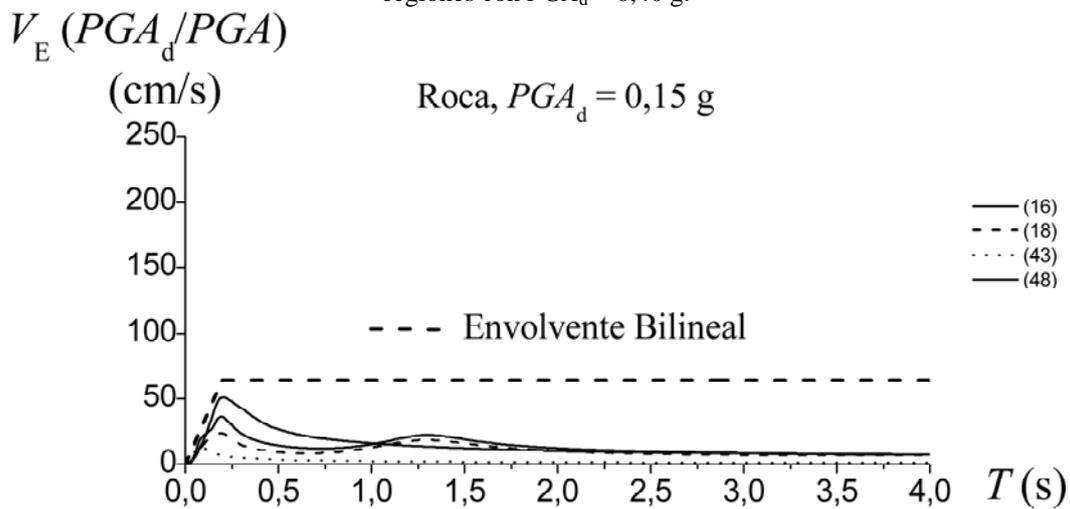


Figura 4.17. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,15$ g.

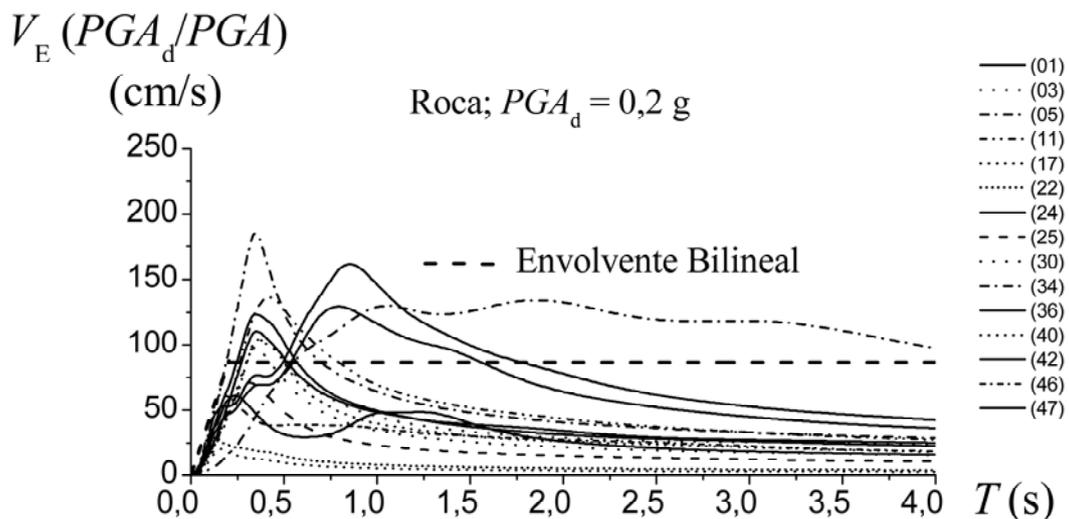


Figura 4.18. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,20$ g.

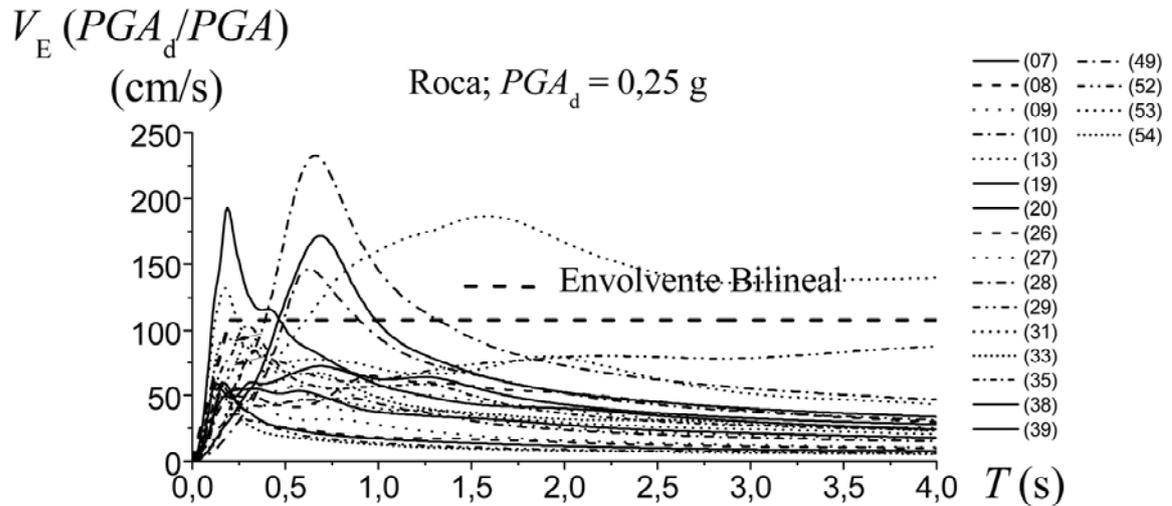


Figura 4.19. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,25$ g.

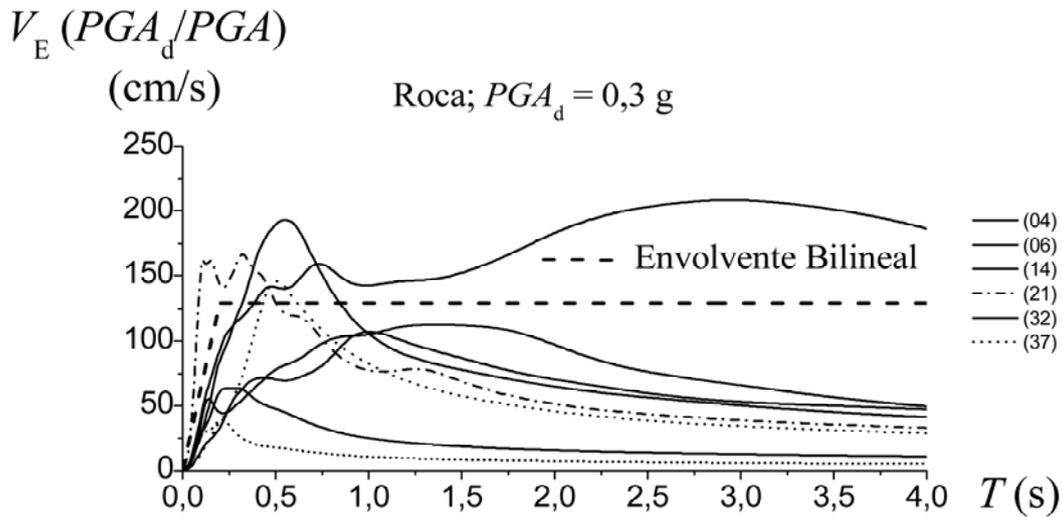


Figura 4.20. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,30$ g.

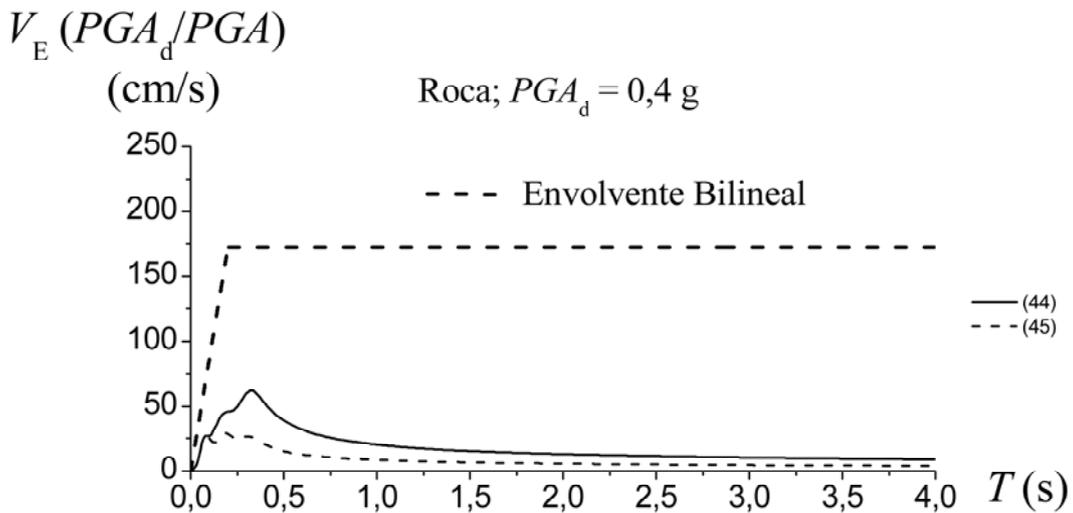


Figura 4.21. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en roca en regiones con $PGA_d = 0,40$ g.

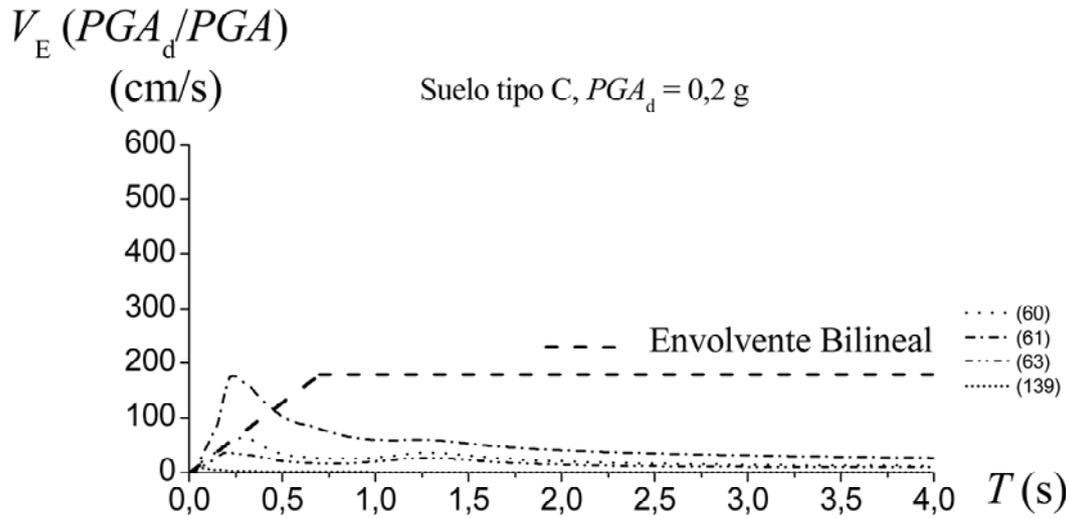


Figura 4.22. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,20$ g.

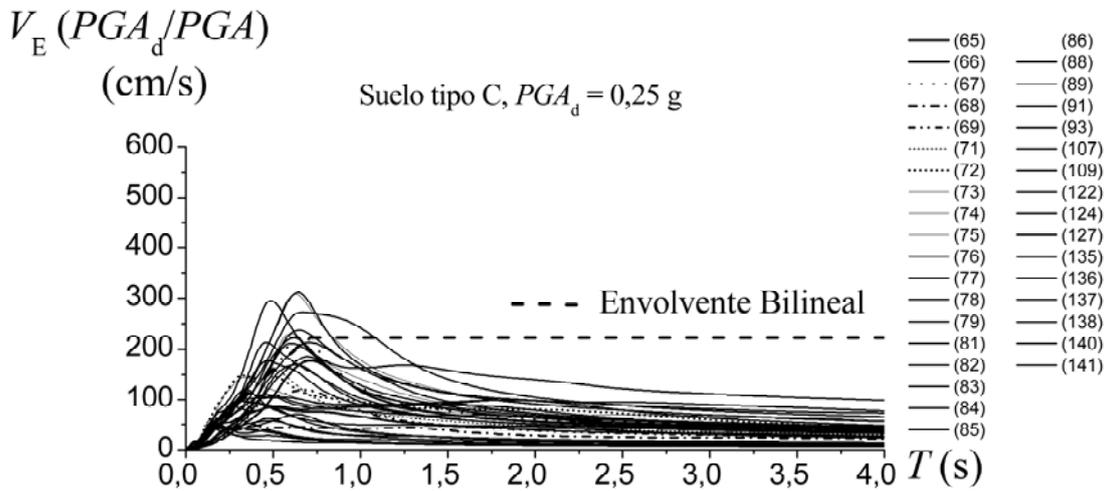


Figura 4.23. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,25$ g.

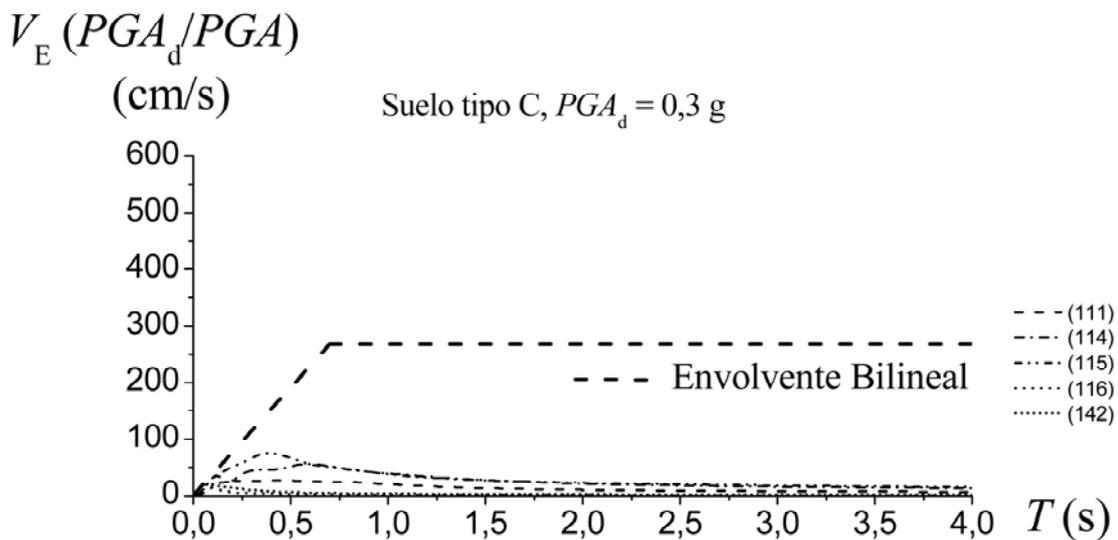


Figura 4.24. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,30$ g.

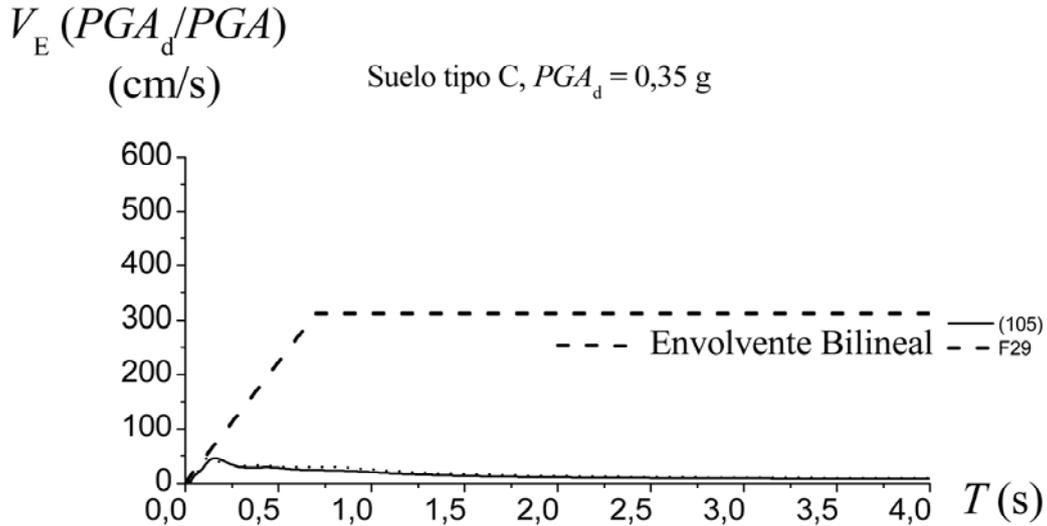


Figura 4.25. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,35$ g.

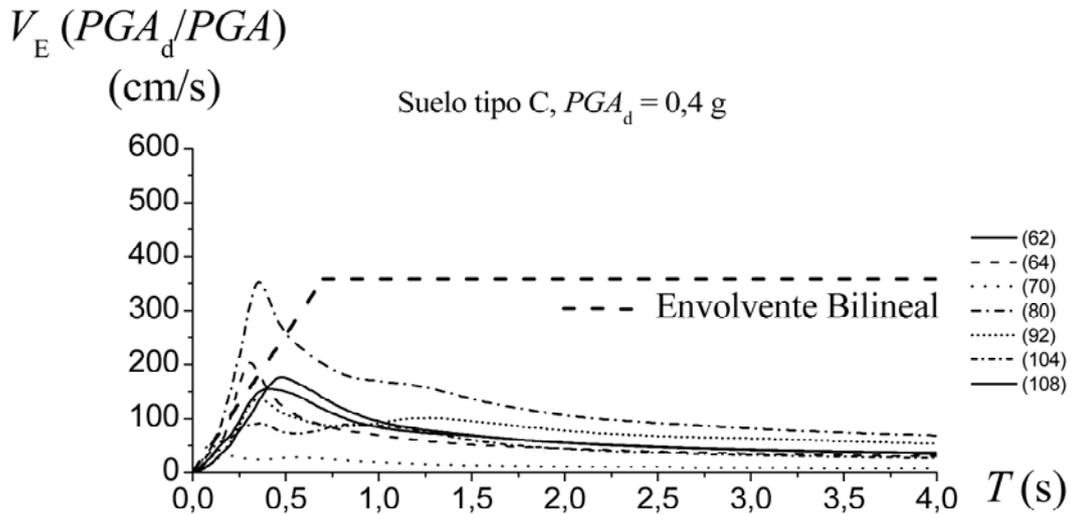


Figura 4.26. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en suelo C en regiones con $PGA_d = 0,40$ g.

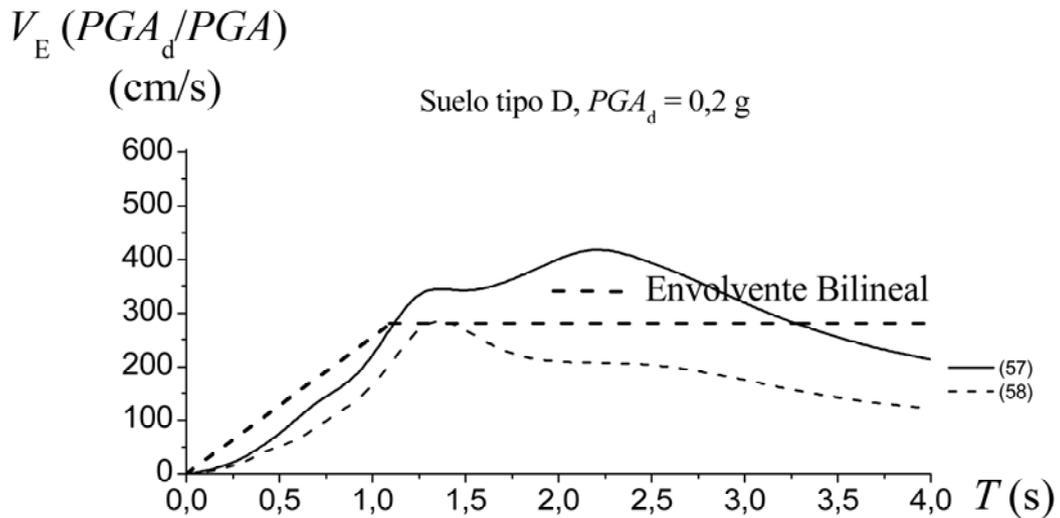


Figura 4.27. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,20$ g.

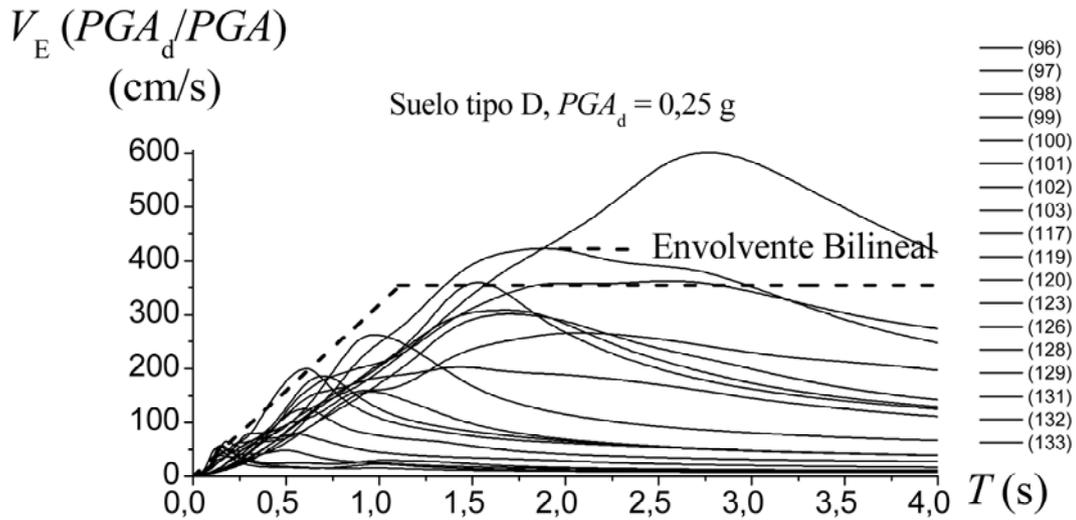


Figura 4.28. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,25$ g.

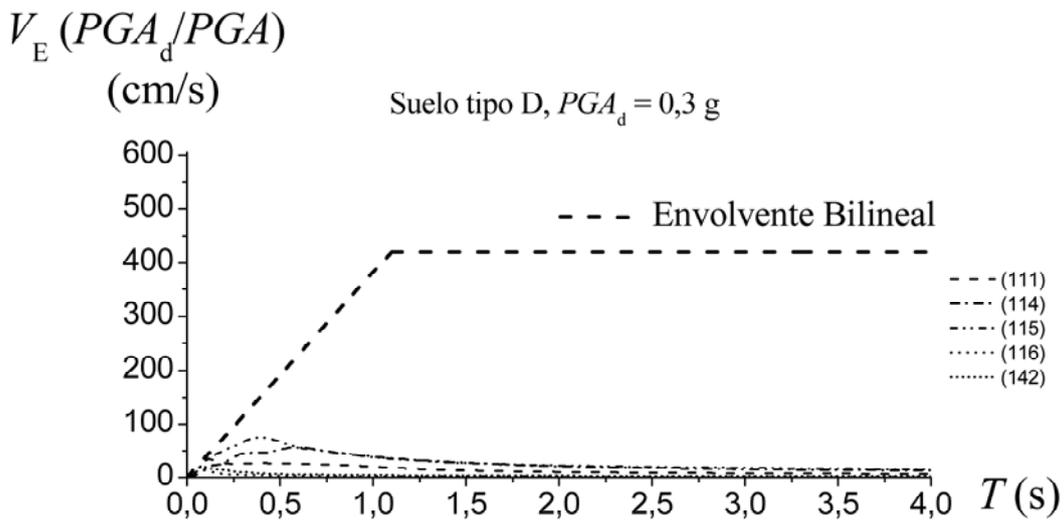


Figura 4.29. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,30$ g.

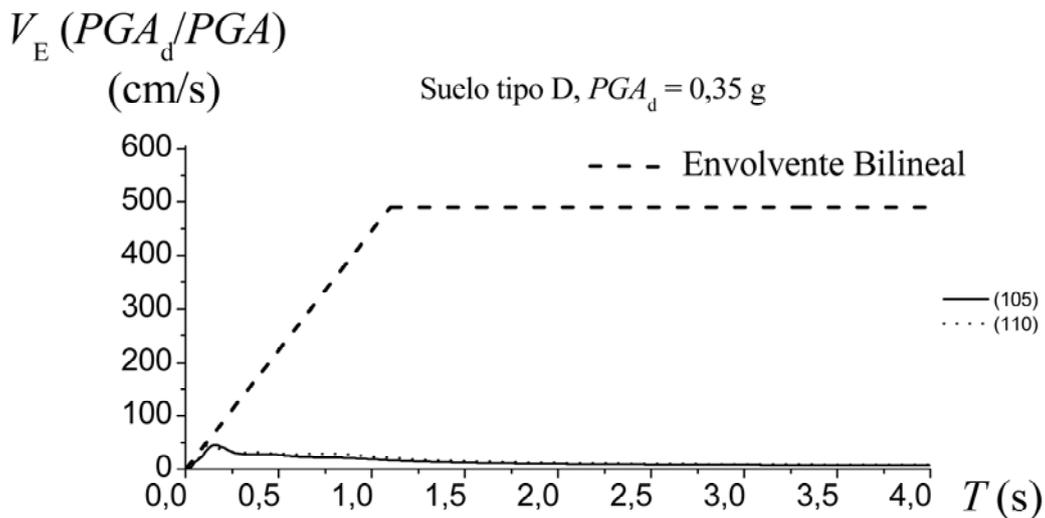


Figura 4.30. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,35$ g.

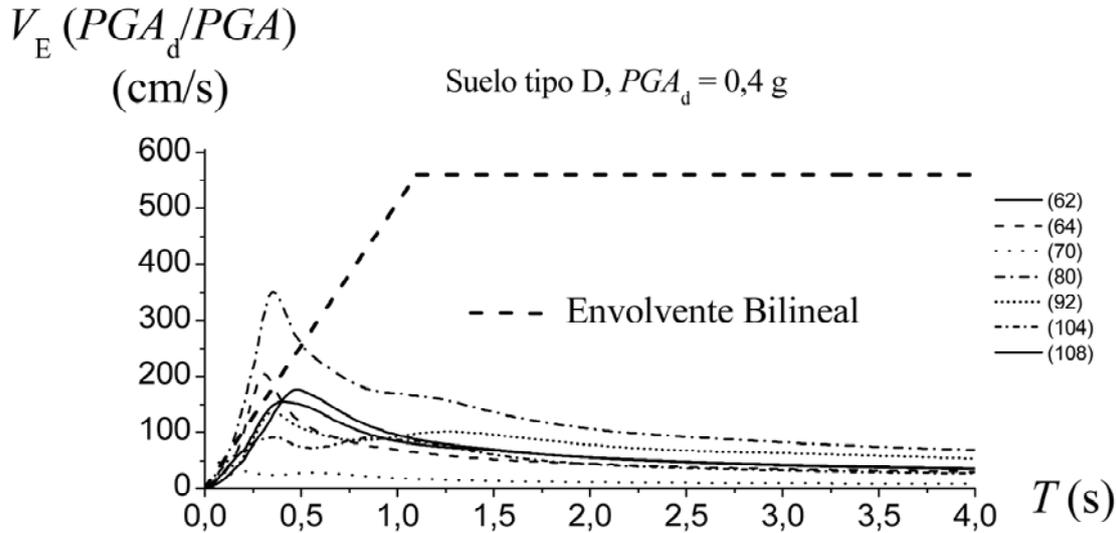


Figura 4.31. Espectros de energía de entrada V_E de movimientos sísmicos escalados a PGA_d y registrados en suelo D en regiones con $PGA_d = 0,40$ g.

Las numeraciones de los registros indicadas en las Figuras 4.2 a 4.31 corresponden a las Tablas 3.4 y 3.5.

4.3 Análisis no lineales

Se han llevado a cabo análisis en el tiempo no lineales para sistemas amortiguados de un grado de libertad con comportamiento elástico perfectamente plástico, sometidos a los registros de aceleración de las Tablas 3.4 y 3.5. Los parámetros considerados son el factor de amortiguamiento ξ ($= 0,02, 0,05, 0,10$), el período natural del sistema T (de 0,02 s a 4 s) y la ductilidad μ ($= 2, 3, 5, 10, 15, 20$). En estos análisis, los acelerogramas correspondientes a las direcciones NS y EW se consideraron por separado, por lo que el número de acelerogramas utilizado es $144 \times 2 = 288$. La obtención de espectros (para cada registro de aceleración) para valores fijos de μ requiere realizar análisis iterativos, en los que la fuerza de plastificación Q_y varía hasta alcanzar el valor de μ establecido como objetivo (con un 10% de tolerancia). Los principales resultados de estos análisis son la ductilidad acumulada η , la energía de entrada E_I y la energía contributiva al daño E_D . El número total de espectros obtenidos es de $288 \times 3 \times 6 = 5184$ ya que se consideran tres valores de amortiguamiento y 6 de ductilidad.

Para evaluar la validez del valor 1,2 de la pendiente propuesto por Akiyama para la obtención del primer segmento de sistemas de un grado de libertad (es decir, en los períodos cortos) -como se indica en el capítulo 2-, los resultados de los análisis no lineales correspondientes a los acelerogramas con una PGA mayor, fueron comparados con los resultados de los análisis lineales de la forma que se describe a continuación. En primer lugar se seleccionaron los espectros de respuesta V_E - T elásticos ($\mu = 1$) e inelásticos ($\mu > 1$) con $\xi = 0,05$ y con $\xi = 0,10$ de los diez registros (cinco de suelo y cinco de roca) que presentan valores máximos de V_E . Estos espectros corresponden a los registros en roca números 19, 20, 36, 39 y 42 (Tabla 3.4), y para los registros en suelo números 58, 66, 88 y 129 (Tabla 3.5); el registro 94 ha sido eliminado por corresponder a un movimiento impulsivo. En segundo lugar, los puntos (T_i, V_{Ei}) del espectro V_E - T en el rango $0 < T_i < T_G$ obtenidos para cada componente (N-S y E-W) de cada registro y para cada combinación de μ y ξ —estos puntos se refieren como “grupo de puntos” en lo sucesivo— se representaron en el espacio V_E - T . En tercer lugar, se ha realizado un análisis de regresión lineal pasando por el origen con cada grupo “grupo de puntos”; la pendiente de la línea de regresión se denota por $\bar{m}_{c\mu}$, donde el primer subíndice se identifica la superficie geológica ($c = r$ para roca y $c = s$ para suelo) y el segundo subíndice corresponde al valor de μ . En cuarto lugar, se calculó el valor máximo del cociente V_{Ei}/T_i dentro de cada “grupo de puntos” y se denotó por

$\hat{m}_{c\mu} = \max\{V_{Ei} / T_i\}$; este cociente proporciona la pendiente mínima de la línea que pasa por el origen y cubre todo el “grupo de puntos” (en el espacio V_E-T).

Las Figuras 4.32 a 4.35 muestran los cocientes $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$ para $\xi = 0,05$ y $\xi = 0,10$ y para roca y suelo, respectivamente. Dentro de cada gráfico hay dos curvas para cada registro, correspondiendo a las componentes N-S y E-W del mismo. Del mismo modo, las Figuras 4.36 a 4.39 muestran los cocientes $\hat{m}_{c\mu} / \hat{m}_{c1}$. Siguiendo la nomenclatura que se ha indicado anteriormente, \overline{m}_{c1} y \hat{m}_{c1} corresponden a los análisis lineales. La comparación de los gráficos de $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$ con los de $\hat{m}_{c\mu} / \hat{m}_{c1}$ muestra que estos cocientes presentan tendencias similares. Como se indica en el capítulo 2, Akiyama [Akiyama, 1999; Akiyama, 2003] supone que el límite superior del cociente $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$ es de 1,2 independiente del valor de μ . Sin embargo, las Figuras 4.32 a 4.39 indican que: (i) $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$ aumenta con μ y (ii) aproximadamente para $\mu > 3$ el aumento de la energía en términos de V_E debido a la plastificación es claramente superior al 20%. Dado que subestimar $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$ conduce a un proyecto sismorresistente no conservador, se expone a continuación una estimación más precisa de $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$.

Las curvas $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$ vs. μ representadas en las Figuras 4.32 a 4.35 pueden ser aproximadas por la siguiente ecuación:

$$\frac{\overline{m}_{c\mu}}{\overline{m}_{c1}} = p (\mu - 1) + \frac{1,3\mu^s}{0,3 + \mu^s} \quad (4.5)$$

El parámetro p toma el valor $p = 0,03$. El exponente s en la ecuación (4.5) depende del tipo de terreno. El valor de $s = 0$ proporciona una buena aproximación del valor medio del cociente $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$ tanto para roca como para suelo, y se representa con líneas de trazos cortos en las Figuras 4.32 a 4.35. Sin embargo, para fines de cálculo, se adopta una envolvente del cociente $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$ del lado de la seguridad (capítulo 5); los valores $s = 2,0$ para roca y $s = 0,3$ para suelo proporcionan una buena envolvente de las curvas del cociente $\overline{m}_{c\mu} / \overline{m}_{c1}$ vs. μ , ésta se representa con líneas de trazos en las Figuras 4.32 a 4.35. La ecuación (4.5) con los valores antes mencionados para p y s también proporciona una aproximación razonable para la envolvente del cociente $\hat{m}_{c\mu} / \hat{m}_{c1}$ vs. μ , ésta se representa con líneas de trazos gruesos en las Figuras 4.36 a 4.39.

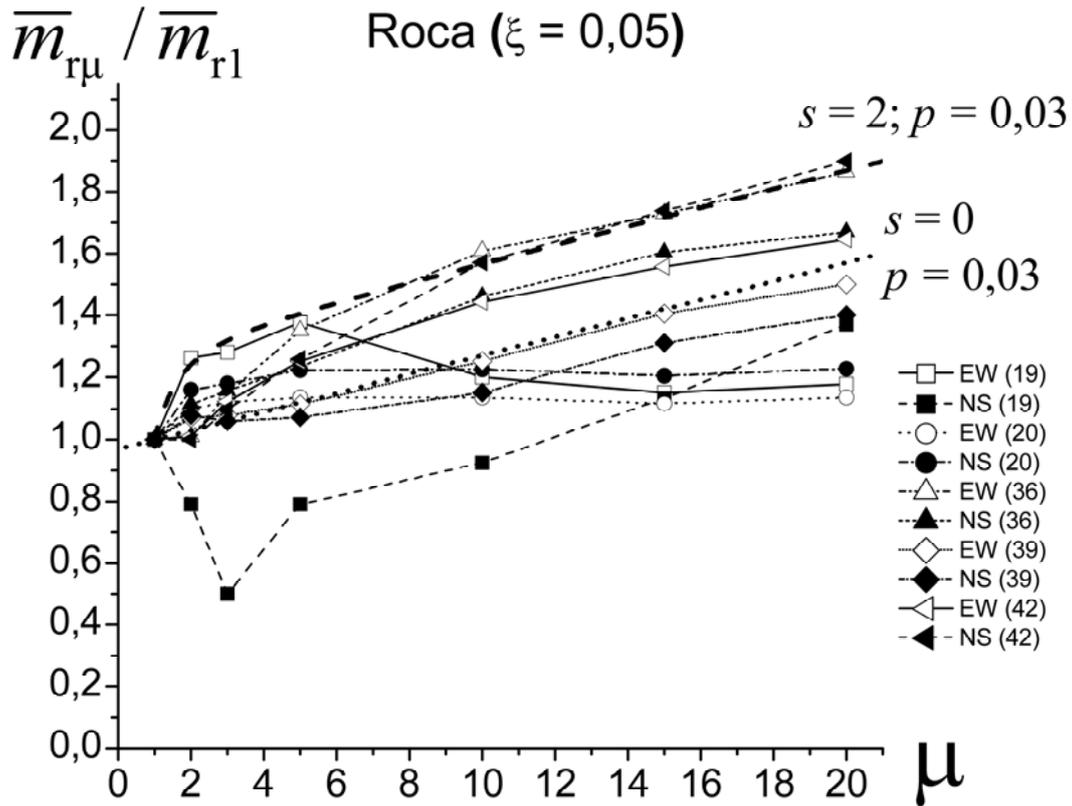


Figura 4.32. Variación respecto de μ de la pendiente media del primer segmento del espectro V_E para roca. $\xi = 0,05$.

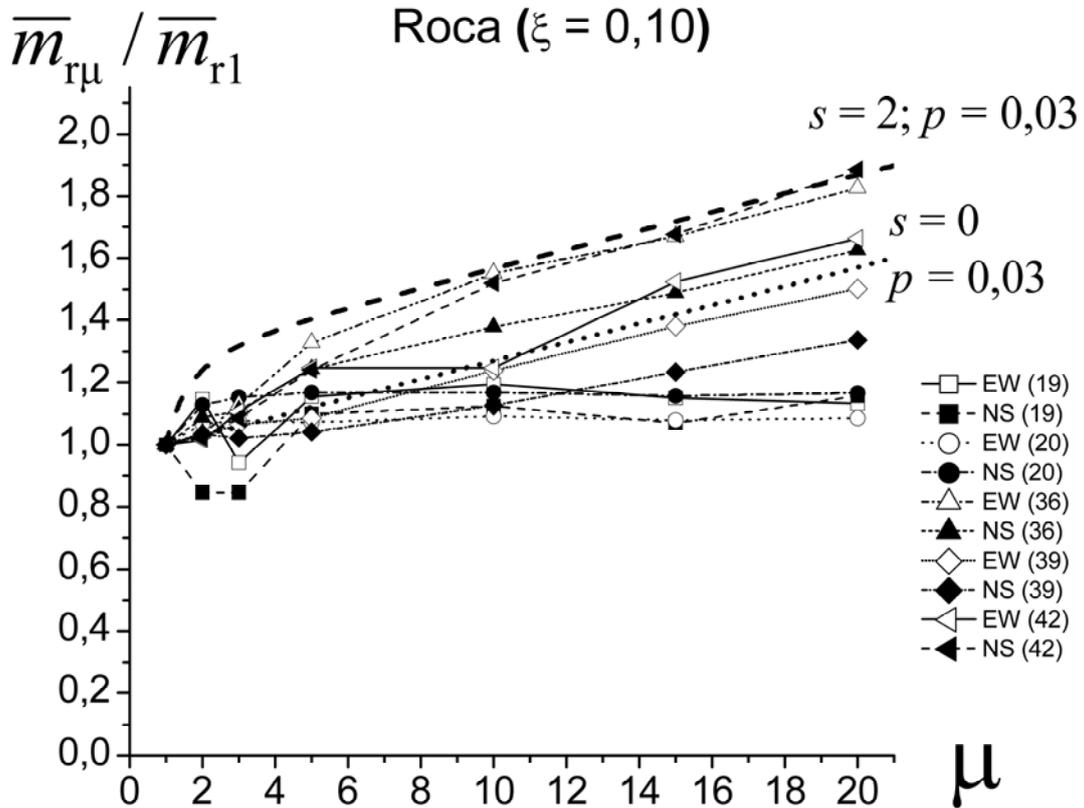


Figura 4.33. Variación respecto de μ de la pendiente media del primer segmento del espectro V_E para roca. $\xi = 0,10$.

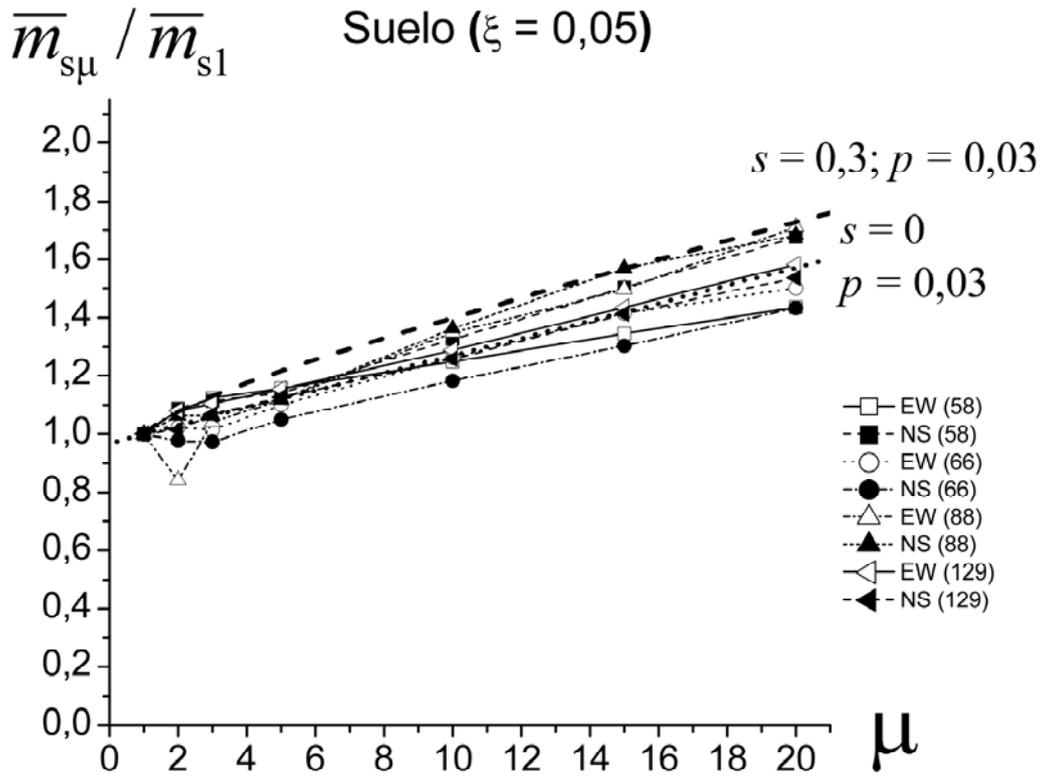


Figura 4.34. Variación respecto de μ de la pendiente media del primer segmento del espectro V_E para roca. $\xi = 0,05$.

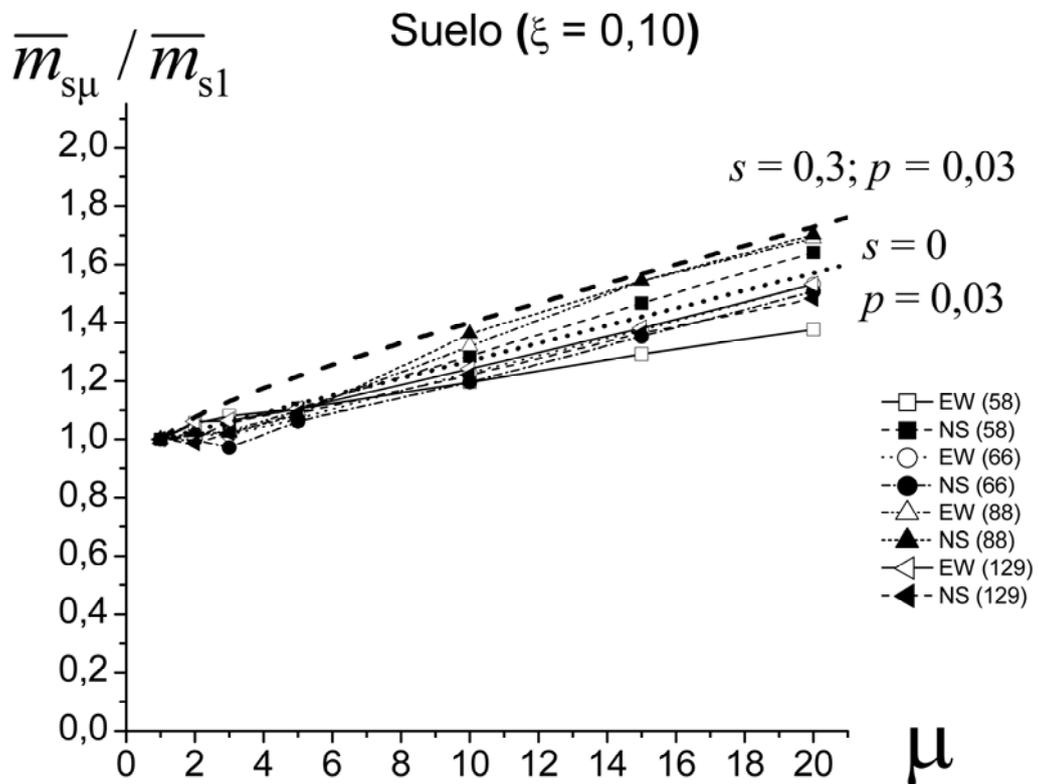


Figura 4.35. Variación respecto de μ de la pendiente media del primer segmento del espectro V_E para roca. $\xi = 0,10$.

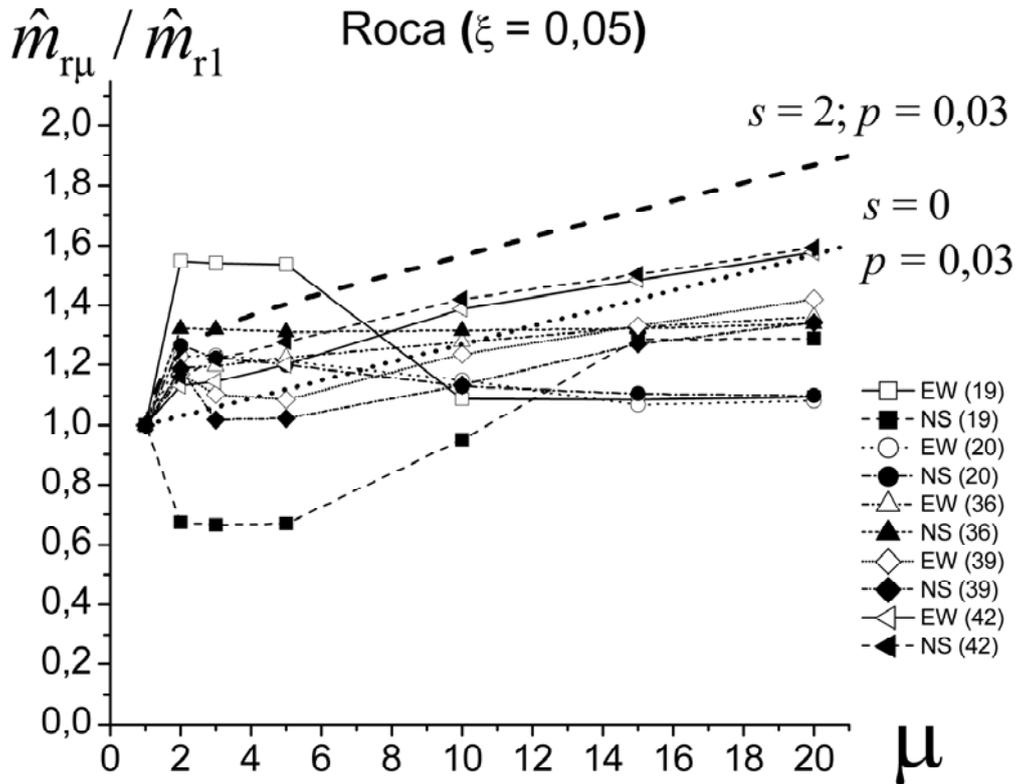


Figura 4.36. Variación respecto de μ de la pendiente máxima del primer segmento del espectro V_E para roca. $\xi = 0,05$.

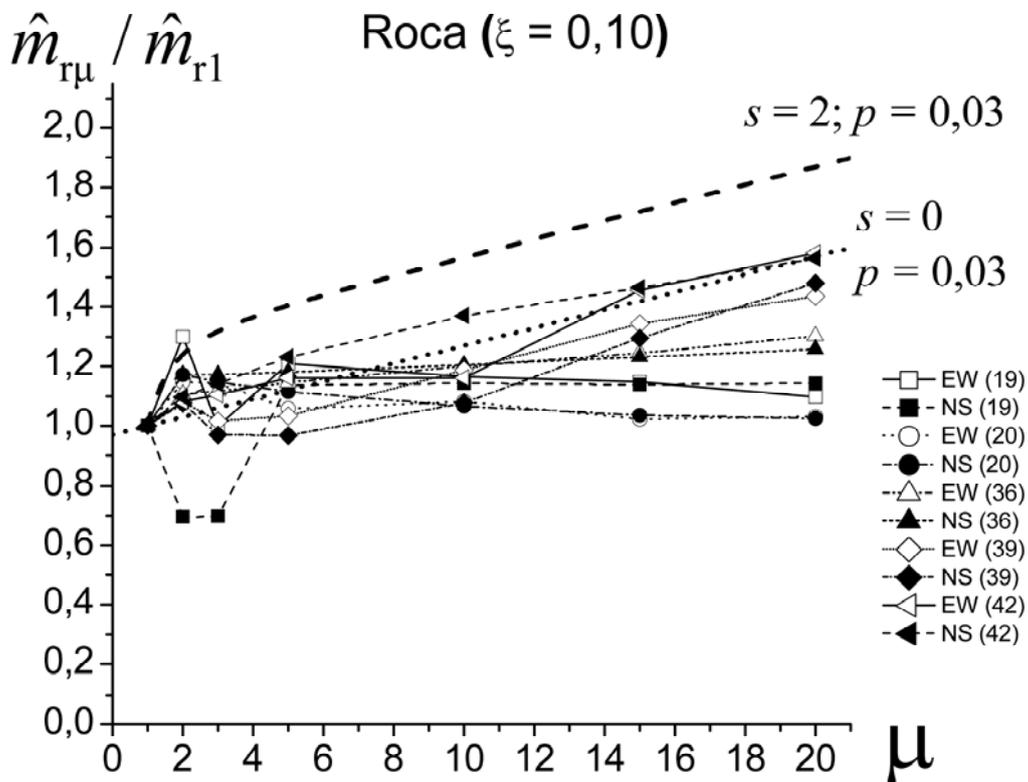


Figura 4.37. Variación respecto de μ de la pendiente máxima del primer segmento del espectro V_E para roca. $\xi = 0,10$.

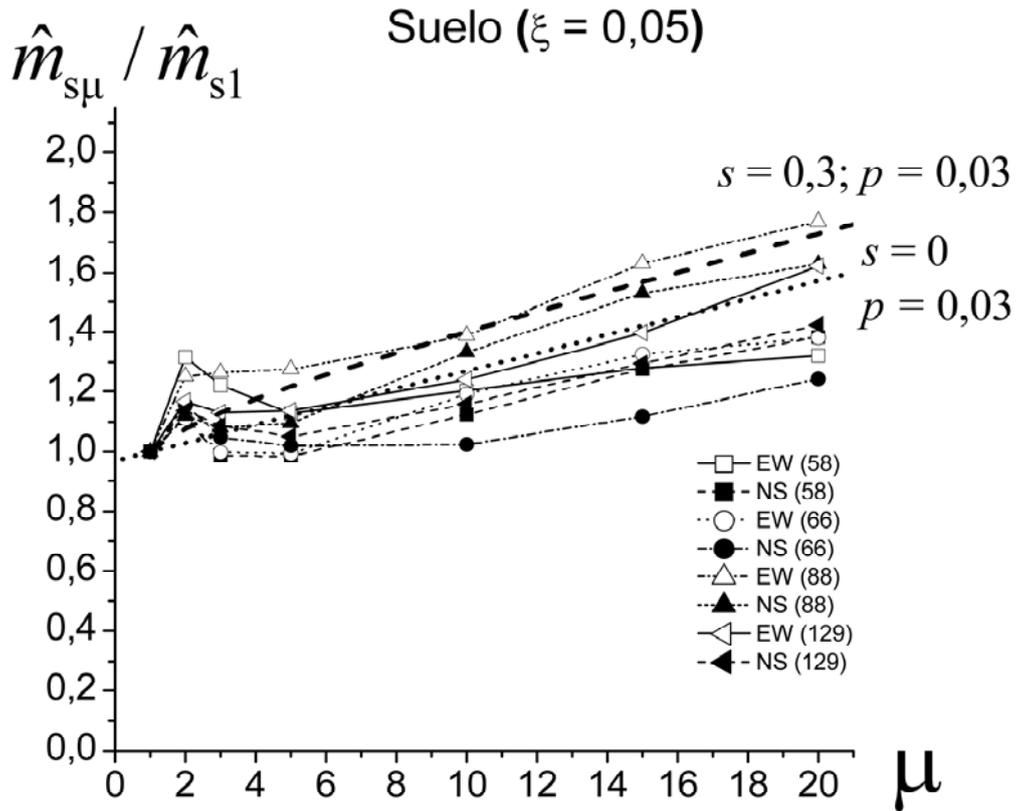


Figura 4.38. Variación respecto de μ de la pendiente máxima del primer segmento del espectro V_E para roca. $\xi = 0,05$.

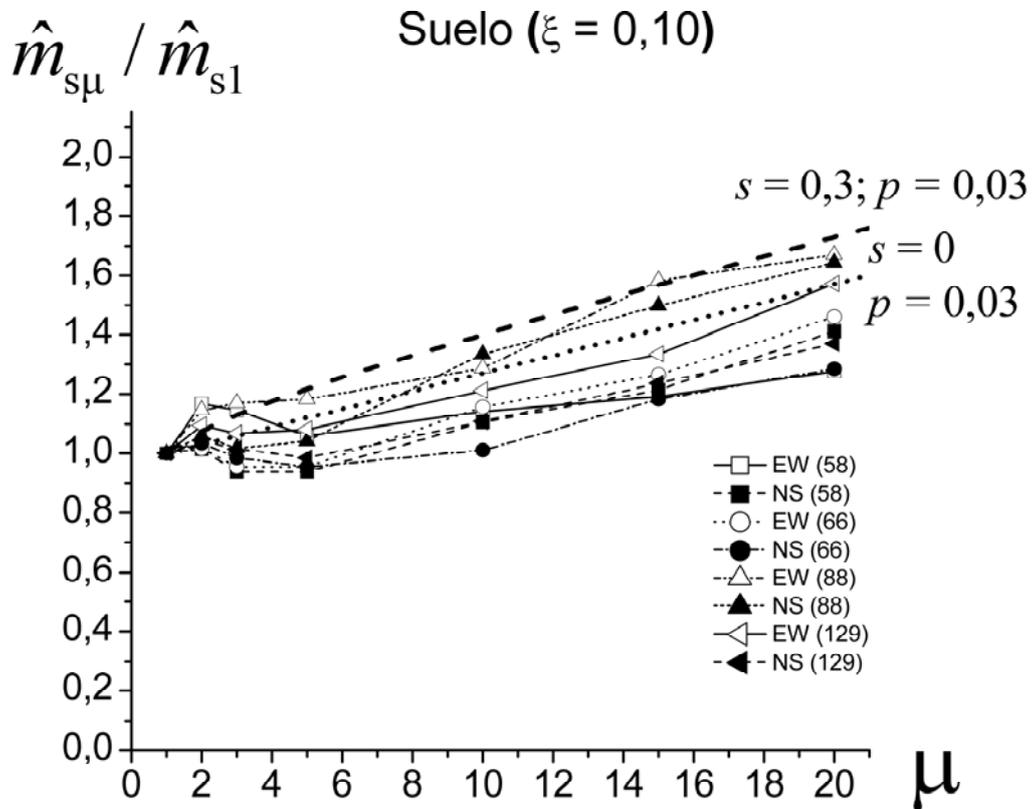


Figura 4.39. Variación respecto de μ de la pendiente máxima del primer segmento del espectro V_E para roca. $\xi = 0,10$.

4.4 Valoración de los resultados obtenidos

En este capítulo se presentan espectros de la energía en términos de velocidad V_E para los registros de las Tablas 3.4 y 3.5. Los resultados se presentan en las Figuras 4.2 a 4.16 agrupados en función del tipo de suelo (roca, suelo C y suelo D) y de la aceleración sísmica de proyecto estipulada por la normativa colombiana. La comparación con los espectros de proyecto (convertidos de aceleración a energía en términos de velocidad) muestra que la mayor parte de los registros disponibles se encuentran bastante por debajo. Por dicha razón en las Figuras 4.17 a 4.31 se representan espectros de la energía en términos de velocidad V_E para los registros de las Tablas 3.4 y 3.5 escalados hasta la aceleración sísmica de proyecto estipulada por la normativa colombiana.

Dado que (excepto para períodos cortos) los espectros de la energía en términos de velocidad V_E son, en términos generales, independientes del comportamiento histerético de la estructura, los espectros descritos en el párrafo anterior han sido obtenidos a partir de análisis lineales. Para obtener las pendientes de los tramos iniciales de los espectros se efectúan análisis no lineales a ductilidad constante considerando distintos valores de ésta y del amortiguamiento; el comportamiento estructural es bilineal con una rama plástica horizontal. Estos resultados se utilizan en el capítulo sexto para proponer expresiones empíricas del cociente entre la energía contributiva a daño y la energía introducida por el sismo (V_D/V_E).

5. Propuesta de espectros de energía de proyecto para Colombia

5.1 Consideraciones generales

Este capítulo constituye probablemente el núcleo principal de este trabajo. En él se presenta la propuesta de espectros de energía de proyecto para Colombia; ello es el objetivo principal del estudio. En el siguiente apartado se describen los espectros propuestos y en el tercer apartado se comparan éstos con otros espectros de proyecto.

5.2 Espectros propuestos

Los espectros se proponen para regiones de sismicidad media a moderada (como Colombia) y están basados en los registros de las Tablas 3.4 y 3.5. Se proponen tres tipos de espectro, según la naturaleza del terreno, clasificando a éste como roca, suelo tipo C y suelo tipo D. Estos tres espectros son bilineales, presentando una rama inicial creciente y pasando por el origen y una rama posterior horizontal; la intersección entre ambas ramas se encuentra sobre el período T_G .

La propuesta presentada en este apartado se obtiene reemplazando el valor del cociente $\bar{m}_{cu} / \bar{m}_{cl}$ indicado en la ecuación (4.5) en las ecuaciones (4.2) a (4.4) para modificar la pendiente de las ramas iniciales de los espectros descritos por dichas relaciones. A continuación se describen los espectros propuestos.

Para roca:

$$T \leq T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 2,2q \left[p(\mu - 1) + \frac{1,3\mu^s}{0,3 + \mu^s} \right] T \quad T > T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 0,44q \quad (5.1a)$$

Para suelo de tipo C:

$$T \leq T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 1,3q \left[p(\mu - 1) + \frac{1,3\mu^s}{0,3 + \mu^s} \right] T \quad T > T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 0,91q \quad (5.1b)$$

Para suelo de tipo D:

$$T \leq T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 1,3q \left[p(\mu - 1) + \frac{1,3\mu^s}{0,3 + \mu^s} \right] T \quad T > T_G: \frac{V_E}{PGA_d} = 1,43q \quad (5.1c)$$

En estas relaciones el período T_G para roca se obtiene de la siguiente expresión:

$$T_G = \frac{0,44}{2,2 \left[p(\mu - 1) + \frac{1,3\mu^s}{0,3 + \mu^s} \right]} \quad (5.2a)$$

En suelo tipo C el período T_G se obtiene de la siguiente expresión:

$$T_G = \frac{0,70}{1,3 \left[p(\mu - 1) + \frac{1,3\mu^s}{0,3 + \mu^s} \right]} \quad (5.2b)$$

En suelo tipo D el período T_G se obtiene de la siguiente expresión:

$$T_G = \frac{1,1}{1,3 \left[p(\mu - 1) + \frac{1,3\mu^s}{0,3 + \mu^s} \right]} \quad (5.2c)$$

Los parámetros p y q deben tomar los valores $p = 0,03$ y $q = 1$. Respecto del parámetro s , se puede adoptar $s = 0$ a efectos de proyecto. La Figura 5.1 muestra los espectros propuestos para el caso particular en que $\mu = 5$.

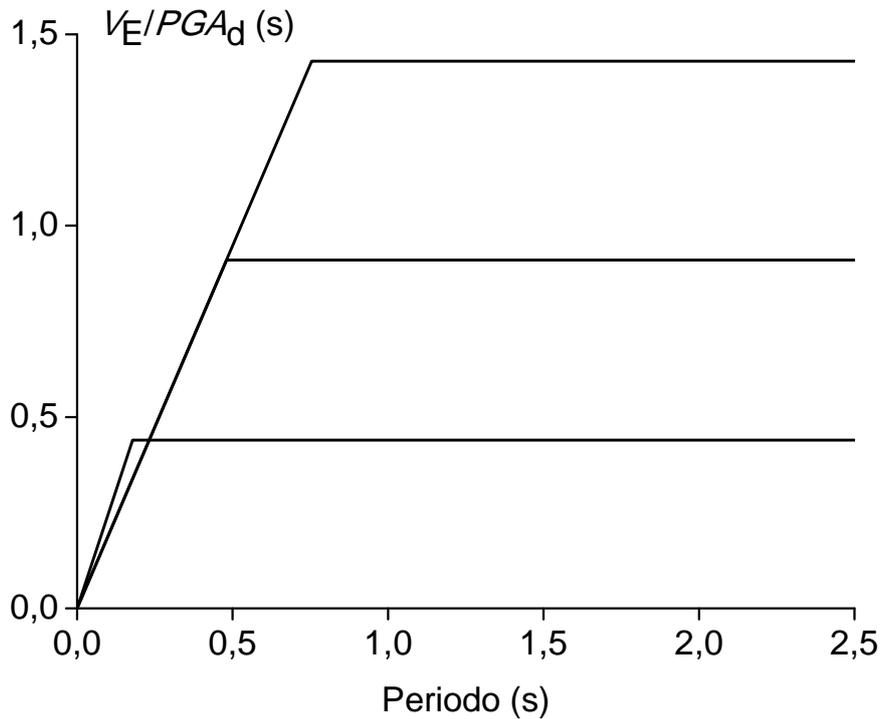


Figura 5.1. Espectros de energía propuestos

La rama creciente del espectro propuesto es conservadora para los espectros no escalados de V_E en las Figuras 4.2, 4.3, 4.5, 4.6, 4.10, 4.11, 4.12 y de la 4.12 a la 4.16. Sin embargo, se encuentra bastante próxima a los espectros individuales de V_E en otros casos como los mostrados en las Figuras 4.4, 4.7 y 4.8 o para la mayor parte de los espectros de V_E escalados a PGA_d mostrados en las Figuras 4.17 a 4.31.

5.3 Comparación con otros espectros de proyecto

En este apartado se comparan los espectros de energía propuestos en este estudio para regiones de moderada a alta sismicidad basados en movimientos de tierra colombianos con los implícitos en la NSR-98 [NSR-98, 1998] (actual código sísmico de Colombia) y con los propuestos para España, Irán, Grecia y Japón. Estos países son representativos de regiones con diferente riesgo sísmico: de baja a moderada sismicidad (España), de moderada a alta sismicidad (Irán, Grecia, Colombia) y de alta a muy alta sismicidad (Japón). Estas diferencias en la sismicidad deben tenerse en cuenta al comparar los espectros de proyecto de energía.

5.3.1. Normativa Colombiana

Los espectros de energía V_E-T implícitos en el actual código sísmico de Colombia NSR-98 [NSR-98, 1998] pueden estimarse aproximadamente a partir de los espectros elásticos de respuesta de aceleración absoluta establecidos por dicho Código para sistemas de un grado de libertad (SDOF) con amortiguamiento $\xi = 0,05$. Se parte de las siguientes consideraciones:

- Sobre el valor del amortiguamiento mostrado por las estructuras reales (es decir, $\xi \leq 0,10$), la aceleración espectral absoluta S_a de un sistema elástico amortiguado de un grado de libertad (SDOF) está relacionada con la pseudo-velocidad espectral de respuesta, S_{pv} , por la expresión $S_a = \omega S_{pv}$ (ecuación (2.6) y referencia [Clough, Penzien, 1993]), donde $\omega = 2\pi/T$ es la frecuencia angular.
- A excepción de la zona períodos muy largos, el espectro de velocidad espectral relativa S_v y el pseudo-espectro de velocidad espectral relativa S_{pv} difieren poco [Clough, Penzien, 1993].
- En los períodos medianos y largos (es decir, $T > T_G$), el espectro S_v está muy próximo al espectro de V_D [Housner, 1956].
- En el rango de períodos cortos, el segmento que define el espectro de energía de entrada de proyecto puede estimarse multiplicando la pendiente de la línea inicial del espectro S_v por el cociente $\bar{m}_{cu} / \bar{m}_{c1}$ dado por la ecuación (4.5).
- V_E se puede estimar a partir de V_D mediante la ecuación (6.1).

En las ecuaciones (5.1), (5.2) y (6.1) los siguientes valores representativos de μ y η pueden ser adoptados: $\mu = 5$ y $\eta = 15$. Los espectros obtenidos de esta manera se comparan en la Figura 5.2 con los propuestos en este estudio.

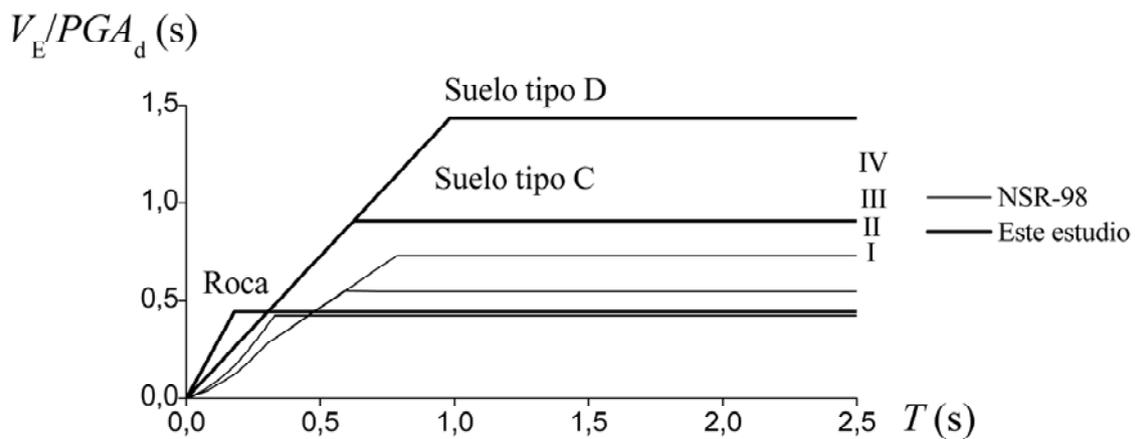


Figura 5.2. Comparación de los espectros de energía propuestos con los del código sismorresistente de Colombia [NSR-98, 1998].

Se puede observar en la Figura 5.2 que en todo el rango del período la propuesta de espectros de energía de entrada de proyecto están por encima de los implícitos en el código NRS-98.

5.3.2. Espectros propuestos para España

En la Figura 5.3 se muestra con línea delgada el espectro de energía de entrada de proyecto propuesto para España para dos tipos de terreno, suelo duro y suelo blando, que pueden ser más o menos similares a roca y suelo, respectivamente, en el contexto de este estudio. Como era de esperar debido a la sismicidad diferente de las dos regiones, la demanda de V_E propuesto para Colombia es aproximadamente dos veces mayor que la propuesta para España en el rango de períodos medianos y largos; en el rango de períodos cortos, la diferencia no es grande.

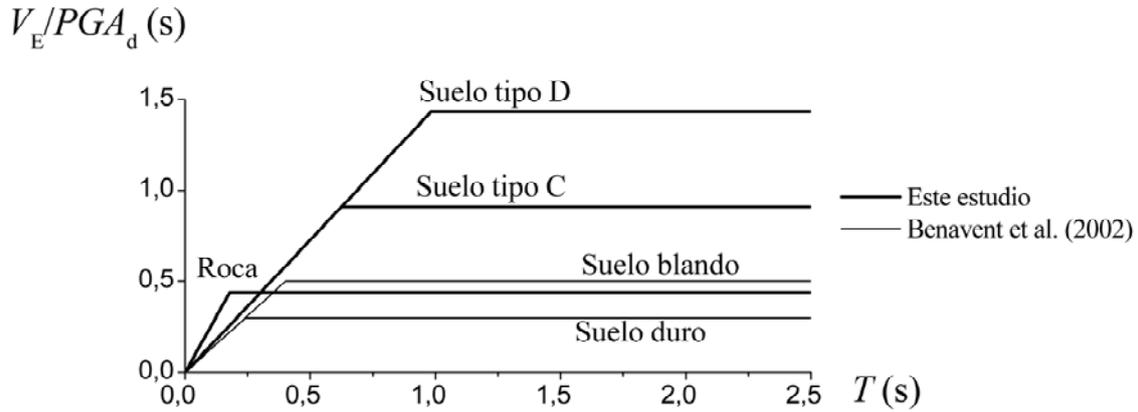


Figura 5.3. Comparación de los espectros de energía propuestos en este trabajo con los propuestos para España [Benavent-Climent et al., 2002].

5.3.3. Espectros propuestos para Irán

La Figura 5.4 muestra los espectros de energía de entrada de proyecto, propuestos en la referencia [Amiri et al., 2008] basados en 110 terremotos de Irán. Cabe señalar que la pendiente de la primera parte de los espectros (es decir, la V_E en el rango de período corto) coincide con la propuesta para suelo en este estudio. Sin embargo, en el rango de períodos medianos y largos en el caso de suelo, y en todo el rango en el caso de roca, los niveles de V_E propuestos para Irán son levemente inferiores a los propuestos en este estudio, aunque ambas regiones (Colombia e Irán) tienen riesgo sísmico de moderado a alto.

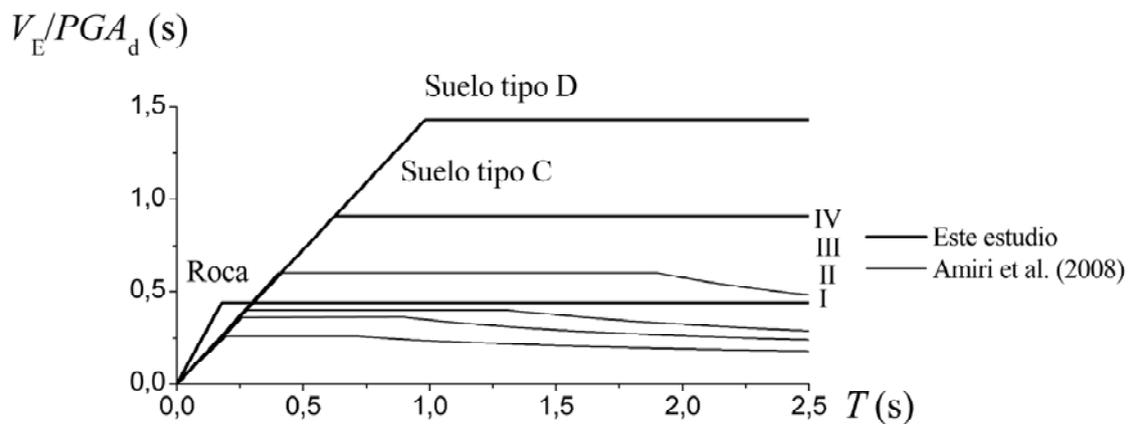


Figura 5.4. Comparación de los espectros de energía propuestos en este trabajo con los propuestos para Irán [Amiri et al., 2008].

5.3.4. Espectros propuestos para Japón

La Figura 5.5 muestra, con líneas delgadas, los espectros de energía de entrada de proyecto propuestos por Akiyama [Akiyama, 1999; Akiyama, 2003] para Japón, teniendo en cuenta cuatro tipos de terreno (I, II, III y IV), que coinciden a grandes rasgos con los que se definen en el capítulo 2. El gráfico también traza con líneas discontinuas el espectro de energía de entrada de proyecto implícito en el código sísmico japonés actual BSL [BSL, 2009], obtenido mediante la aplicación de las mismas consideraciones hechas en el subapartado 5.3.1).

El Código BSL [BSL, 2009] clasifica al terreno en tres tipos: “suelo 1” es roca, grava dura y depósitos pre-terciarios; “suelo 3” incluye las capas de relleno aluvial que consisten principalmente en terreno vegetal y limo con más de 30 m de profundidad o en relleno de más de 3 metros de profundidad y que ha sido consolidada durante los últimos 30 años; “suelo 2” comprende las capas que no corresponden a los tipos 1 y 3.

Como se observa en la Figura 5.5, los espectros propuestos por Akiyama [Akiyama, 1999; Akiyama, 2003] están por encima de los niveles propuestos en este estudio en el rango de períodos medianos y largos. Sin embargo, los espectros implícitos en el código japonés caen dentro del espectro propuesto en este estudio para roca y suelo de tipo C.

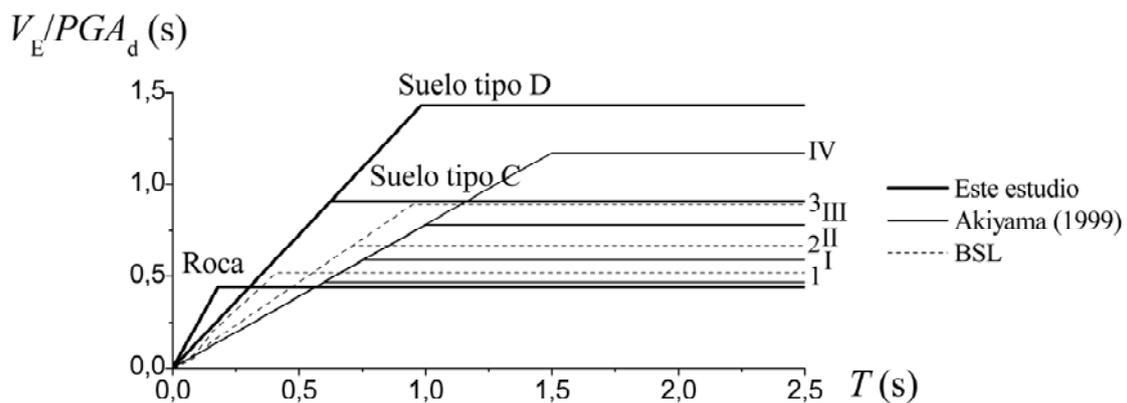


Figura 5.5. Comparación de los espectros de energía propuestos en este trabajo con los propuestos para Japón.

5.3.5. Espectros propuestos para Grecia

La Figura 5.6 muestra los espectros propuestos V_E en [Tselentis et al., 2010] para seis ciudades en Grecia, aplicando una metodología diferente de la utilizada en este estudio. Estos autores adoptan el enfoque probabilístico desarrollado originalmente en [Cornell, 1968] y extendido más tarde en [Esteva, 1970]. A efectos de comparación, los espectros V_E-T fueron normalizados por la PGA_d prescrita en el vigente Código sísmico griego [EAK-2000]. Cada ciudad tiene una PGA_d diferente (= 0,16 g para Atenas y Tesalónica; 0,24 g para Patras, Corinto y Chaniá, y 0,36 g para Argostolion), que varía aproximadamente en el mismo rango que en el código sísmico de Colombia (es decir, de 0,15 g a 0,40 g). Como se observa en la Figura 5.6, los espectros propuestos en [Tselentis et al., 2010] para dichas ciudades se ajustan bastante bien a los espectros desarrollados en este estudio para roca y suelo de tipo C; para suelo tipo 3 en el rango de períodos cortos casi coinciden con los espectros propuestos. Esta coincidencia es coherente con el hecho de que ambas regiones se considera que tienen una sismicidad de moderada a alta.

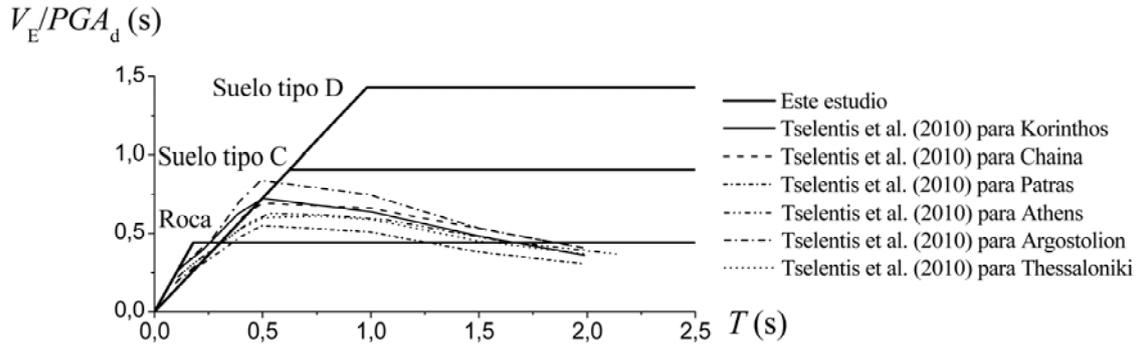


Figura 5.6. Comparación de los espectros de energía propuestos en este trabajo con los propuestos para Grecia.

5.3.6. Otros espectros

En el trabajo [Decanini, Mollaioli, 2001] se propusieron las configuraciones generales de los espectros de energía de entrada de proyecto de la Figura 2.20, los cuales se normalizaron por el factor de amenaza sísmica AE_T . En el trabajo [Decanini, Mollaioli, 2001] se propusieron diferentes valores para AE_T dependiendo de las condiciones del terreno, de la magnitud de onda superficial M_S y de la distancia epicentral D_f . La mayoría de los terremotos de las Tablas 3.4 y 3.5 tienen una distancia epicentral $D_f > 30$ km y sus magnitudes locales M_L están en el rango $6,1 \leq M_L \leq 6,8$, que corresponde aproximadamente en términos de magnitud de onda superficial a $6,5 \leq M_S \leq 7,1$ [Utsu, 2002]. Para $D_f > 30$ km y $6,5 \leq M_S \leq 7,1$, Decanini y Mollaioli [Decanini, Mollaioli, 2001] propusieron $AE_T = 6000$ cm^2/s para suelo clase S1 (roca), $AE_T = 15000$ cm^2/s para suelo clase S2 (suelo intermedio) y $AE_T = 55000$ cm^2/s para suelo clase S3 (suelo blando). El espectro de energía de entrada de proyecto obtenido mediante la sustitución de los valores de AE_T en la Figura 5.7 y los valores de los parámetros de a , p , k , T_1 y T_2 para $\mu = 1$ considerados por Decanini y Mollaioli [Decanini, Mollaioli, 2001] se representan en la Figura 5.7, normalizados por la PGA . El valor de la $PGA = 242$ cm/s^2 utilizado para esta normalización se estimó con la ley de atenuación propuesta en [McGuire, 1974], para $M_s = 7,1$ y $D_f = 30$ km y coincide con la PGA_d establecida por el código sísmico de Colombia para la región donde se registraron la mayoría de los registros utilizados en este estudio ($= 0,25$ g). En la Figura 5.7 se representan con líneas gruesas continuas los espectros de energía de entrada de proyecto, propuestos en este estudio. Se puede ver en la Figura 5.7 que los valores máximos de los espectros de energía propuestos en [Decanini y Mollaioli, 2001] y los propuestos en este estudio son bastante parecidos para roca y aún más para suelo de tipo C. La principal diferencia entre las dos propuestas objeto de comparación es que en [Decanini y Mollaioli, 2001] se considera una rama decreciente en la zona de períodos medianos y largos, mientras que en el espectro propuesto en este estudio la energía de entrada permanece constante después de alcanzar su valor máximo. Debido al limitado número de registros con grandes valores de energía V_E registrados en Colombia, se consideró más apropiado (es decir, del lado de la seguridad) adoptar un amplio espectro de proyecto bilineal con un segundo segmento plano. Como puede verse en las Figuras 4.2 a 4.16, a pesar de los bajos niveles de V_E , muchos de los espectros tienen una forma casi plana en el rango de períodos de interés. La posibilidad de que se presenten terremotos con similares espectros V_E-T y valores máximos de V_E no puede ser descartada. La elección del período desde el cual debe empezar a disminuir el espectro V_E-T no es una decisión fácil y se deja para estudios futuros.

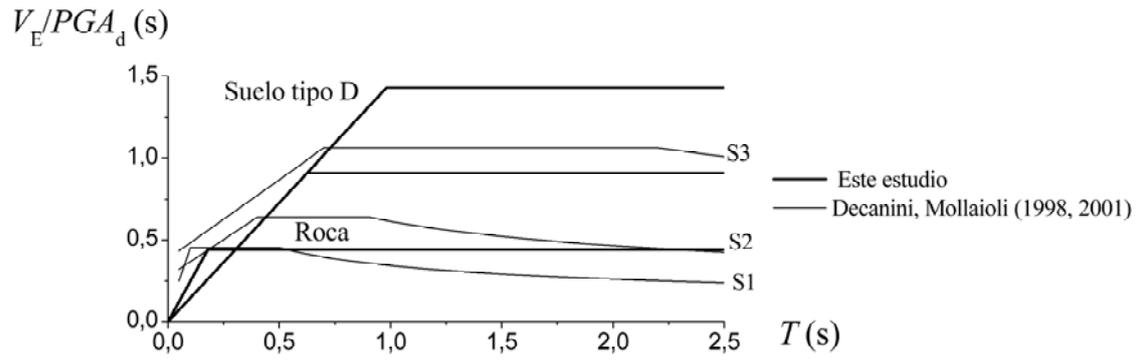


Figura 5.7. Comparación de los espectros de energía propuestos en este trabajo con los propuestos en [Decanini, Mollaioli, 2001].

6. Energía histerética

6.1 Consideraciones generales

En este capítulo se propone una nueva expresión empírica para estimar el cociente entre la energía que contribuye al daño en términos de velocidad (V_D) y la energía introducida por el sismo también en términos de velocidad (V_E). En el siguiente apartado se presenta el cálculo de la energía histerética en los espectros obtenidos en el capítulo 4 (para los registros de las Tablas 3.4 y 3.5). En el último apartado se propone la nueva expresión empírica y se discute su exactitud comparándola con las expresiones propuestas previamente.

6.2 Cálculo de la energía histerética en los espectros obtenidos

La evaluación de la energía E_I esperada en una determinada región —tal como se ha efectuado en el capítulo 4— es un buen punto de partida, adoptado por diferentes investigadores, para desarrollar y aplicar los métodos de cálculo sismorresistente basado en criterios de energía. Sin embargo, vale la pena recordar que sólo E_D —o la energía histerética $E_H \approx E_D$ —, representando un porcentaje de la energía E_I , se relaciona directamente con el daño sísmico en la estructura y, por tanto, necesita ser determinada [Manfredi, 2001]. La evaluación del cociente V_D/V_E constituye el segundo objetivo del análisis no lineal presentado en el capítulo 4. Las Figuras 6.1 a 6.6 representan la relación entre V_D/V_E y la ductilidad acumulada η , para roca y suelo y para diferentes valores del factor de amortiguamiento ξ .

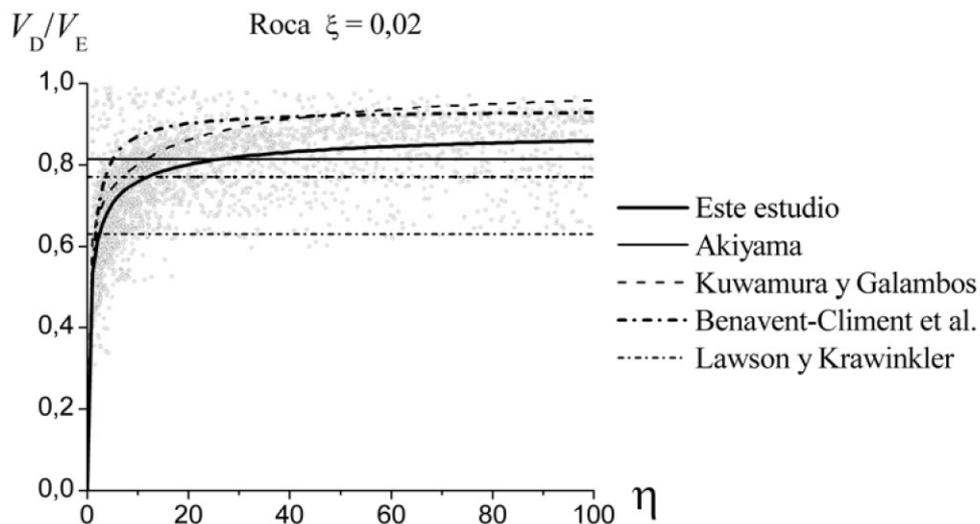


Figura 6.1. Valor del cociente V_D/V_E para diferentes amortiguamientos y geología superficial roca $\xi = 0,02$.

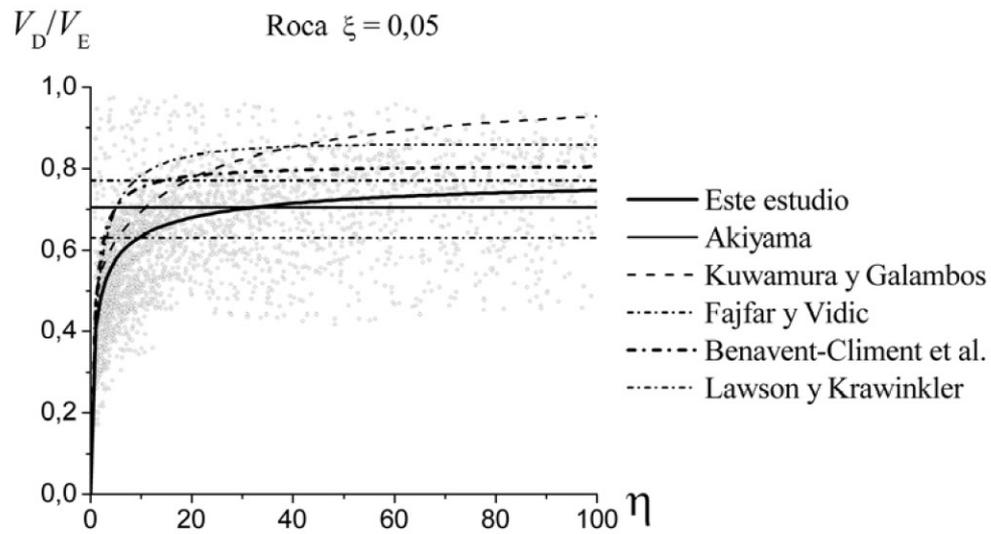


Figura 6.2. Valor del cociente V_D/V_E para diferentes amortiguamientos y geología superficial roca $\xi = 0,05$.

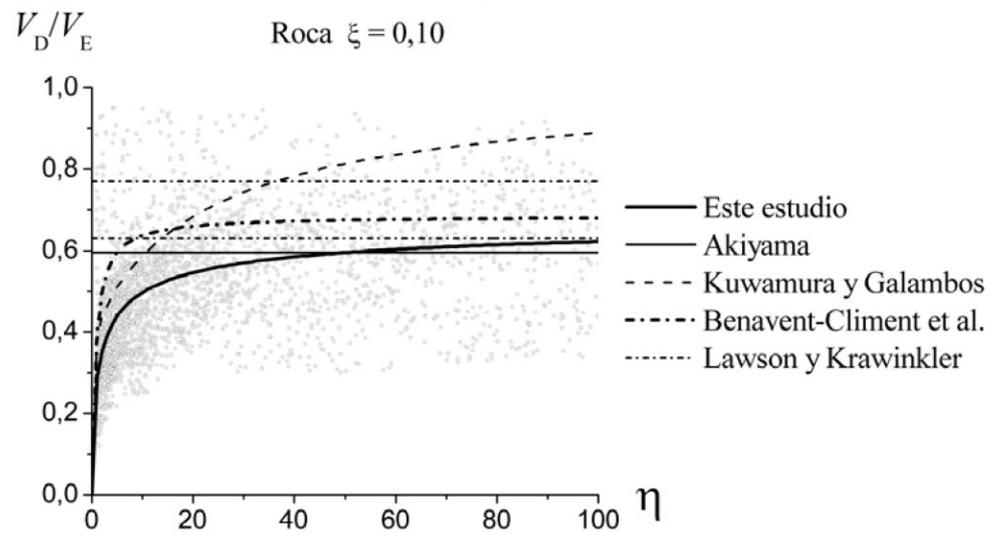


Figura 6.3. Valor del cociente V_D/V_E para diferentes amortiguamientos y geología superficial roca $\xi = 0,1$.

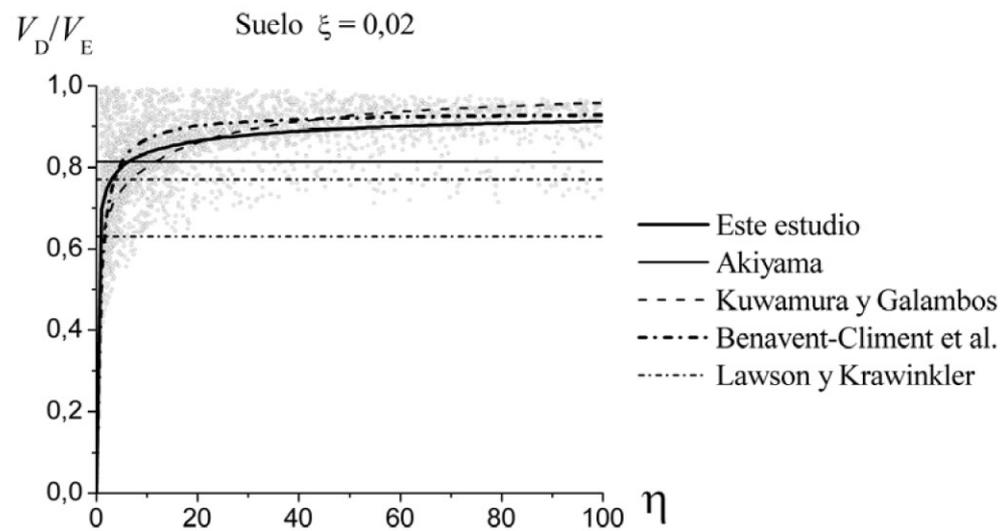


Figura 6.4. Valor del cociente V_D/V_E para diferentes amortiguamientos y geología superficial suelo $\xi = 0,02$.

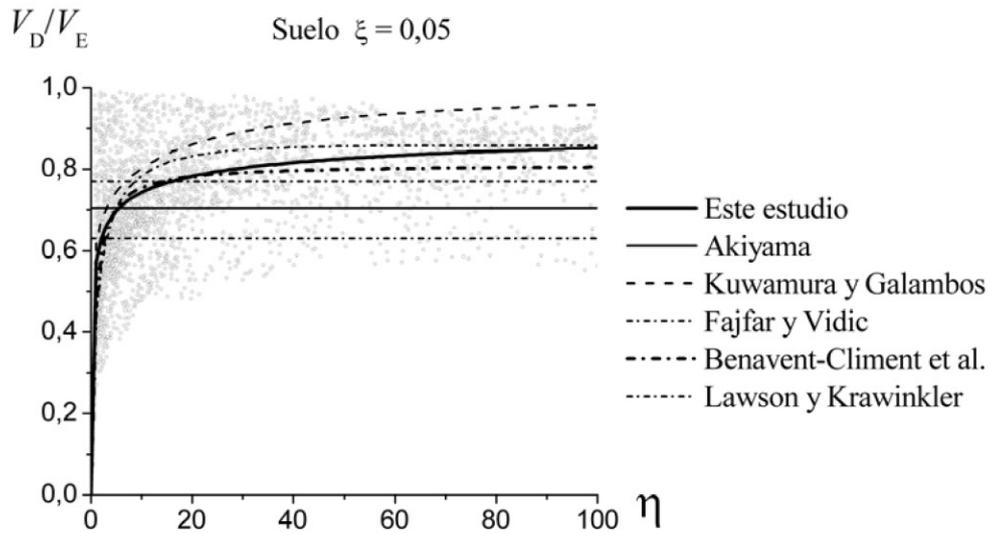


Figura 6.5. Valor del cociente V_D/V_E para diferentes amortiguamientos y geología superficial suelo $\xi = 0,05$.

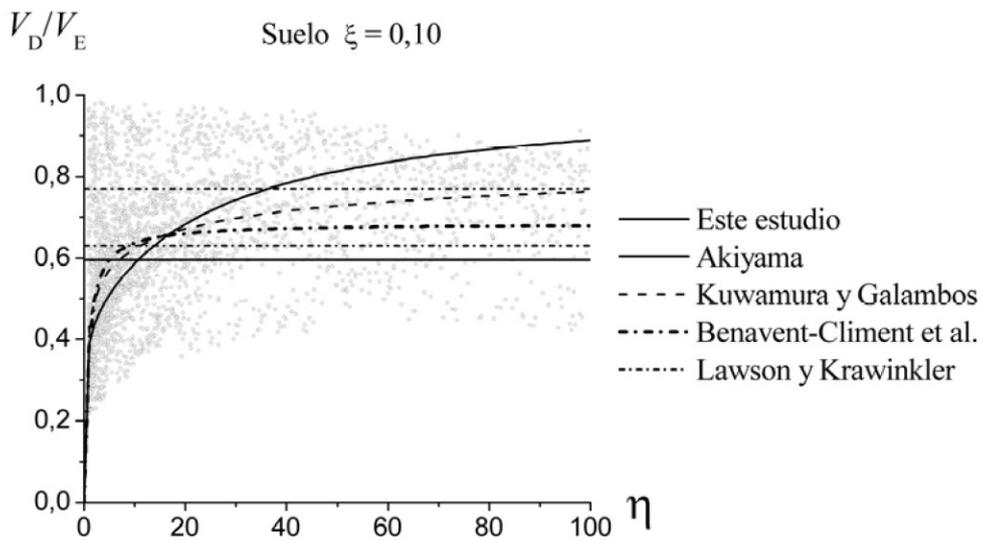


Figura 6.6. Valor del cociente V_D/V_E para diferentes amortiguamientos y geología superficial suelo $\xi = 0,10$.

6.3 Propuesta de una nueva expresión empírica

En las Figuras 6.1 a 6.6 se observan las siguientes tendencias:

- El cociente V_D/V_E disminuye al aumentar ξ y al disminuir η .
- El cociente V_D/V_E es mayor en suelo que en roca, y esta diferencia aumenta con ξ .
- Para un valor dado de η , la dispersión de los valores del cociente V_D/V_E aumenta con ξ .

Estas tendencias pueden ser descritas con un grado razonable de exactitud con la siguiente ecuación que se propone para la predicción del cociente V_D/V_E :

$$\frac{V_D}{V_E} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi\xi n}} \frac{\eta^c}{(8,75\xi + k^c + \eta^c)} C_d \quad (6.1)$$

En esta relación n , k y c son coeficientes adimensionales cuyos valores son: $n = 0,9$; $k = 0,33$ y $c = 0,57$ para roca, y $n = 0,15$, $k = 0,02$ y $c = 0,37$ para suelo. C_d es el coeficiente de error (es decir, el cociente entre los valores calculados y predichos de V_D/V_E); sus propiedades estadísticas obtenidas de los datos de respuesta del análisis se muestran en la última fila de la Tabla 6.1. La observación de la expresión (6.1) muestra que el coeficiente n rige el valor del cociente V_D/V_E en el rango de valores grandes de η ; de hecho, cuando η tiende a infinito, el cociente V_D/V_E se aproxima asintóticamente a $C_d / \sqrt{1 + 4\pi\xi n}$. La observación de la expresión (6.1) también muestra que los coeficientes k y c controlan la forma de la relación entre el cociente V_D/V_E y η en el rango de valores pequeños de η . La ecuación (6.1) con $C_d = 1$, establece el valor medio de V_D/V_E y se representa con una línea gruesa en las Figuras 6.1 a 6.6.

Tabla 6.1. Parámetros estadísticos del coeficiente de error en diferentes formulas para predecir V_D/V_E

Ecuación	$\xi = 0,02$				$\xi = 0,05$				$\xi = 0,10$			
	Roca		Suelo		Roca		Suelo		Roca		Suelo	
	$E(C_d)$	$COV(C_d)$	$E(C_d)$	$COV(C_d)$	$E(C_d)$	$COV(C_d)$	$E(C_d)$	$COV(C_d)$	$E(C_d)$	$COV(C_d)$	$E(C_d)$	$COV(C_d)$
Akiyama	0,94	0,15	1,03	0,13	0,88	0,23	1,04	0,21	0,84	0,30	1,08	0,26
Kuwamura	0,66	0,20	0,72	0,18	0,48	0,32	0,64	0,24	0,34	0,42	0,43	0,38
Fajfar	-	-	-	-	0,81	0,20	0,97	0,20	-	-	-	-
Benavent	0,89	0,12	0,99	0,13	0,84	0,20	1,00	0,19	0,80	0,27	1,04	0,26
Este estudio	1,00	0,12	1,00	0,10	0,97	0,19	0,98	0,17	1,00	0,27	1,00	0,26

También se representan en las Figuras 6.1 a 6.6 los límites superior e inferior propuestos en [Lawson y Krawinkler, 1995] y los resultados de las ecuaciones (2.23) a (2.26) propuestas en estudios previos para predecir el valor medio de V_D/V_E . La comparación cualitativa con los resultados de los análisis realizados en este estudio y con los proporcionados por la ecuación (6.1) permite formular las conclusiones siguientes.

- Exceptuando el rango de períodos cortos, para el cual los límites superior e inferior propuestos en [Lawson y Krawinkler, 1995] no son aplicables, los resultados de los análisis llevados a cabo en este estudio tienden a estar por encima de los límites sugeridos en dicho trabajo, especialmente para los valores más pequeños de ξ , lo que implica que la estimación del potencial de daño del terremoto se subestime.
- La ecuación (2.23) de Akiyama [Akiyama, 1999; Akiyama, 2003] sobreestima el cociente V_D/V_E para valores inferiores de η (es decir $\eta < 15$) y lo subestima para grandes valores de η .
- La ecuación (2.24) propuesta en [Kuwamura, Galambos, 1989] claramente sobreestima el cociente V_D/V_E para, aproximadamente, η mayor que 10.
- La ecuación (2.25) fue desarrollada en [Fajfar y Vidic, 1994] sólo para $\xi = 0,05$; la comparación con los resultados de este estudio para una relación más realista entre η y μ dada por $\eta = 4(\mu - 1)$ indica que la ecuación (2.25) tiende a sobrestimar V_D/V_E .
- La ecuación (2.26) propuesta en [Benavent et al., 2002] también sobreestima V_D/V_E en roca, y proporciona resultados similares a la ecuación (6.1) para suelo.
- Por último, cabe subrayar que, a diferencia de la ecuación (6.1) propuesta en este estudio, las fórmulas de los estudios anteriores no consideraron la influencia de las condiciones del suelo.

Para las ecuaciones (2.23) a (2.24) y para la ecuación propuesta (6.1), también se realizó una comparación cuantitativa en términos de las propiedades estadísticas del coeficiente de error C_d , tal como se muestra en la Tabla 6.1. Se puede observar en esta tabla que, para la ecuación propuesta, el valor esperado de C_d se encuentra más cercano a la unidad (es decir los valores calculados y predichos de V_D/V_E son próximos) y que su coeficiente de variación (cociente entre el valor medio y la desviación típica) es el más pequeño.

Las Figuras 6.7 a 6.12 muestran los espectros de V_D/V_E obtenidos de los análisis realizados en este estudio para $\xi = 0,05$ para los diez registros con valores máximos de V_E (cuatro para suelo y cinco para roca, y dos componentes por cada registro) utilizados en el capítulo 4.

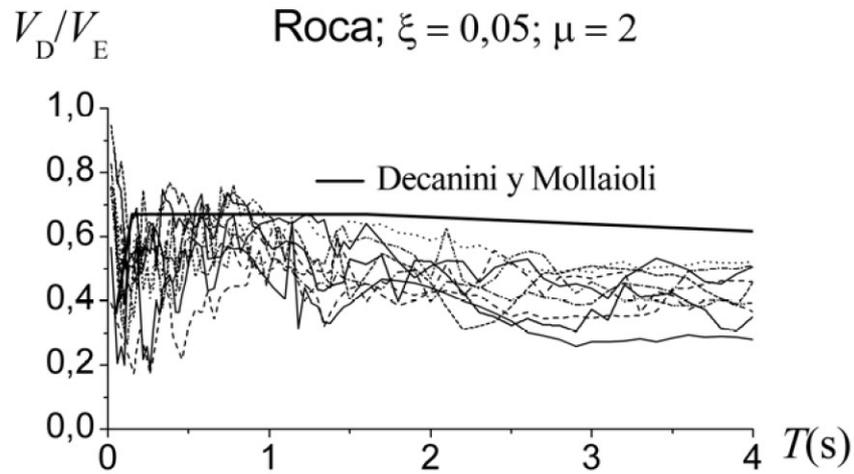


Figura 6.7. Espectro de valor V_D/V_E y comparación con el propuesto por Decanini y Mollaioli.

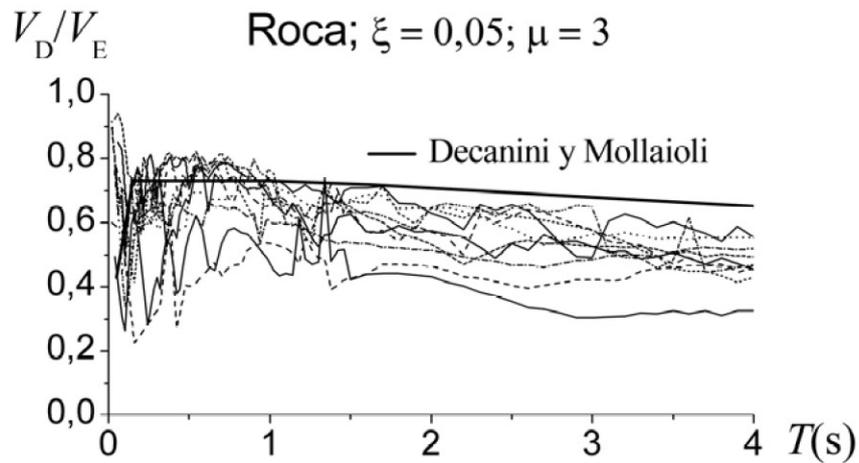


Figura 6.8. Espectro de valor V_D/V_E y comparación con el propuesto por Decanini y Mollaioli.

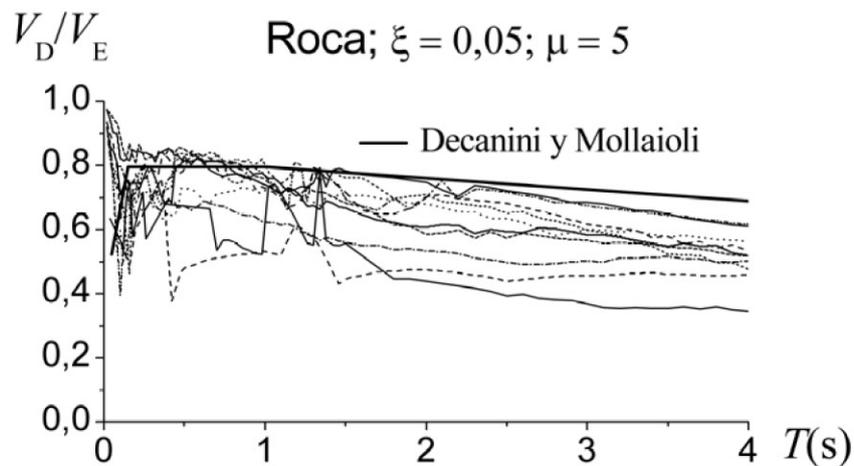


Figura 6.9. Espectro de valor V_D/V_E y comparación con el propuesto por Decanini y Mollaioli.

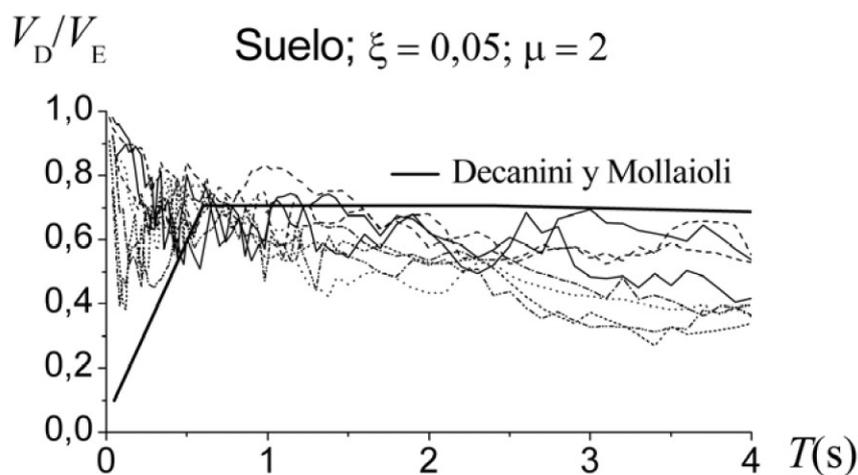


Figura 6.10. Espectro de valor V_D/V_E y comparación con el propuesto por Decanini y Mollaioli.

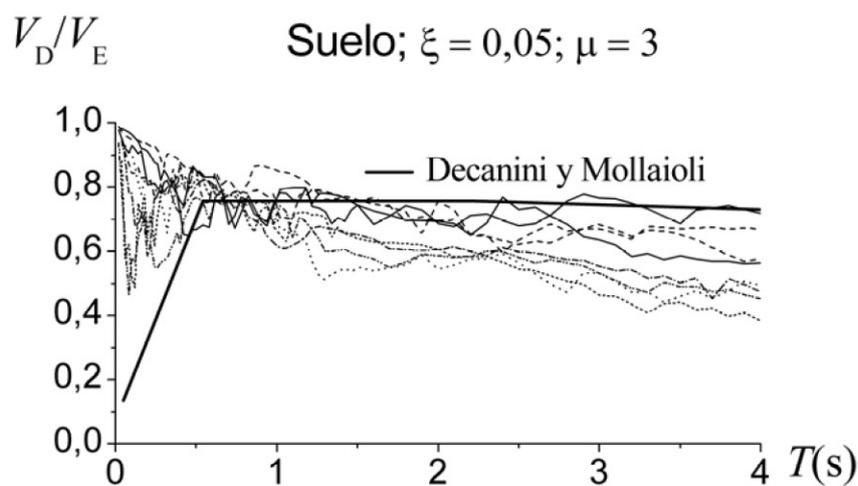


Figura 6.11. Espectro de valor V_D/V_E y comparación con el propuesto por Decanini y Mollaioli.

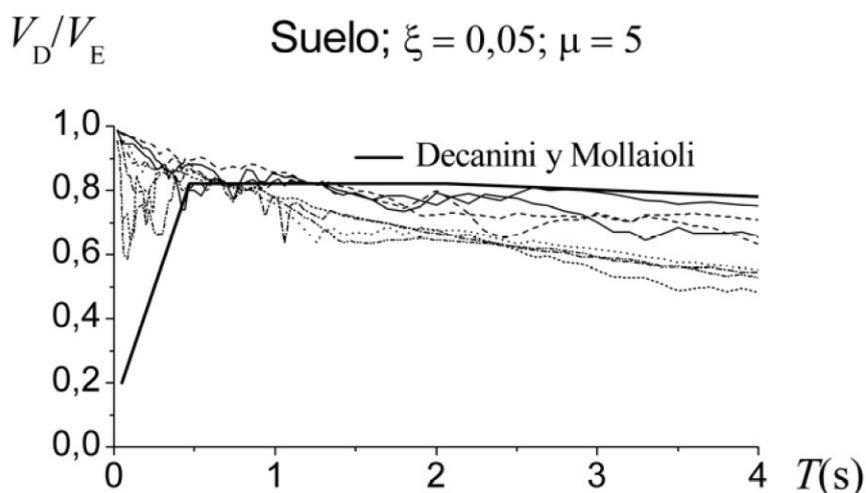


Figura 6.12. Espectro de valor V_D/V_E y comparación con el propuesto por Decanini y Mollaioli.

En las Figuras 6.7 a 6.12 se observa que, como ya se señaló en el trabajo [Lawson, Krawinkler, 1995], que el cociente V_D/V_E es bastante inestable en los valores de períodos cortos, pero se vuelve muy estable y apenas influido por T en los valores de período medio y largo. Esta

pequeña dependencia de V_D/V_E de T justifica que la ecuación (6.1) propuesta no incluya el período T como una variable.

Las Figuras 6.7 a 6.12 muestran también con líneas gruesas los espectros propuestos de $E_H/E_{L,abs}$ en el trabajo [Decanini, Mollaioli, 2001], aunque expresado en velocidad equivalente. Los espectros para $\mu = 3$ y $\mu = 5$ se obtuvieron, respectivamente, por interpolación de los de $\mu = 2$, $\mu = 4$ y $\mu = 6$. En cuanto al terreno, los tipos de “roca” y “suelo” utilizados en este estudio fueron asimilados a los tipos de suelo S1 y S3, respectivamente, según la clasificación utilizada en [Decanini, Mollaioli, 2001]. Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los espectros propuestos en [Decanini, Mollaioli, 2001], vale la pena recordar que el primero utiliza la energía de entrada “relativa” E_I en el denominador mientras que el segundo emplea la energía de entrada “absoluta” ($E_{I,abs}$). Las diferencias atribuibles a este hecho han sido ampliamente discutidas por los investigadores Decanini y Mollaioli, quienes concluyeron que el uso de E_I o de $E_{I,abs}$ no implica modificaciones sustanciales en el espectro de proyecto propuesto por estos autores. Aparte de estas consideraciones, las Figuras 6.7 a 6.12 indican que, a excepción de los períodos más cortos, los espectros de proyecto propuestos en [Decanini, Mollaioli, 2001] proporcionan un buen límite superior de las respuestas calculadas en este estudio.

7. Resumen, conclusiones e investigaciones futuras

7.1 Resumen

Se buscaron todos los movimientos sísmicos disponibles en Colombia; obteniéndose 3300 registros desde 1994. Cada registro consta de tres acelerogramas, correspondientes a las direcciones norte-sur, este-oeste y vertical; en este estudio se consideran sólo las componentes horizontales. Se dispone, pues, de 3300 pares de acelerogramas; éstos han sido tratados mediante corrección de línea base y filtrado. De los 3300 registros disponibles, fueron seleccionados los 144 cuya aceleración máxima de suelo era superior a 0,02 g ($PGA > 0,02$ g); correspondiendo éstos a 44 terremotos diferentes. De acuerdo con la información proporcionada por las autoridades de Colombia, los registros fueron clasificados en sólo dos grupos de acuerdo al tipo de terreno: roca y suelo. El análisis del contenido de frecuencias de los registros permitió una nueva subdivisión de los registros en suelo en dos categorías, referidas como tipo C y tipo D; éstas corresponden a suelo duro y suelo de rigidez media, aproximadamente.

Para cada registro sísmico seleccionado se obtiene el correspondiente espectro de energía en términos de pseudo-velocidad equivalente V_E mediante análisis dinámicos lineales (para ambas componentes) para sistemas elásticos de un grado de libertad. Estos resultados se clasifican de acuerdo con el tipo de suelo (roca, suelo C y suelo D) y la aceleración sísmica de proyecto indicada por la normativa colombiana. Dada la escasez de registros de alta severidad (especialmente en regiones con aceleración sísmica de proyecto distinta de 0,20 g o de 0,25 g), los resultados se presentan en dos formatos: con los registros sin escalar y escalados a la aceleración sísmica de proyecto de la normativa colombiana. En cada representación se incluye también el espectro de proyecto indicada por la normativa colombiana formulado en términos de velocidad equivalente. Dado que, excepto para períodos cortos, los espectros de energía son independientes de la ductilidad y de las propiedades histeréticas y de amortiguamiento de la estructura, estos espectros lineales pueden ser utilizados para obtener espectros envolventes de proyecto.

A continuación, se traza una envolvente bilineal de proyecto de estos espectros elásticos de V_E para cada tipo de suelo. Esta idealización consta de un primer segmento inclinado que pasa por el origen y un segundo segmento plano. La segunda rama (horizontal) se obtiene a partir de los espectros elásticos descritos en el párrafo anterior; para roca y suelo de tipo C se consideran los espectros obtenidos de los registros sin escalar mientras que en suelo de tipo D se consideran los espectros obtenidos de los registros escalados (dada la escasez de registros importantes en suelo de tipo D). En el rango de períodos cortos no puede admitirse que los espectros de energía sean independientes de la ductilidad y de las propiedades histeréticas y de amortiguamiento de la estructura y, por dicha razón, para obtener la pendiente de la rama inicial inclinada se efectúan análisis no lineales a ductilidad constante para distintos valores de ductilidad y de amortiguamiento. Como resultado, se ha propuesto una expresión para calcular el incremento de V_E en el rango de períodos cortos en función de la ductilidad. Combinando las propuestas para

la rama horizontal (a partir de los análisis lineales) y para la rama creciente (a partir de los análisis no lineales) se proponen espectros bilineales de proyecto (de energía) basados en acelerogramas registrados en Colombia. Esta propuesta constituye la principal aportación de este trabajo.

Esta propuesta de espectros de energía de entrada de proyecto se compara con la norma sísmica de Colombia, y con el espectro de proyecto propuesto recientemente por otros autores para España, Irán, Japón y Grecia. Así mismo, se efectúan comparaciones con otros trabajos.

A partir de los análisis no lineales efectuados se ha obtenido también una expresión empírica del cociente entre la energía de entrada que contribuye al daño (energía histerética) y la energía introducida por el terremoto. Esta expresión depende del amortiguamiento y de la ductilidad acumulada. La exactitud de esta expresión se compara con otras fórmulas propuestas previamente.

7.2 Conclusiones

Este trabajo ha permitido formular las siguientes conclusiones generales:

- Los espectros propuestos en este estudio son más exigentes que el actual código de Colombia y se ajustan con bastante exactitud a las propuestas recientes para seis ciudades de Grecia —igualmente una región de moderado a alto riesgo sísmico— obtenidas a partir de un enfoque diferente.
- La nueva ecuación para estimar el cociente entre la energía que contribuye al daño y la energía de entrada aproxima correctamente la respuesta obtenida de los análisis y mejora las aproximaciones de las fórmulas anteriores.

7.3 Investigaciones futuras

A partir de los resultados obtenidos se propone desarrollar las siguientes líneas de investigación:

- Incorporación de los espectros propuestos a la normativa sismorresistente de Colombia.
- Aplicación de la formulación utilizada en este estudio a las microzonificaciones sísmicas de Bogotá y otras ciudades de Colombia.
- Aplicación de los espectros propuestos al estudio de la vulnerabilidad de construcciones representativas de Colombia. Propuesta de medidas de rehabilitación, eventualmente mediante tecnologías avanzadas como aislamiento de base o disipadores de energía.

Cuando se disponga de mayor información sísmica se pretende llevar a cabo las siguientes investigaciones:

- Propuesta de espectros de energía para terremotos impulsivos (con efectos de proximidad de falla).
- Propuesta de espectros de energía que incorporen una rama descendente para períodos muy largos.

Bibliografía

1. Akiyama H., Earthquake-resistant limit-state design for buildings, University of Tokyo Press, Tokyo, (1985).
2. Akiyama H., Earthquake-Resistant Design Method for Buildings Based on Energy Balance, Gihodo Shuppan, Tokyo, (1999) 25-26.
3. Akiyama H., Metodología de proyecto sismorresistente de edificios basada en el balance energético, Ed. Reverté, (2003).
4. Ambraseys N.N., Douglas J., Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23 (2003) 1-18.
5. Amiri G.G., Darzi G.A., Amiri J.V., Design elastic input energy spectra based on Iranian earthquakes, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 (2008) 635-646.
6. Ang A.H.S., De Leon D., Determination of optimal target reliabilities for design and upgrading of structures, *Structural Safety*, 19(1) (1997) 19-103.
7. ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, volume 1, Report, SSC 96-01, Seismic Safety Commission, Redwood City, California, Applied Technology Council (1996).
8. ATC-58, Development of Performance-based Earthquake Design Guidelines, Applied Technology Council, Redwood City (2002).
9. Banon H., Veneciano D., Seismic safety of reinforced concrete members and structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10 (1982) 179-193.
10. Benavent-Climent A., Pujades L.G., López-Almansa F., Design energy input spectra for moderate-seismicity regions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31 (2002) 1151-1172.
11. Benavent-Climent A., Pujades L.G., López-Almansa F., Espectros de Input de Energía de Aplicación en el Proyecto Sismorresistente de Estructuras en Regiones de Sismicidad Moderada, CIMNE Monografía IS-43, (2001).
12. Benavent-Climent A., López-Almansa F., Pujades L.G., Capacidad límite última de disipación de energía de estructuras de hormigón armado sometidas a acciones sísmicas, CIMNE Monografía IS-44, (2001).
13. Benavent-Climent A., Akiyama H., López-Almansa F., Pujades L.G., Prediction of ultimate earthquake resistance of gravity-load designed RC buildings, *Engineering Structures*, 26, Issue 8, July (2004) 1103-1113. doi:10.1016/j.engstruct.2004.03.011.
14. Benavent-Climent A., An energy-based damage model for seismic response of steel structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36 (2007) 1049-1064.
15. Benavent-Climent A., Zahran R., Seismic evaluation of existing RC frames with wide beams using an energy-based approach, *Earthquakes and Structures*, 1(1) (2010) 93-108.
16. Berg G.V., Thomaides S.S., Energy consumption by structures in strong-motion earthquakes, *Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering*, 2 (1960) 681-697.
17. Bertero R.D., Bertero V.V., Teran-Gilmore A., Performance-based earthquake-resistant design based on comprehensive design philosophy and energy concepts, *Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Disc 2 (1996) 611.
18. Boore D.M., On Pads and Filters, *Processing Strong-Motion Data*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95 April (2005) 2, 745-750. doi: 10.1785/0120040160.
19. Bracci J.M., Kunnath S.K., Reinhorn A.M., Seismic performance and retrofit evaluation for reinforced concrete structures, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 123(1) (1997), 3-10.
20. Bray J.D., Rodriguez-Marek A., Geotechnical site categories, *Proceedings, First PEER-PG&E workshop on seismic reliability of utility lifelines*, San Francisco, CA, August, (1997).
21. Bruneau M., Wang N., Normalized energy-based methods to predict the seismic ductile response of SDOF structures, *Engineering Structures*, (1996) 13-28.
22. BSL, The Building Standard Law of Japan, The Building Center of Japan, Tokyo, (2009), (English version on CD available in <http://118.82.115.195/en/services/publication.html>).
23. Building Standard Law of Japan, Notification No. 631 of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. Earthquake-resistant structural calculation based on energy balance, Tokyo (2005).
24. Building Standard Law of Japan, Tokyo (1998).
25. Chai Y.H., Energy-based linear damage model for high-intensity seismic loading, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 121(5) (1995) 857-863.
26. Chai Y.H., Incorporating low-cycle fatigue model into duration-dependent inelastic design spectra, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34 (2004) 83-96.
27. Chapman M.C., On the use of elastic input energy for seismic hazard analysis, *Earthquake Spectra*, 15(4) (1999) 607-635.

28. Chintanapakdee C., Chopra A.K., Evaluation of modal pushover analysis using generic frames, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32 (2003) 417–442.
29. Chopra A.K., *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, (1995).
30. Chopra A.K., Goel R.K., A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31 (2002) 561–582.
31. Chopra A.K., Goel R.K., A modal pushover analysis procedure to estimating seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation, PEER Report 2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
32. Chou C.C., Uang C.M., Establishing absorbed energy spectra -an attenuation approach, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29 (2000) 1441-1455.
33. Clough R.W., Penzien J., *Dynamics of Structures*, McGraw Hill, New York (1993).
34. Cornell C.A., Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58 (1968) 1583-1606.
35. Cosenza E., Manfredi G., Ramasco K., An evaluation of the use of damage functional in earthquake-resistant design, Proc. 9th European Conference on Earthquake Engineering, The Kucherenko Tsniik of the USSR, Gosstroy, Moscow, 9 (1990) 303-312.
36. Cosenza E., Manfredi G., Some remarks on the evaluation and strengthening of under-designed RC frame buildings, Technical Report, NCEER-97-0003, State University of New York at Buffalo, (1997).
37. Decanini L., Mollaioli F., Formulation of Elastic Earthquake Input Energy Spectra, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27 (1998) 1503-1522.
38. Decanini L.D., Mollaioli F., An energy-based methodology for the seismic assessment of seismic demand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21 (2001) 113-137.
39. EAK 2000, Greek code for Seismic Resistant Structures, Organization for Earthquake Resistant Planning and Protection, Ministry of Environment Planning and Public Works, (2000).
40. Earthquake Engineering Research Center, Performance-based Seismic Design of Buildings: An Action Plan, U.C., Berkeley, (1995).
41. EERC 1995, The Earthquake Engineering Research Center Library, The Earthquake Image Information System (EqIIS), University of California, Berkeley, (1995). <http://nisee.ce.berkeley.edu/~eqiis/eqiis.html>.
42. EN-1998 (EC-8), Disposiciones para el Proyecto de Estructuras Sismorresistentes, Comité Europeo de Normalización, (2005).
43. Erberik A., Sucuoglu H., Seismic energy dissipation in deteriorating systems through low cycle fatigue, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33 (2004) 49–67.
44. Esteva L., Seismic risk and seismic design decision, *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, Massachusetts Inst. of Tech. Press, (1970) 142-182.
45. Fajfar P., Fischinger M., N2. A method for nonlinear seismic analysis of regular structures, Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, 5 (1988) 111–116.
46. Fajfar P., Equivalent ductility factors taking into account low-cycle fatigue, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21 (1992) 837-848.
47. Fajfar P., Vidic T., Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23 (1994) 523-537.
48. Fajfar P., Vidic T., Fischinger M., On energy demand and supply in SDOF systems, In: *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Elsevier, Amsterdam, (1992) 41-61.
49. FEMA 349, Action Plan for Performance-Based Seismic Design, FEMA/EERI, Washington DC, (2000).
50. FEMA 350, Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, FEMA/SEAQC/ATC/CUREe, (2000).
51. FEMA 356, Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings, Vol. 1: Guidelines, (formerly FEMA 273) FEMA, Washington DC, (2002).
52. García Reyes L.E., *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, (1998).
53. Gunturi S. K., Building specific earthquake damage estimation, Ph.D. Thesis, Stanford University, Stanford, California, (1992).
54. Gupta B, Kunnath S.K., Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures, *Earthquake Spectra*, 16(2) (2000) 367–392.
55. Hall W.L., Nau J.M., Zahrah T.F., Scaling of response spectra and energy dissipation in SDOF systems, Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, IV (1984) 7-14.

56. Hamburger R.O., Performance-Based Analysis and Design Procedure for Moment Resisting Steel Frames, Background Document, SAC Steel Project, Sept. (1998).
57. Housner G.W., Historical Review of Earthquake Engineering, In: Selected Earthquake Engineering Papers of George W. Housner, American Society of Civil Engineers, New York, (1990) 764-777.
58. Housner G.W., Jennings P.C., The capacity of extreme earthquake motions to damage structures, Structural and Geotechnical Mechanics, A volume honoring Nathan M. Newmark, (1977) 102-116.
59. Housner G.W., Limit design of structures to resist earthquakes, Proceedings of First World Conference on Earthquake Engineering, 5 (1956) 1-12.
60. Hudson D.E., Response Spectrum Techniques in Engineering Seismology, Proceedings of first World Conference on Earthquake Engineering, (1956).
61. Hudson D.E., Some problems in the Application of Spectrum Techniques to Strong Motion Earthquake Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 52(2) (1962).
62. IBC (International Building Code), International Code Council (2000).
63. Ingeominas: Instituto Colombiano de Geología y Minería, <http://www.ingecominas.gov.co/>, 2005. (In Spanish).
64. Japanese Building Code, Ministry of Construction, Japan, (1985).
65. Kato B., Akiyama H., Energy input and damages in structures subjected to severe earthquakes, Journal of Structural and Construction Engineering Trans. AIJ, 235 (1975) 9-18 (en Japonés).
66. Kircher, C., Nassar, A., Kustu, O. y Holmes, W., Development of building damage functions for earthquake loss estimation, Earthquake Spectra, 13(4) (1997) 663-682.
67. Krawinkler H., Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation, Engineering Structures 20 (1988) 452-464.
68. Kunnath S.K., Gupta B., Validity of deformation demand estimates using nonlinear static procedures, Proceedings of U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Sapporo, Hokkaido, Japan, (2000) 117-128.
69. Kuwamura H., Galambos T.V., Earthquake load for structural reliability, Journal of Structural Engineering ASCE, 115(6) (1989) 1446-1462.
70. Kuwamura H., Kirino Y., Akiyama H., Prediction of earthquake energy input from smoothed Fourier amplitude spectrum, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 23 (1994) 1125-1137.
71. Lawson R.S., Krawinkler H., Cumulative damage potential of seismic ground motion, Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, 10 (1995) 79-86.
72. Leon D. and Ang A. H.S., A damage model for reinforced concrete buildings, further study with the 1985 Mexico City earthquake, Proc. 6th International Conference on Structural Safety and Reliability, Barkema A.A., Rotterdam, The Netherlands, 3, 2081-2087.
73. Lybas J., Sozen M., Effect of beam strength and stiffness on dynamic behavior of reinforced concrete coupled walls, Civil Engineering Studies, Structural Research Series, N.444, University of Illinois, Urbana (1977).
74. MacGuire R., Seismic structural response risk analysis incorporating peak response regressions on earthquake magnitude and distance, MIT Department of Civil Engineering, Research Report R., (1974) 74-51.
75. Malhotra P.K., Return Period of Recorded Ground Motions, Journal of Structural Engineering, 132(6) (2006) 833-839.
76. Manfredi G., Evaluation of seismic energy demand, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30 (2001) 485-499.
77. Manfredi G., Stime energetiche e potenziale di danno sismico, VII Convegno Nazionale: L'Ingenieria sismica in Italia, Siena, 1 (1995) 43-52, (in italian).
78. Matsumori T., Otani S., Shiohara H., Kabeyasawa T., Earthquake member deformation demands in reinforced concrete frame structures, Proceedings of U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Maui, Hawaii, (2000) 79-94.
79. McCabe S.L., Hall W. J., Assessment of Seismic Structural Damage, J. Struct. Engrg., 115(9) (1989) 2166-2183.
80. NCSE-02, Norma de Construcción Sismorresistente: Parte General y Edificación. Ministerio de Fomento, (2002).
81. NSR-98, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (1998).
82. Ohashi U., History of Structural Standards for Buildings in Japan, Japan Building Center (1993), (en japonés).

83. Paret T.F., Sasaki K.K., Eilbeck D.H., Freeman S.A., Approximate inelastic procedures to identify failure mechanisms from higher mode effects, Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 966 (1996).
84. Park Y., Ang A., Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE 111, (1985)722-739.
85. Park Y.J., Reinhorn A.M., Kunnath S.K., IDARC: Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Frame-Shear Wall Structures, Technical Report NCEER-87-0008, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, (1987).
86. Penzien J., Elasto-plastic response of idealised multi-story structures subjected to a strong motion earthquake, Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering, (1960).
87. Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J., Displacement-Based Seismic Design of Structures, IUSS Press, (2007).
88. Rathje E.M., Abrahamson N.A., and Bray J.D., Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions, J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 124 (2) (1998) 150–159.
89. Rathje E.M., Faraj F., Russell S. and Bray J.D., Empirical Relationships for Frequency Content Parameters of Earthquake Ground Motions, Earthquake Spectra, 20 (1) (2004) 119–144.
90. FEMA 350, Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, July (2000).
91. Rodriguez-Marek A., Bray J.D., Abrahamson N.A., An empirical geotechnical seismic site response procedure, Earthquake Spectra, 17 (1) (2001) 65-87.
92. Safac E., Characterization of seismic hazard and structural response by energy flux, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20 (2000) 39-43.
93. Sasaki K.K., Freeman S.A., Parent T.F., Multimode pushover procedure (MMP)—a method to identify the effects of higher modes in a pushover analysis, Proceedings of the 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, Washington, (1998).
94. Scherbaum F., Schmedes J., and Cotton F., On the Conversion of Source-to-Site Distance Measures for Extended Earthquake Source Models. Bulletin of the Seismological Society of America, 94(3) (2004) 1053–1069.
95. SEAOC, Vision 2000: Performance Based Seismic Engineering of Buildings, San Francisco, April (1995).
96. Seed H.B., Ugas C., Lysmer J., Site-dependent spectra for earthquake-resistant design, Bulletin of the Seismological Society of America, 66(1) (1976) 221-243.
97. SeismoSignal, Seismosoft, <http://www.seismosoft.com/en/SeismoSignal.aspx> (2010).
98. Sokolov V., Loh C.H. and Wen K.L., Empirical model for estimating Fourier amplitude spectra of ground acceleration in Taiwan region, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29 (2000) 339-357.
99. Soo Y., Meyer C., Shizuoka M., Modeling of concrete damage, ACI Structural Journal, 86 (1989) 259-271.
100. Stone W.C. and Taylor A.W., ISDP: Integrated approach to seismic design of reinforced concrete structures, Journal of Structural Engineering, ASCE, 120(12) (1994) 3548-3566.
101. Sucuoglu H., Erberik A., Energy-based hysteresis and damage for deteriorating systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 33 (2004) 69–88.
102. Tanahashi R., Studies on the non-linear vibrations of structures subjected to destructive earthquakes, Proceedings of first World Conference on Earthquake Engineering, (1956).
103. Teran-Gilmore A., Performance-based earthquake-resistant design of framed buildings using energy concepts, Ph.D, Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, (1996).
104. Teran-Gilmore A., Jirsa J.O., A simple damage model for practical seismic design that accounts for low cycle fatigue, Earthquake Spectra, 21(3) (2005) 803-832.
105. Teran-Gilmore A., Jirsa J.O., Energy demands for seismic design against low-cycle fatigue, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 36 (2007) 383-404.
106. Tselentis G.A., Danciu L. and Sokos E., Probabilistic Seismic Hazard Assessment in Greece, Part II: Acceleration Response Spectra and Elastic Input Energy Spectra, Natural Hazards & Earth Science Systems, in press.
107. Uang C.M., Bertero V.V., Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design, Report No. UBC/EERC-88/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California, (1988).
108. Uang C.M., Bertero V.V., Evaluation of seismic energy in structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, (1990) 77-90.
109. Utsu T., Relationships between Magnitude Scales, in: International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Elsevier, (2002) 733-746.

110. Vamvatsikos D., Cornell C.A., Tracing and post-processing of IDA curves: Theory and software implementation, Report No. RMS-44, RMS Program, Stanford University, Stanford, (2001).
111. Vamvatsikos D., Cornell C.A., Incremental dynamic analysis, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31 (2002) 491–514.
112. Vamvatsikos D., Seismic performance, capacity and reliability of structures as seen through incremental dynamic analysis, Doctoral dissertation, Stanford University, (2002).
113. Vega J., del Rey I., Alarcón E., Pounding force assessment in performance-based design of bridges, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38 (2009) 1525-1544.
114. Veletsos A., Newmark N.M., Effect of inelastic behaviour on response of simply systems to earthquake motions, *Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering*, (1960) 895-912.
115. Vielma J.C., Caracterización de la respuesta no lineal de edificios de hormigón armado proyectados para zonas sísmicas, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, (2007).
116. Xu L.J. and Xie L.L., Characteristics of frequency content of near-fault ground motions during the Chi-Chi earthquake, *Acta Seismologica Sinica*, 18(6) (2005) 707-716.
117. Zahrah T.F., Hall W.J., Earthquake energy absorption in SDOF systems, *Journal of Structural Engineering*, 110 (1984) 1757-1772.
118. Zahran R., Predicción de la capacidad límite última de disipación de energía de estructuras porticadas con vigas planas existentes, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, (2009).
119. Zhu T.J., Tso W.K., Design of torsionally unbalanced structural systems based on code provisions II: strength distribution, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21(1992) 629-644.

Anejo A. Actividad sísmica histórica de Colombia

En este anejo se presenta un resumen de la actividad sísmica histórica de Colombia; esta información ilustra la importancia de la amenaza existente. El sismo de 1566, probablemente en marzo según el libro de partidas de tesorería del gobierno, donde constan las reparaciones de la casa real, pagado en 1567 y realizadas el año anterior. Afectó a las ciudades de Popayán, Cali y Santander de Quilichao. Derribó los edificios de muros de tierra pisada sin afectar los de bahareque. El 18 de mayo de 1875 a las 11:15 am el terremoto de Cúcuta, tuvo un movimiento premonitorio los días 16 y 17, que agrietó las paredes de algunas casas. El martes 18 destruyó las villas el Rosario y San José de Cúcuta dejando 460 muertos. Afectó un radio de 100 kilómetros llegando a sentirse en Bogotá Colombia y Caracas Venezuela. El 31 de enero de 1906, a las 10:36 a.m. hora local (15:36 UT), se registró un violento sismo de magnitud 8,8 (Mw), uno de los más grandes registrados en la historia sísmica del mundo. Con epicentro en el Mar Pacífico y profundidad superficial. Se sintió en la región Pacífica y Andina de Colombia y afectó las poblaciones costeras de Nariño y Cauca. Se originó un tsunami con olas de 2 a 5 metros, arrastrando a personas, animales, viviendas y represando los ríos de la región. Hubo efectos de licuación en Boca Grande, Tumaco, Cabo Manglares y Esmeraldas. Se sintieron réplicas hasta el 13 de julio de ese año. En 1923 se instala en el centro de la ciudad de Bogotá la primera estación sismológica, Wiechert de dos componentes horizontales, por el Reverendo Simón Saransola, en el sótano del edificio San Bartolome. En diciembre se registra una cadena de terremotos iniciada el día 13 hasta el día 20. El epicentro se localiza en la frontera de Colombia y Ecuador. Afectó las regiones de Cumbal, Carlosama, Aldana y Chiles, Túquerres e Ipiales. El Informe entregado por el cónsul de Estados Unidos H. Samuel Piles al secretario de estado, refleja cifras aproximadas de 300 muertos y 20.000 personas afectadas sin vivienda. El 22 de diciembre, a las 04:56 hora local (9:56 UT), un sismo en departamento de Cundinamarca, en la Provincia del Guavio se sintió desde Bucaramanga hasta Neiva, con mayor intensidad en la región Cundinamarca, Boyacá y Meta. Colapsaron casas, se obstruyeron caminos por deslizamiento de tierra, se agrietaron las iglesias. En Bogotá se agrietó los muros del Ministerio de Obras Públicas, de la Iglesia de Egipto y La Candelaria. 4 personas muertas 5 heridos. Se sintieron réplicas hasta el 16 de enero del año siguiente. El 4 de febrero de 1938, en el departamento de Caldas, con epicentro al suroeste de Manizales y foco localizado a 160 kilómetros de profundidad, un terremoto se sintió casi en toda la nación, desde Barranquilla hasta Ecuador y desde el Pacífico hasta los llanos orientales. Alcanzo una intensidad en la escala de Mercalli de VII a VIII y de 7 en la escala de Richter. Los daños se concentraron en las ciudades de Cartago, Armenia y Manizales. En julio de 1950, 3 terremotos registrados en Cúcuta, al suroeste del departamento de Santander, dos de ellos, uno el día 8 y otro el día 9, son responsables de las ruinas en las poblaciones de Arboledas, Cucutilla, San José, Ávila, el Carmen de Nazareth, Salazar de las Palmas, Durania y Mutiscua. Se sintió en toda la mitad norte de Colombia que comprende de Bogotá a Santa Marta y de Medellín en Colombia a Mérida en Venezuela. Dejo aproximadamente 380 muertos, 800 heridos y 40.000 damnificados. Causo derrumbe de edificio y el 90 por ciento de las casas sufrieron daños. El 20 de diciembre de 1961, con epicentro al sur de Manizales, a una profundidad de 167 km, y magnitud de 6,9 en la escala de Richter y VIII en la de Mercalli, causo más de un centenar de víctimas y graves daños en las ciudades de Pereira y Armenia. El 30 de julio de 1962, con epicentro al oeste de Manizales, un violento terremoto de magnitud 6,9 grados, con profundidad de foco a 69 km y en la escala de Mercalli una intensidad máxima que llego a IX, afectando las ciudades de Pereira, Manizales y Sonsón. El 24 de abril de 1973, cerca de Anserma, departamento de Caldas, un terremoto con profundidad de foco de 118 km, alcanzó una intensidad de VII y una magnitud de 5,5. El lunes 25 de enero de 1999, en Armenia (Quindío), hubo un terremoto con intensidad de 6,4 en la escala de Richter. Esta zona es de alto riesgo sísmico por la convergencia de la placa Suramericana, Nazca y Cocos. Se registraron 14 replicas, destacando una de 5,4 grados y otra de 3,5 grados. El terremoto destruyo las principales estructuras de ayuda y control de la ciudad, bomberos, policía, hospitales. El terremoto inicial dejo aproximadamente 1000 muertos y las

posteriores réplicas con las consecuencias del desastre acercaron la cifra a 2000. El lunes 25 de enero de 1999, 13:19 hora local (18:19 UT), ocurrió un fuerte sismo de magnitud 6,2 (Mw), que destruyó parte de la ciudad de Armenia. Su epicentro se localizó en el municipio de Córdoba (Quindío) y de profundidad superficial. Dejó 1.171 muertos, 4.765 heridos, 45.019 viviendas afectadas, 6.408 fincas cafeteras con pérdidas aproximadas de 2.000 millones de dólares. Durante un mes, la Red Sismológica Nacional de Colombia registró 138 réplicas. La más importante el mismo día 25, 4 horas después del sismo principal con magnitud de 5,5 (Mw). Se creó el Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero (FOREC), para coordinar y administrar los recursos para la reconstrucción del eje cafetero y futuras emergencias. El domingo 25 de mayo de 2008, un fuerte terremoto con intensidad de 5,5 grados en la escala de Richter con epicentro en el Meta, precedido de uno inicial de 4,0 grados en la población de San Juan (Meta), afectó los departamentos del Valle del Cauca, Quindío y Cundinamarca, dejando 11 muertos entre las 5.000 personas afectadas.

Anejo B. Tipologías constructivas en Colombia

En Colombia es de preferencia construir estructuras de pórticos de hormigón armado con cerramientos en obra de fábrica y en edificios de baja a mediana altura se utiliza mampostería reforzada. Inicialmente la mayoría de viviendas suelen entregarse de uno o dos niveles y con la estructura proyectada para una futura planta adicional. Un porcentaje considerable de estas estructuras se levantan en régimen de auto construcción, con gran dispersión de las características de las estructuras, afectando de forma directa a la vulnerabilidad de las mismas. En los últimos años, en las grandes ciudades, se ha optado por proyectos urbanísticos de conjuntos cerrados de edificaciones; básicamente por razones de seguridad. En las primeras ciudadelas de este tipo se utilizaron estructuras de hormigón armado y cerramientos en mampostería; pero, de acuerdo al avance tecnológico en la construcción, hoy se cuenta con herramientas para realizar procesos constructivos de edificaciones con muros portantes de hormigón armado. Por otra parte, las personas de menos recursos económicos, invaden terrenos, en su mayoría no adecuados para construir, levantando viviendas de una planta utilizando madera, escombros y en el mejor de los casos algunos elementos de obra de fábrica. En las poblaciones pequeñas del país, aun predominan las casas de una planta, de muros de tierra, tejas de barro y paja. Todo lo anterior es motivo suficiente para considerar la alta vulnerabilidad de las actuales estructuras y razón para mejorar el actual concepto de proyecto sismorresistente.

En la actualidad Colombia cuenta con una gran demanda de vivienda familiar, superando la oferta de nuevas construcciones.

Anejo C. Manejo de los programas utilizados

En este anejo se describe el funcionamiento de la entrada y salida de datos de los programas de ordenador utilizados para el cálculo de los espectros lineales y no lineales.

C.1 Espectros lineales

Los ficheros de entrada contienen las aceleraciones en columna. Al inicio de estos ficheros se deben añadir tres líneas que incluyan la siguiente información:

- 1ª fila: el nombre del sismo (máximo 8 ocho caracteres, un punto, y 3 caracteres).
- 2ª fila: el número de puntos del acelerograma, una coma, y el incremento de tiempo (Δt).
- 3ª fila: el formato de los datos aFb.c, donde “a” tiene que ser 1 (ya que los datos están en una única columna), “b” debe ser el número total de dígitos y “c” el número de decimales.

NOMBRE: EW.EFA
 NUMERO DE PUNTOS, Δt : 6657,0.005
 FORMATO DE DATOS: (1F15.5)

El programa calcula cada espectro de energía para las dos componentes horizontales del terremoto; por lo tanto, éste pregunta el nombre de cada una de las dos componentes horizontales.

Nombre de la 1ª componente: EW.EFA
 Nombre de la 2ª componente: NS.EFA

Cuando el programa pregunte por el valor del coeficiente de cortante basal, como en este caso se está realizando un análisis elástico y la estructura no deberá entrar en el rango plástico se introducirá un valor grande.

El archivo de salida que contiene toda la información posee la extensión “.tot”. Es un fichero de texto que se puede examinar con programas como Excel u Origin. La Tabla C.1 muestra, a título de ejemplo, una lista de los resultados.

Tabla C.1. Resultados del análisis lineal.

Período (s)	Acel. max. resp. NS (cm/s ²)	Vel. max. resp. NS (cm/s)	Vel. final NS (cm/s)	V_E NS (cm/s)	Acel. max. resp. EW (cm/s ²)	Vel. max. resp. EW (cm/s)	Vel. Final EW (cm/s)	V_E EW (cm/s)	V_E (cm/s)
0,01	17,222	0,001	0,001	0,016	21,619	0,002	0,002	0,015	0,022
0,02	17,248	0,003	0,002	0,046	21,653	0,004	0,004	0,042	0,062
0,03	17,336	0,007	0,003	0,09	21,64	0,006	0,006	0,084	0,123
0,04	17,325	0,013	0,004	0,148	21,623	0,009	0,009	0,138	0,202
0,05	17,328	0,019	0,005	0,214	21,627	0,012	0,012	0,2	0,293
0,06	17,394	0,026	0,007	0,279	21,679	0,016	0,013	0,265	0,385
0,07	17,444	0,033	0,009	0,339	21,84	0,021	0,013	0,321	0,467
0,08	17,357	0,04	0,01	0,397	21,94	0,026	0,013	0,37	0,543
0,09	17,467	0,048	0,012	0,455	21,985	0,033	0,015	0,418	0,618
0,1	17,524	0,054	0,013	0,516	21,985	0,042	0,018	0,469	0,697

C.2 Espectros no lineales

Se utilizaron los ficheros de las componentes horizontales, preparados en el apartado anterior.

El programa calcula el espectro de energía para cada componente horizontal del terremoto; por lo tanto, éste pregunta el nombre de la componente horizontal.

Nombre de la componente: EW.EFA

Nombre de la componente: NS.EFA

El programa pide el valor del amortiguamiento (ξ) y de la ductilidad (μ); por medio de iteraciones el programa encuentra el valor de α requerido para esa ductilidad.

El archivo de salida que contiene toda la información posee la extensión “.tot”. Es un fichero de texto que se puede examinar con programas como Excel u Origin, por ejemplo.

Anejo D. Espectros de los registros considerados

En este Anejo se presentan los espectros de amplitud de Fourier (valor absoluto obtenido a partir de las partes reales e imaginarias), de aceleración absoluta S_a y de energía (en términos de velocidad, es decir, V_E) de los 144 registros considerados en este trabajo (Tablas 3.1 y 3.2). El espectro de Fourier ha sido suavizado mediante un filtro “running Hanning average” con un ancho de banda de 0,1 Hz repitiendo la operación 20 veces [Boore, 2005]. El espectro de aceleración S_a corresponde a un amortiguamiento $\xi = 0,05$ (por ser el valor considerado habitualmente en las normativas sismorresistentes) y el espectro de energía corresponde a un amortiguamiento $\xi = 0,10$ por ser el valor recomendado en [Akiyama, 1985].

Estos tres espectros han sido obtenidos combinando cuadráticamente (según expresiones similares a la ecuación (2.21)) los espectros correspondientes a las componentes norte-sur y este-oeste.

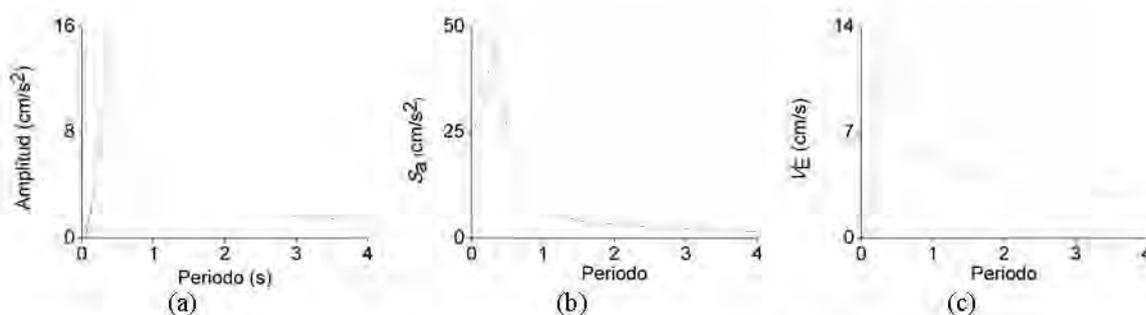


Figura D.1 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 1.

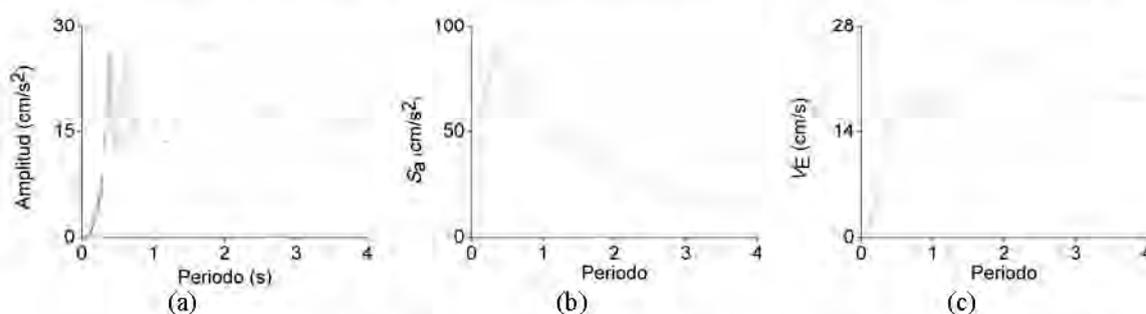


Figura D.2 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 2.

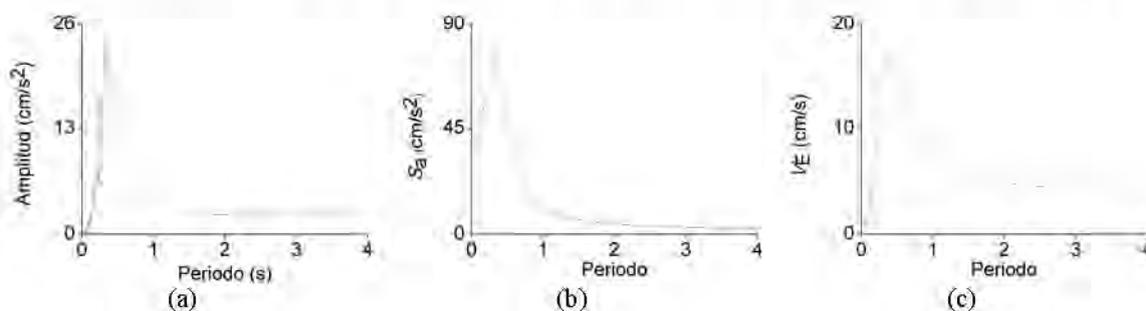


Figura D.3 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 3.

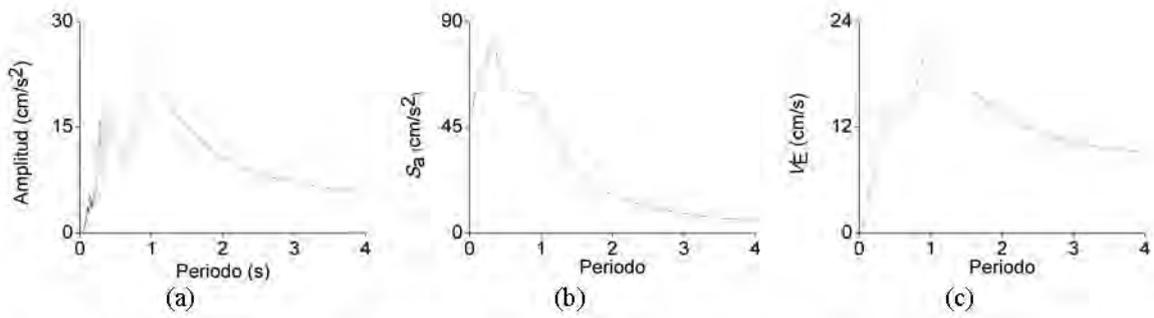


Figura D.4 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 4.

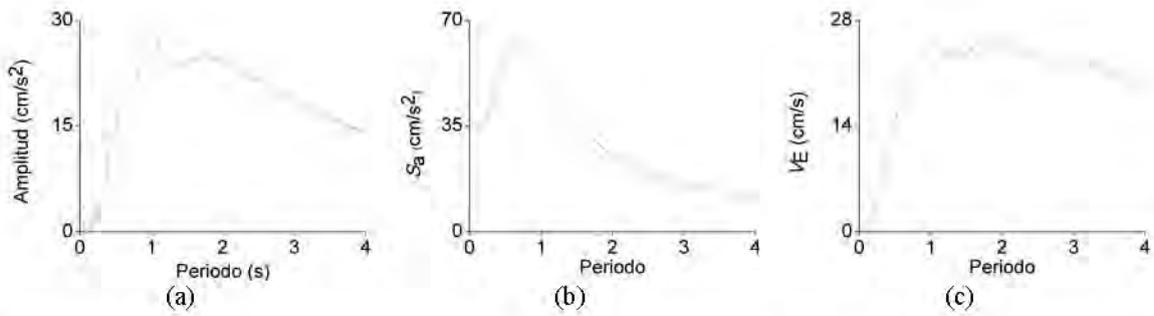


Figura D.5 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 5.

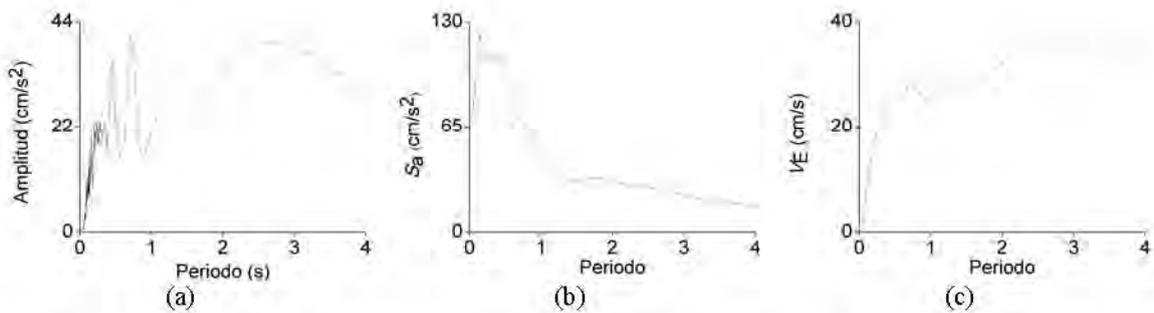


Figura D.6 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 6.

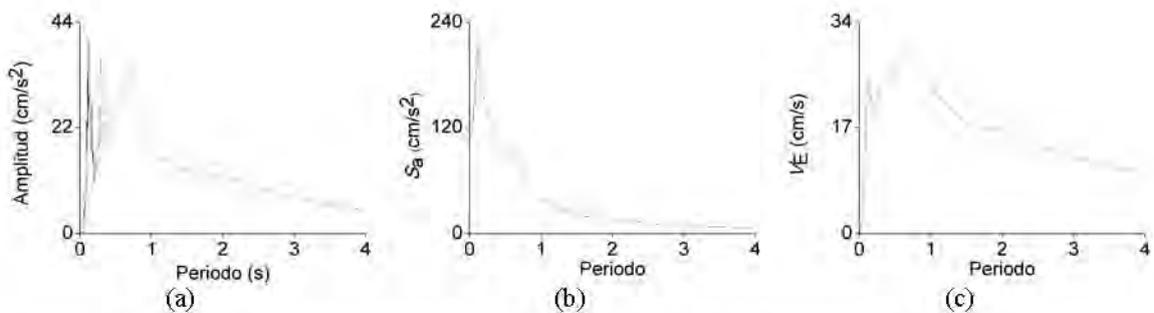


Figura D.7 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 7.

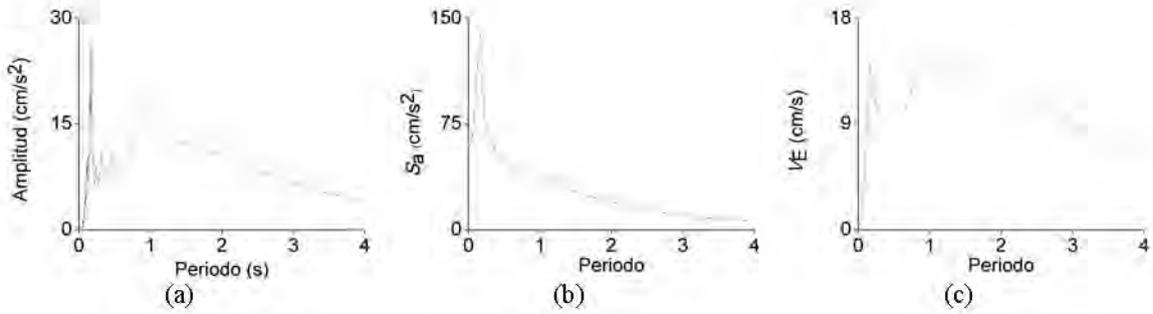


Figura D.8 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 8.

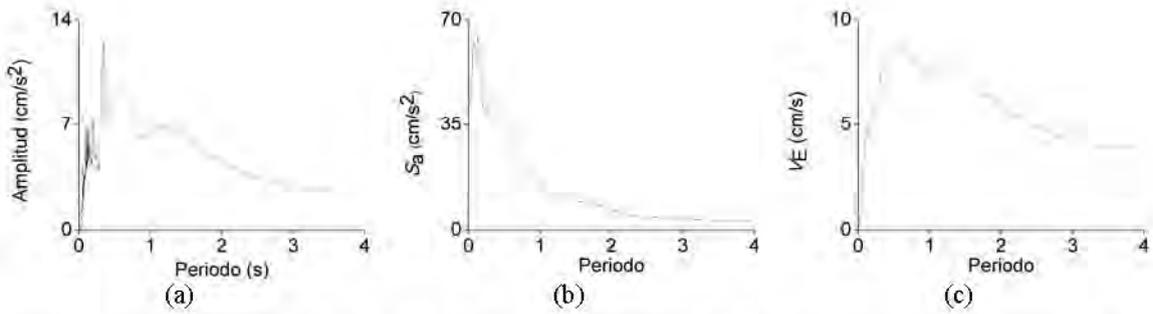


Figura D.9 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 9.

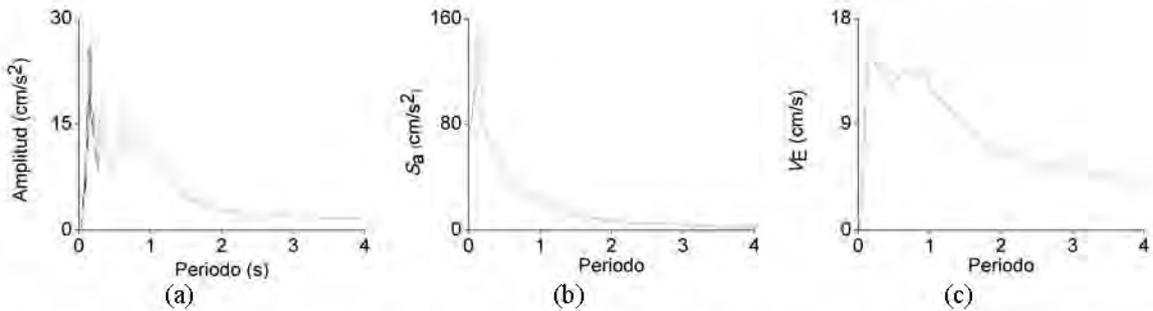


Figura D.10 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 10.

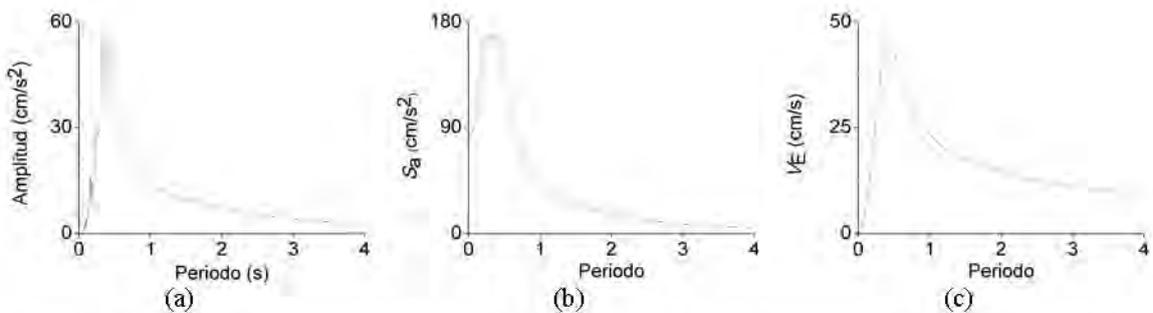


Figura D.11 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 11.

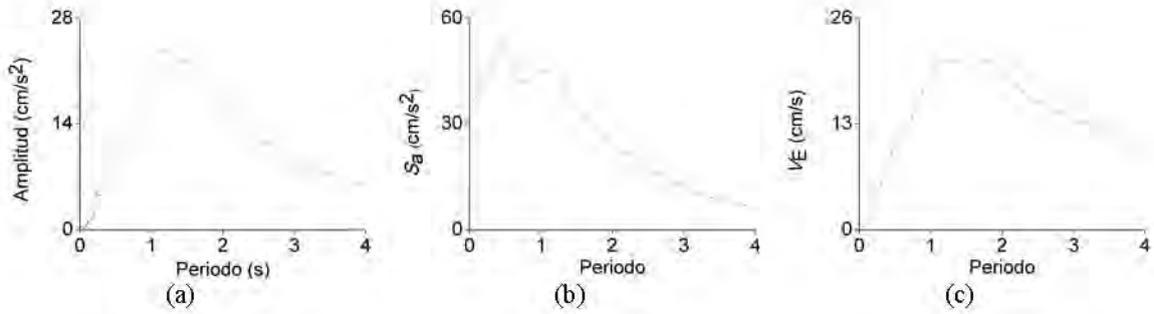


Figura D.12 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 12.

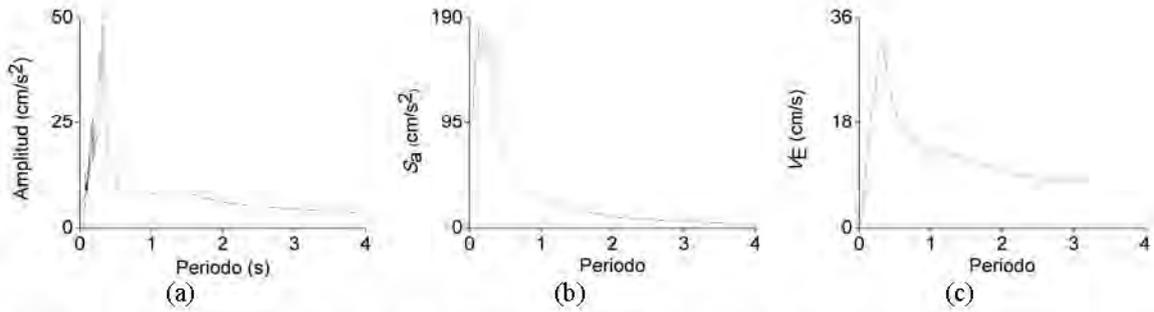


Figura D.13 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 13.

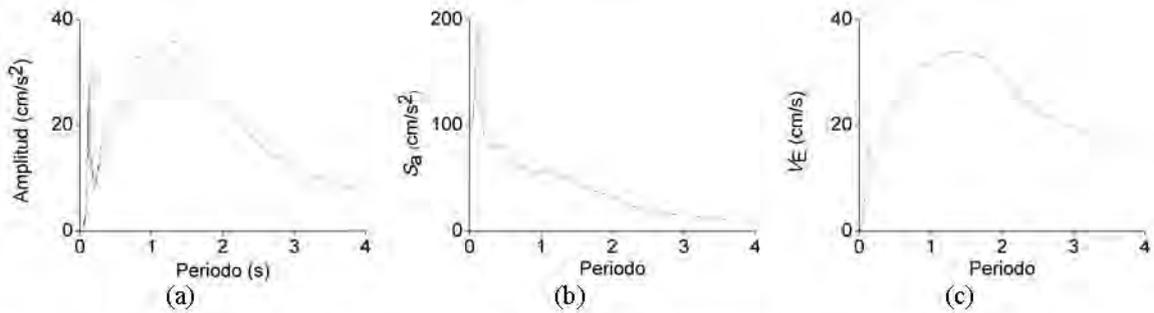


Figura D.14 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 14.

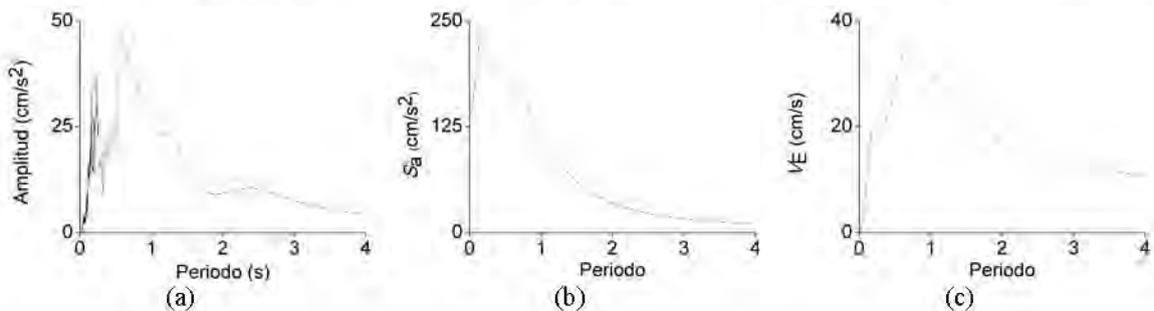


Figura D.15 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 15.

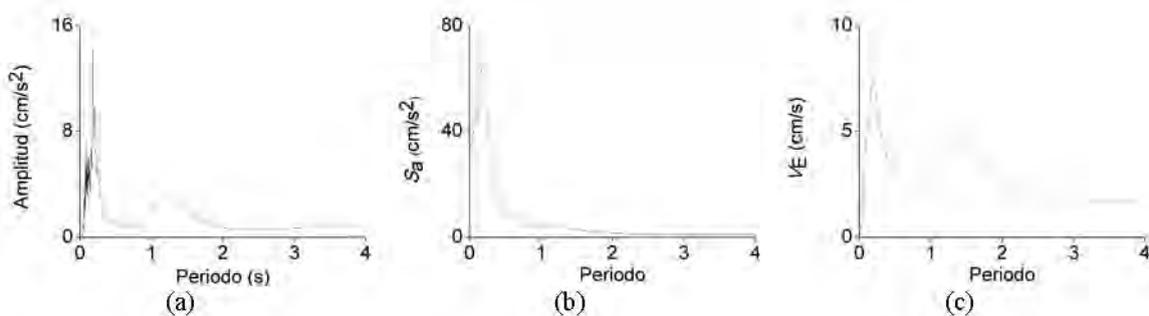


Figura D.16 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 16.

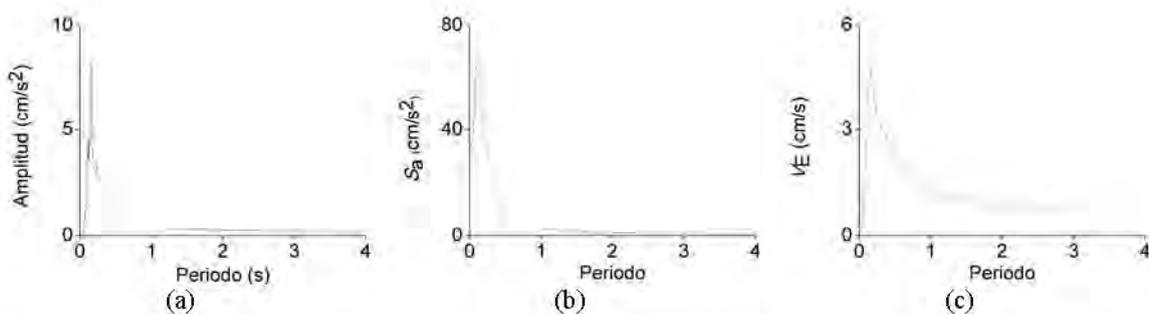


Figura D.17 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 17.

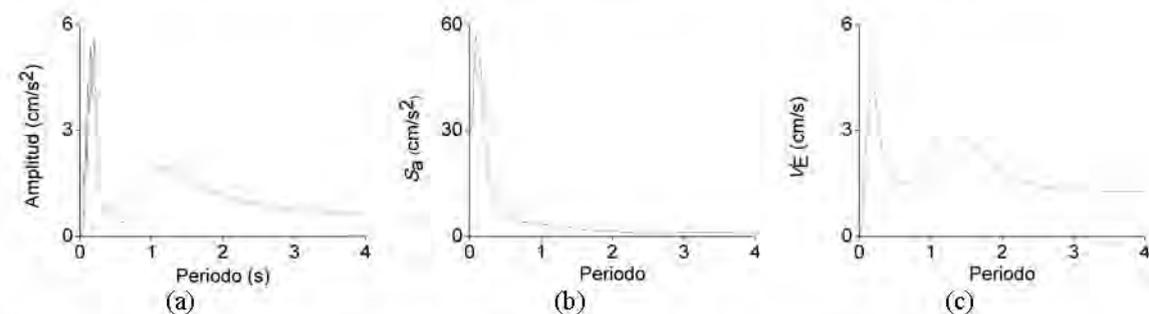


Figura D.18 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 18.

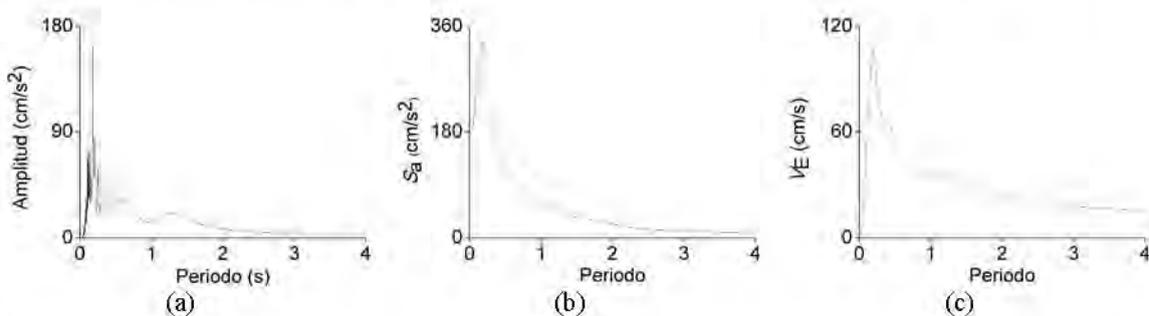


Figura D.19 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 19.

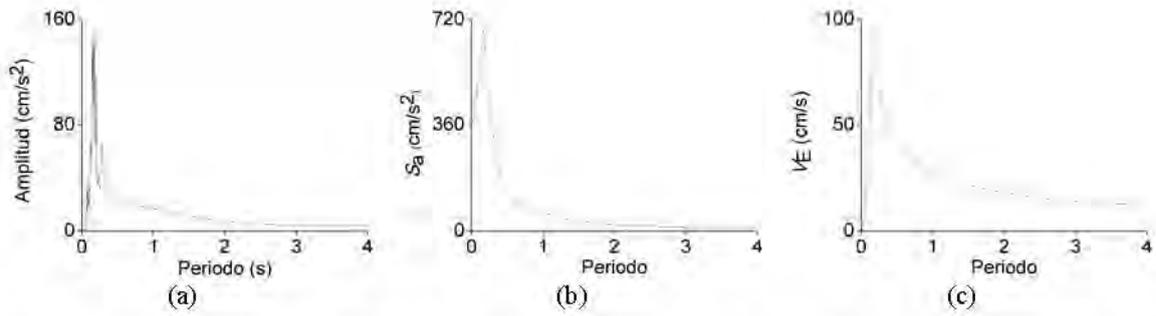


Figura D.20 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 20.

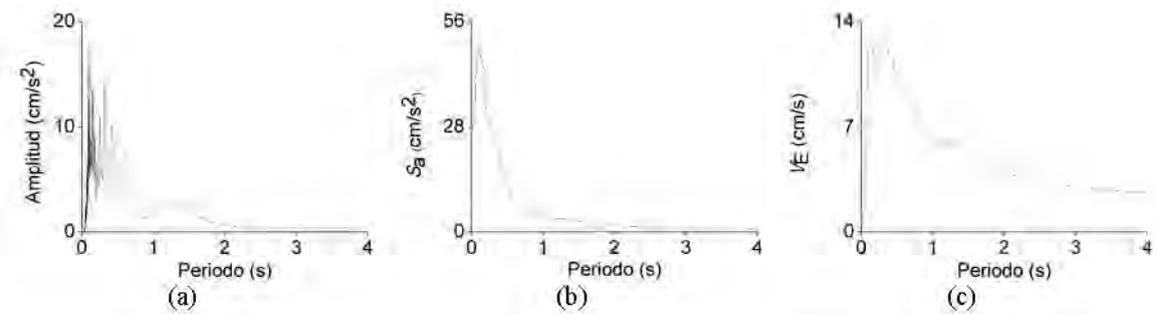


Figura D.21 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 21.

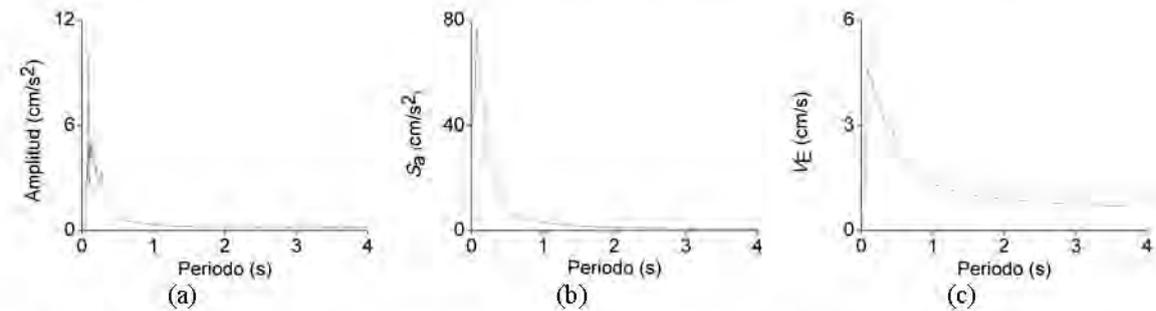


Figura D.22 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 22.

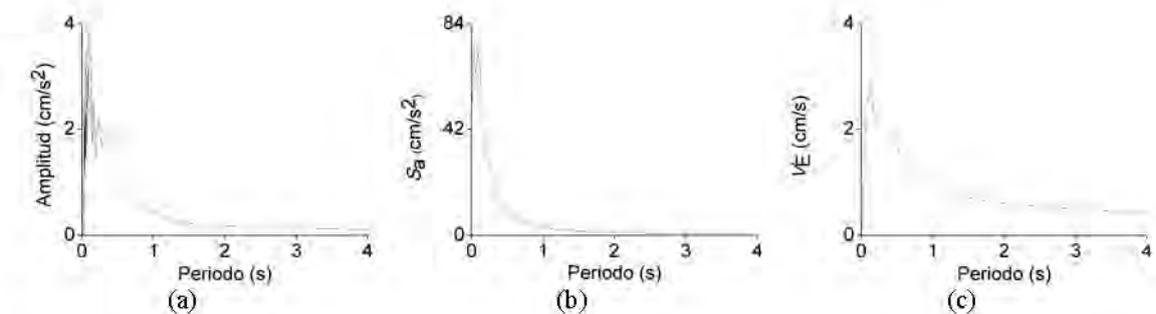


Figura D.23 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 23.

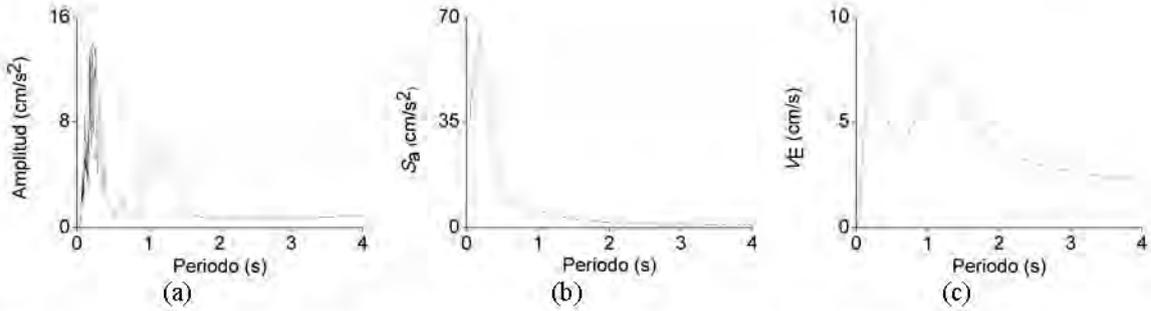


Figura D.24 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 24.

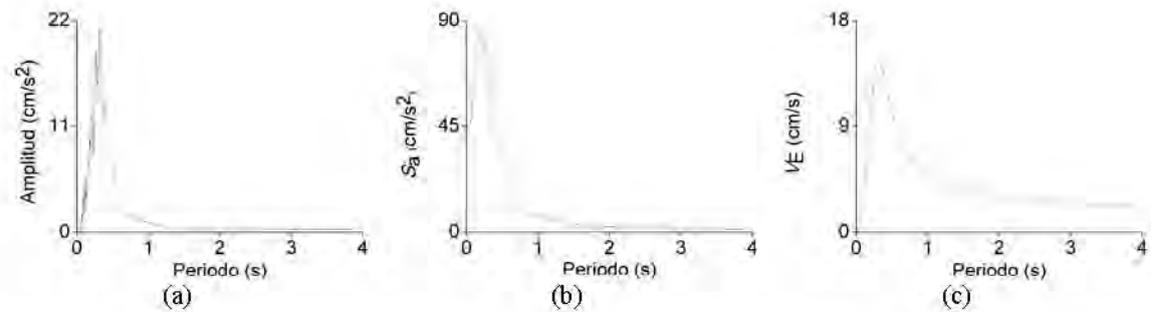


Figura D.25 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 25.

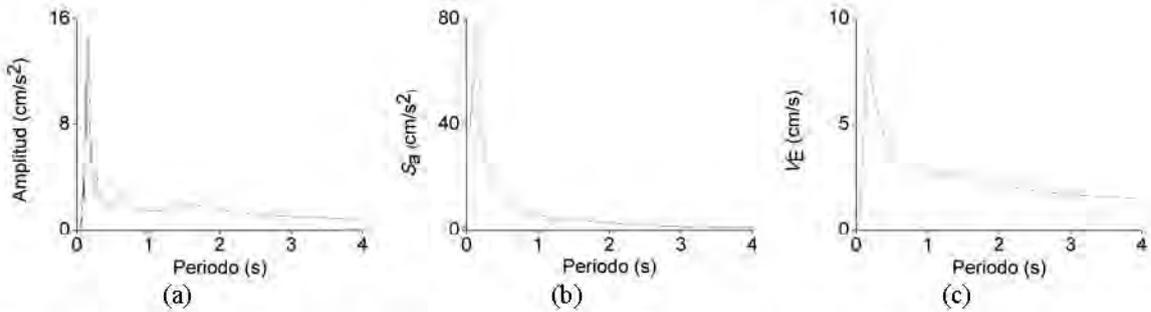


Figura D.26 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 26.

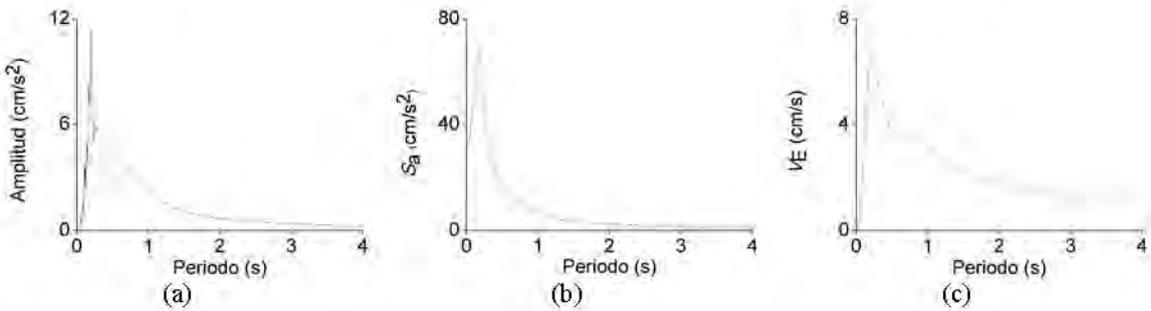


Figura D.27 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 27.

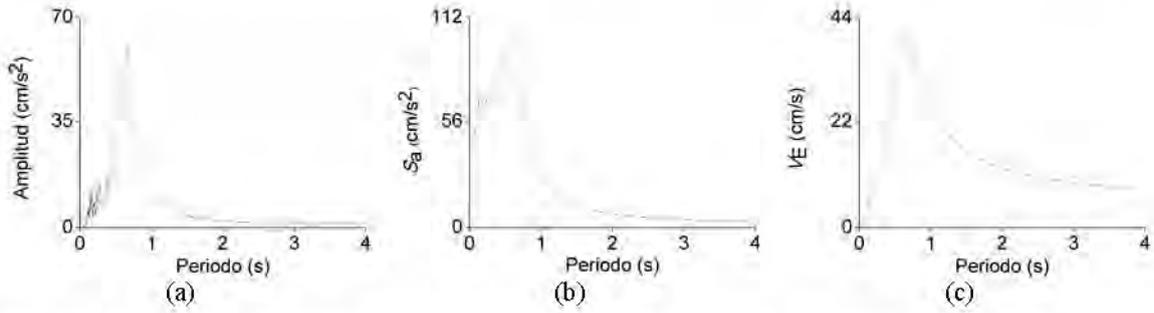


Figura D.28 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 28.

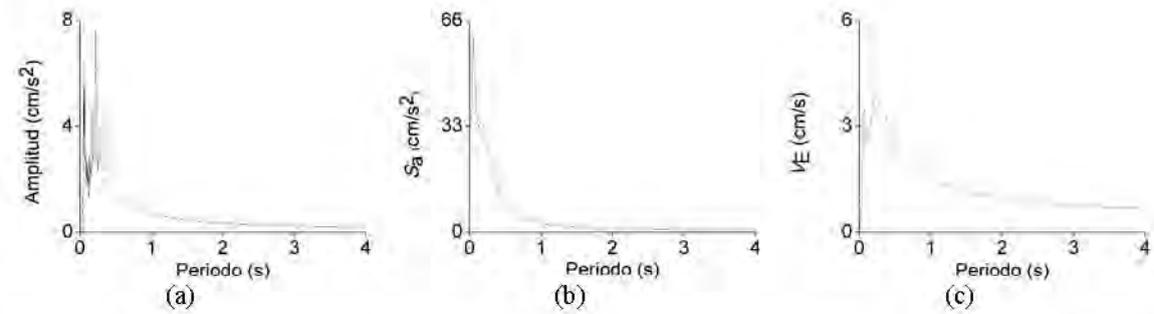


Figura D.29 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 29.

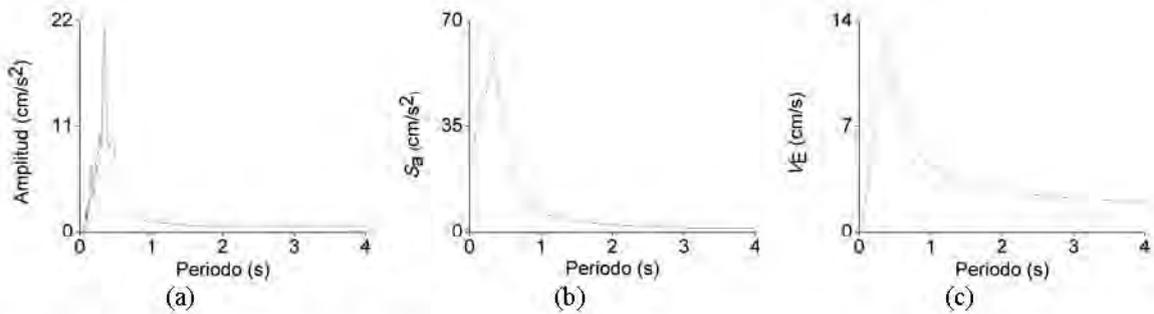


Figura D.30 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 30.

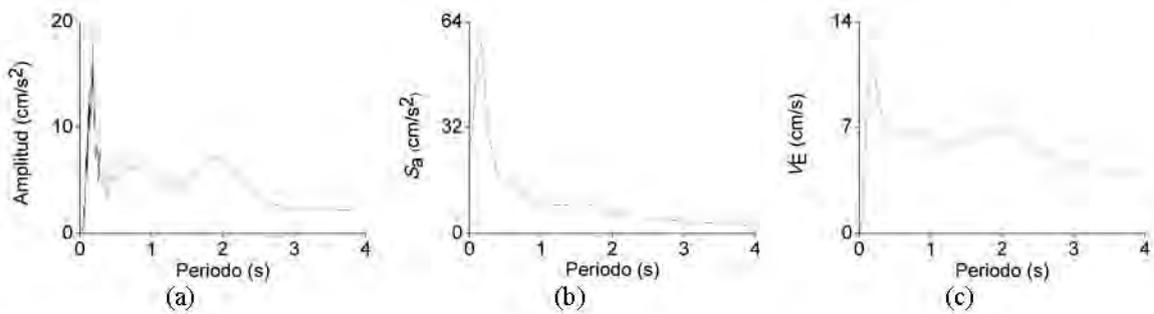


Figura D.31 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 31.

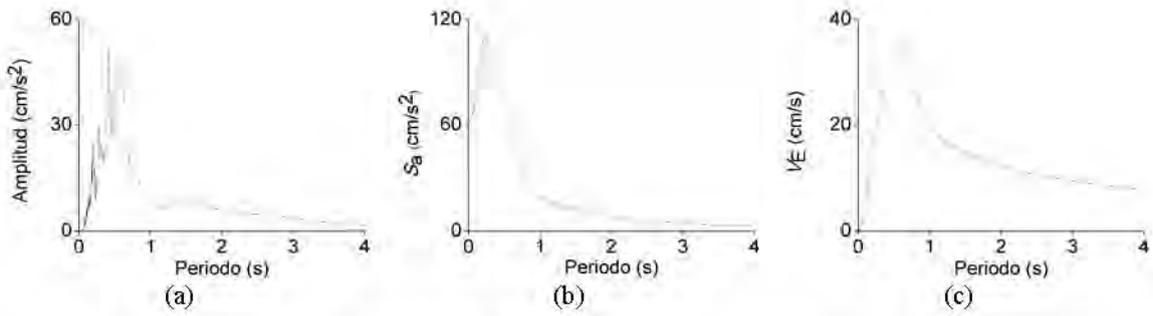


Figura D. 32 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 32.

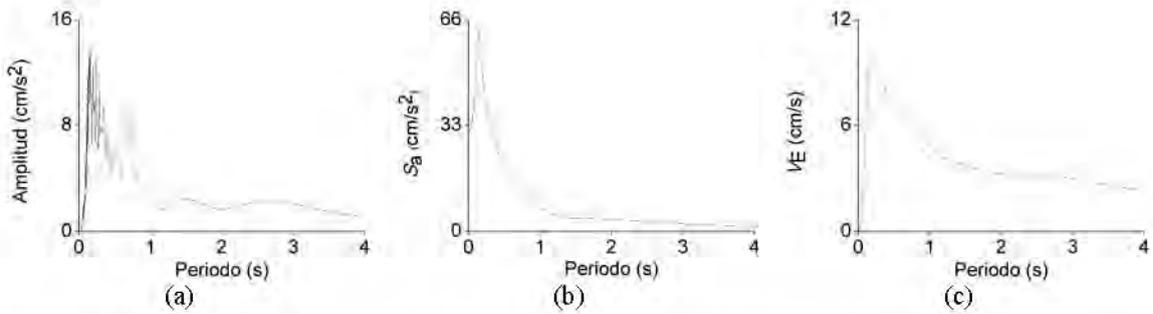


Figura D.33 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 33.

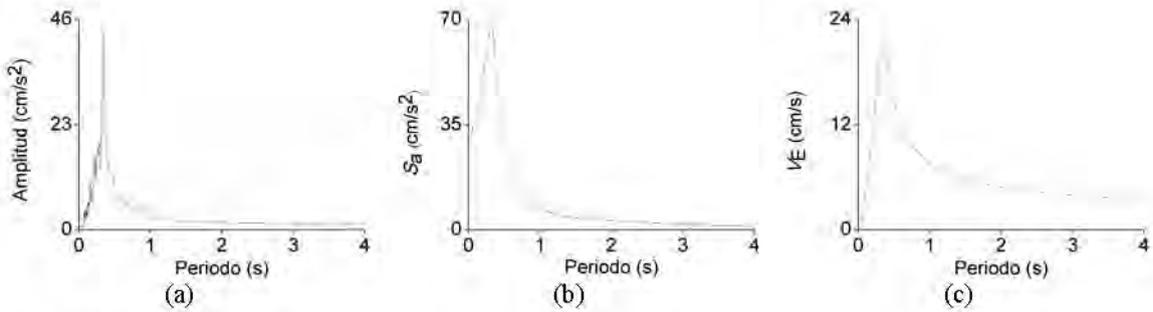


Figura D.34 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 34.

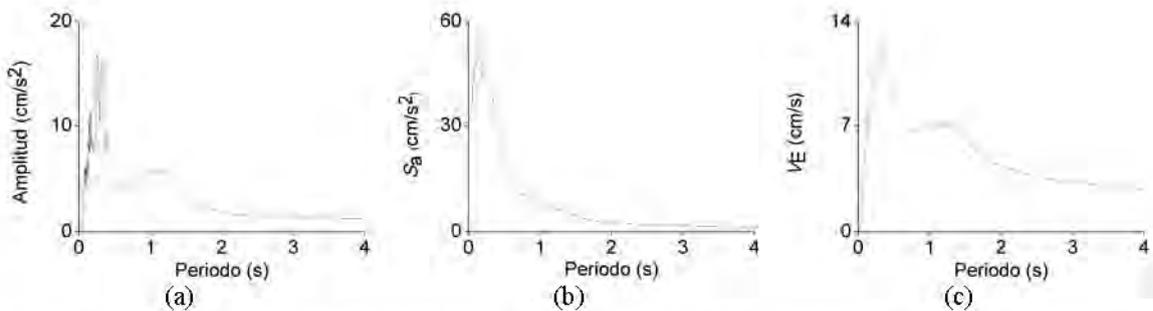


Figura D.35 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 35.

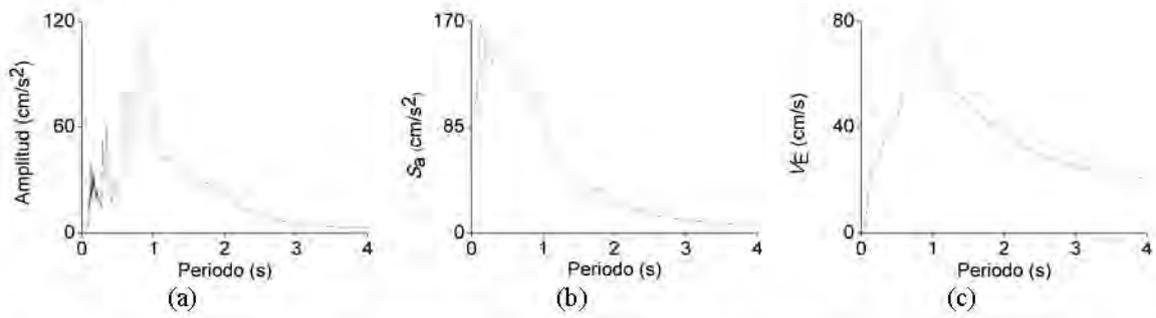


Figura D.36 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 36.

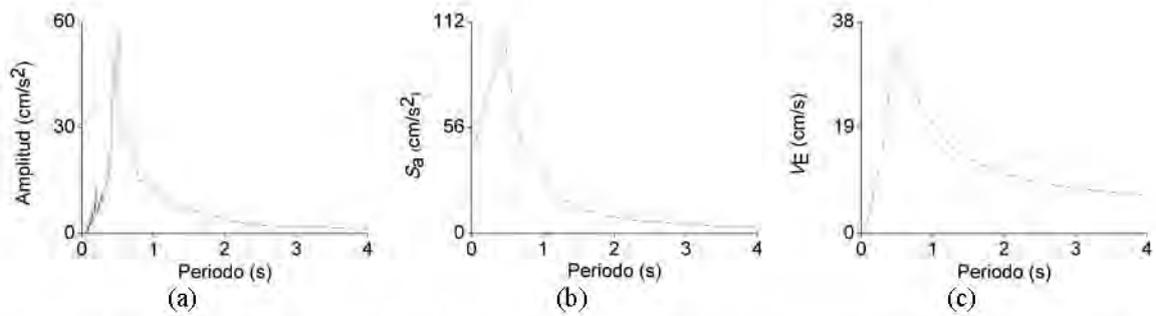


Figura D.37 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 37.

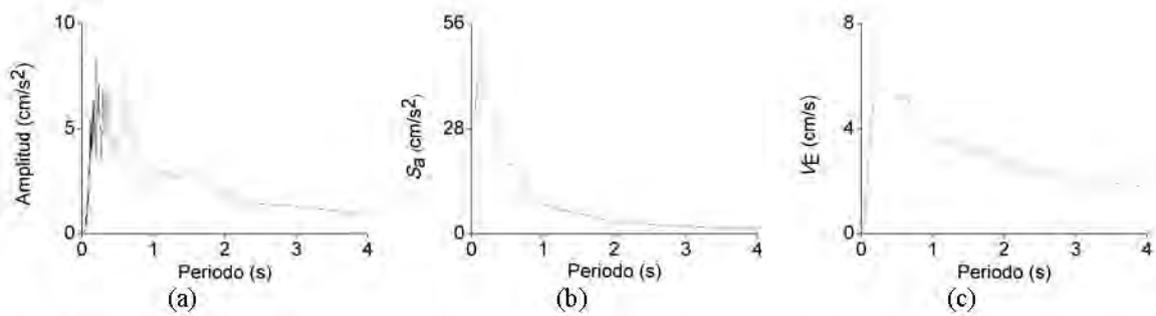


Figura D.38 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 38.

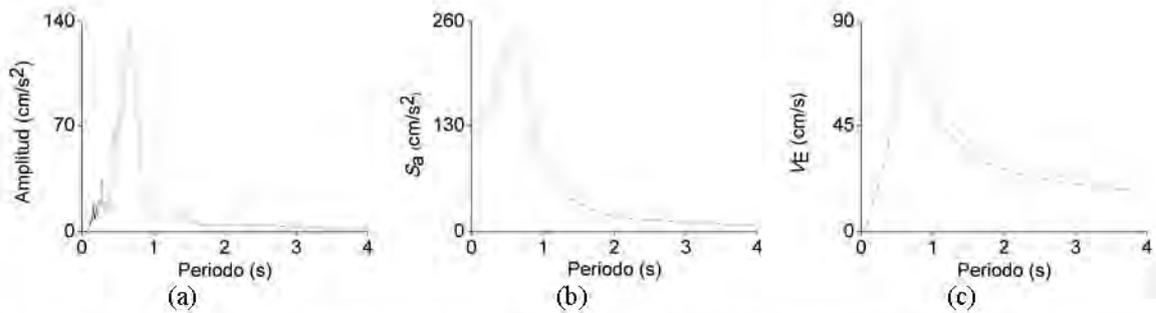


Figura D.39 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 39.

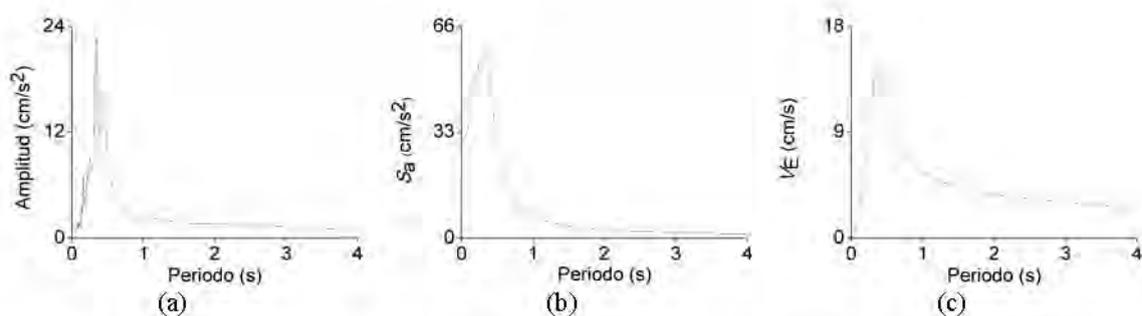


Figura D.40 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 40.

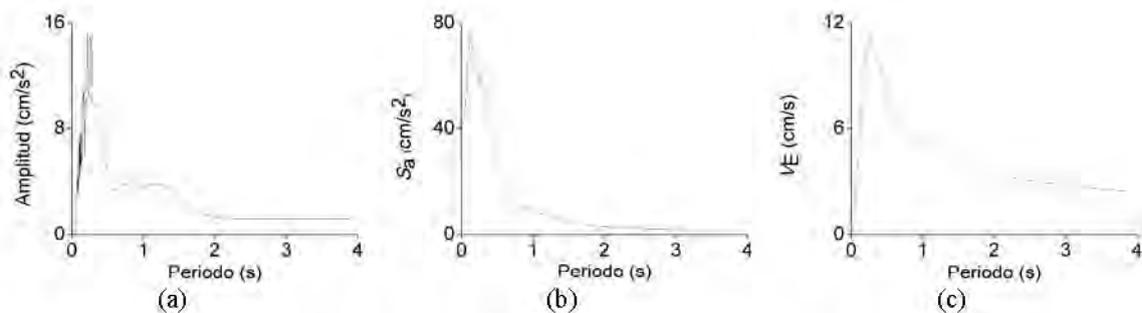


Figura D.41 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 41.

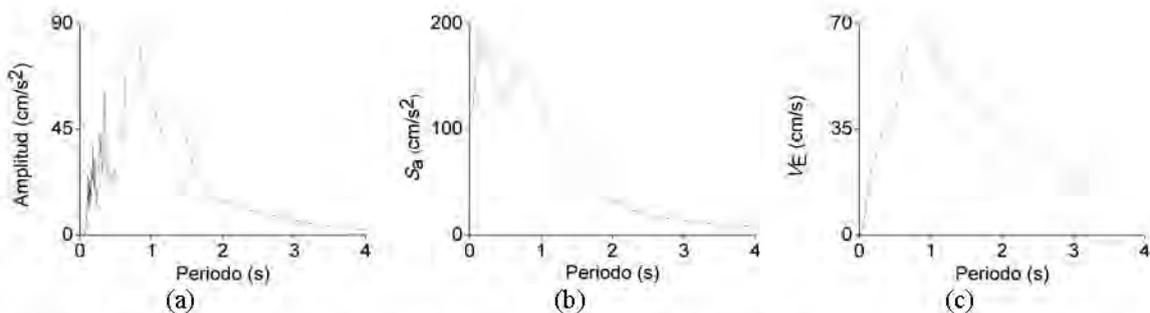


Figura D.42 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 42.

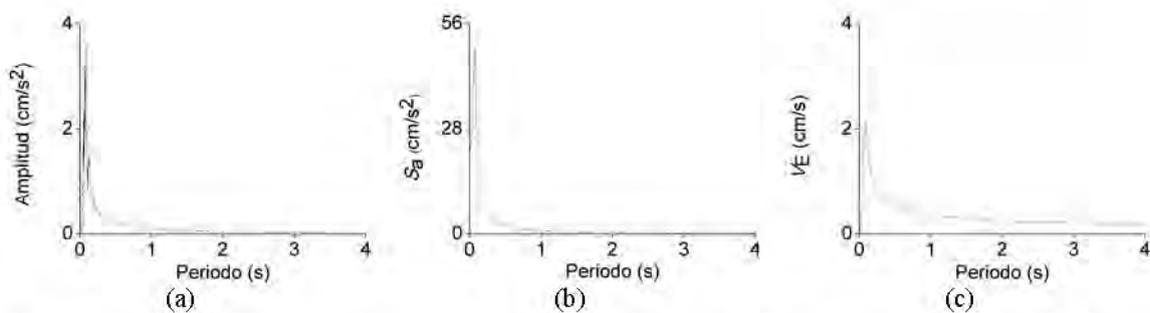


Figura D.43 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 43.

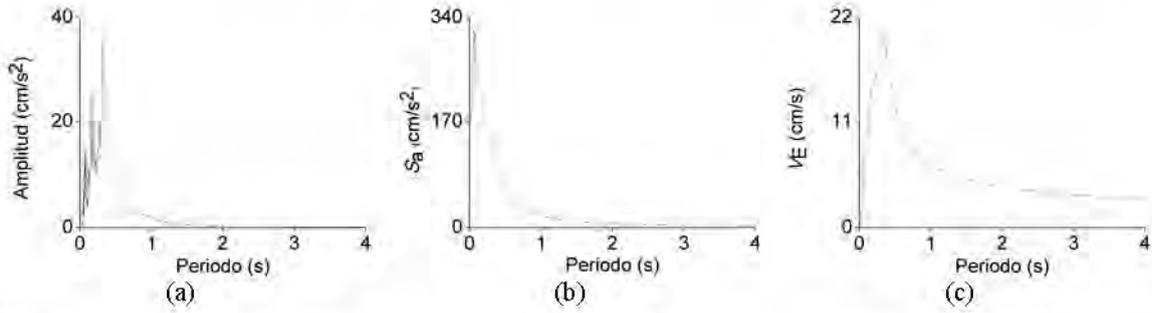


Figura D.44 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 44.

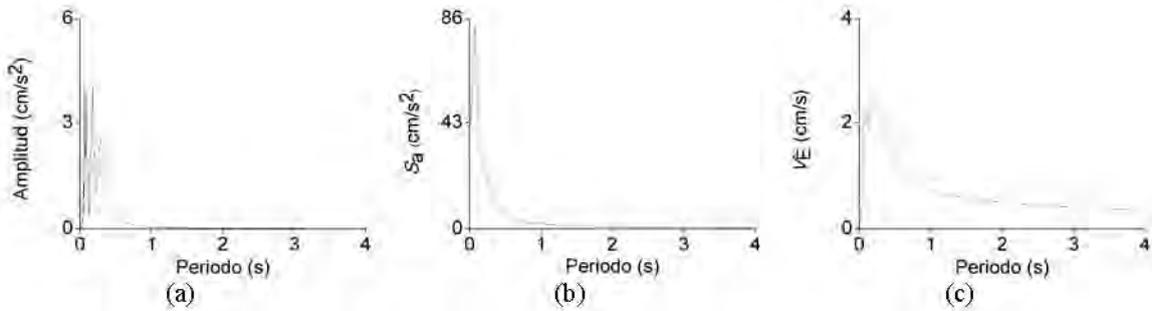


Figura D.45 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 45.

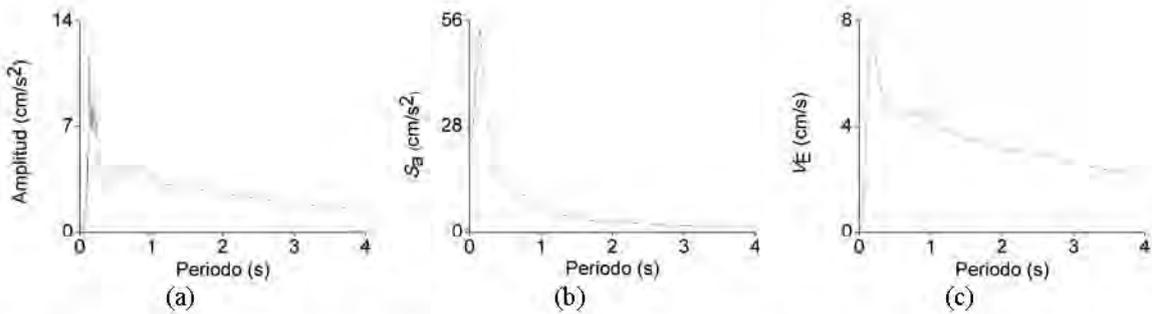


Figura D.46 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 46.

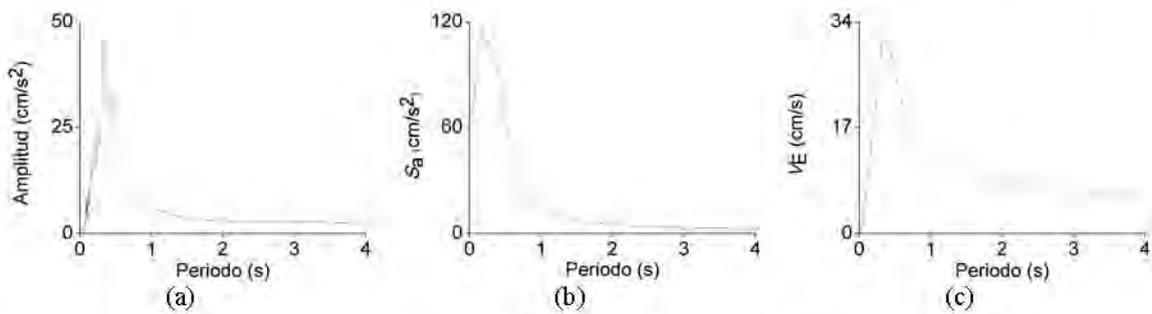


Figura D.47 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 47.

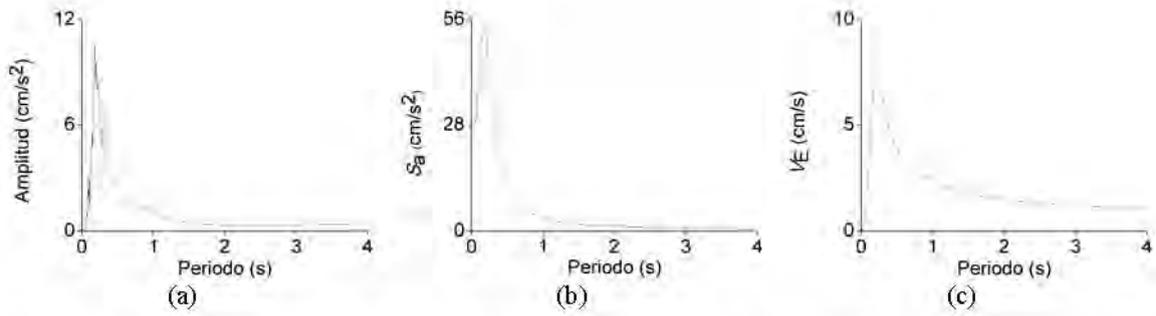


Figura D.48 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 48.

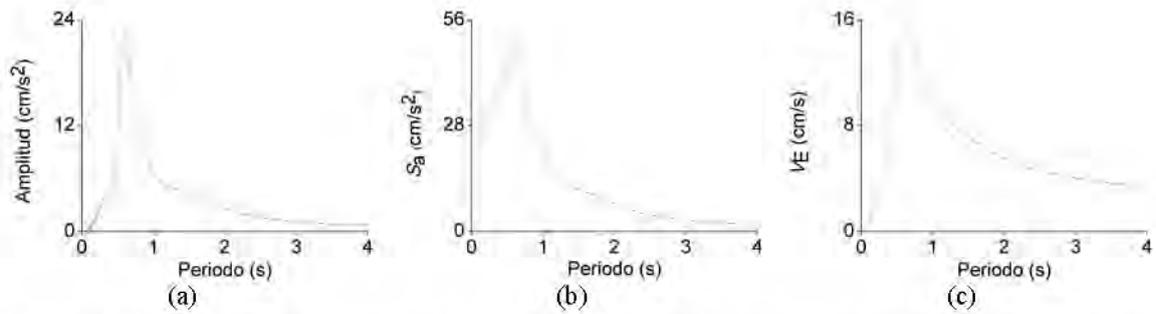


Figura D.49 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 49.

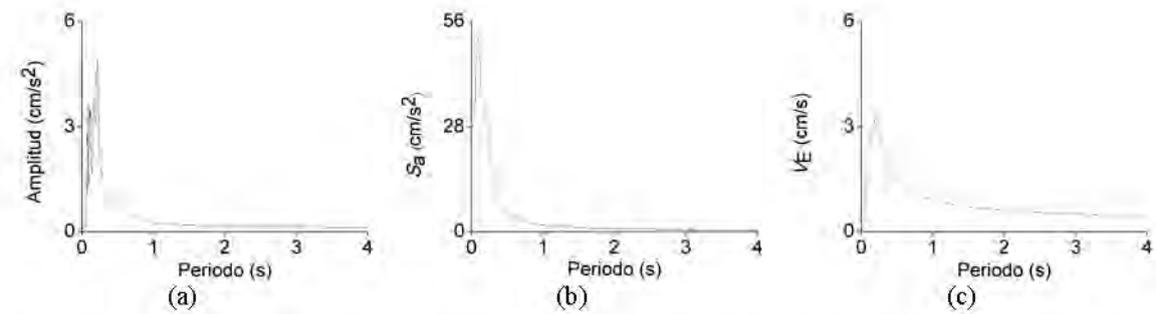


Figura D.50 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 50.

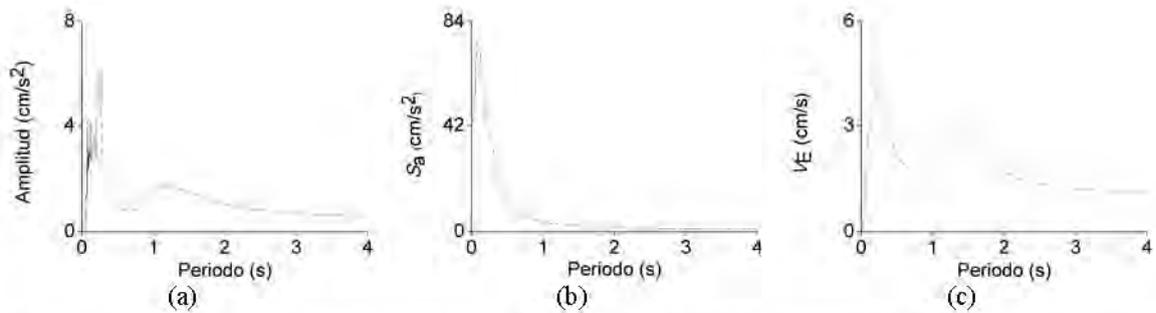


Figura D.51 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 51.

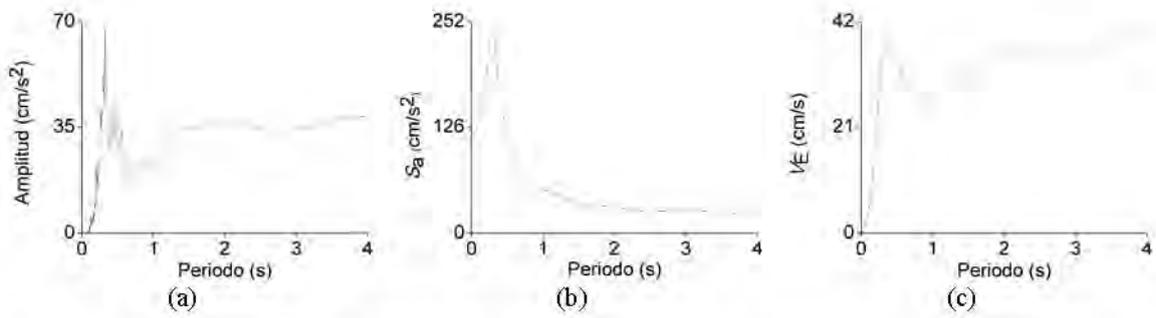


Figura D.52 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 52.

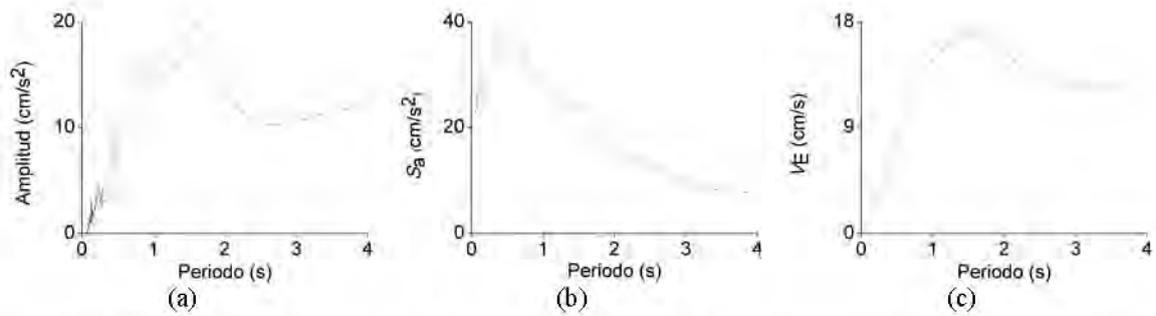


Figura D. 53 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 53.

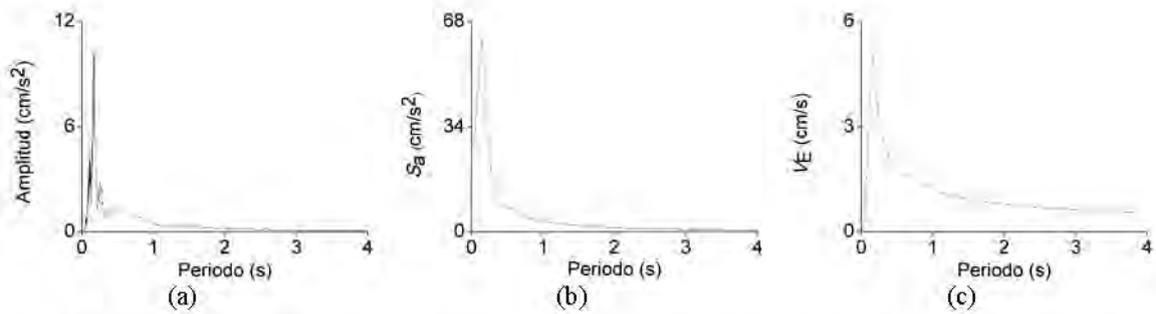


Figura D.54 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 54.

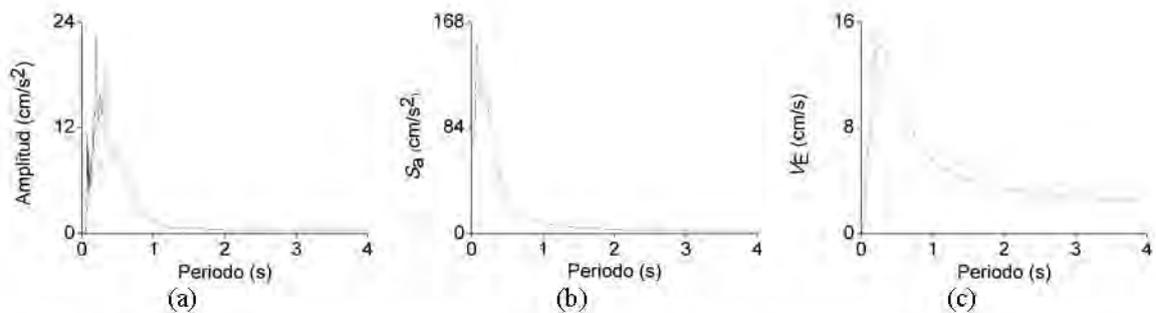


Figura D.55 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 55.

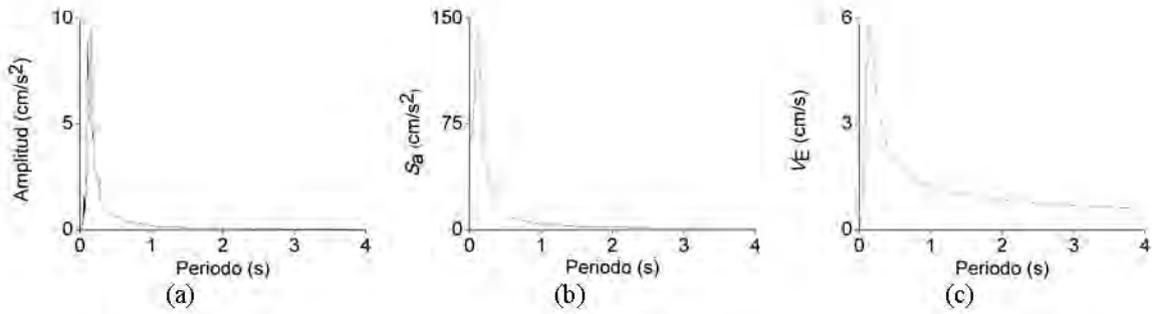


Figura D.56 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 56.

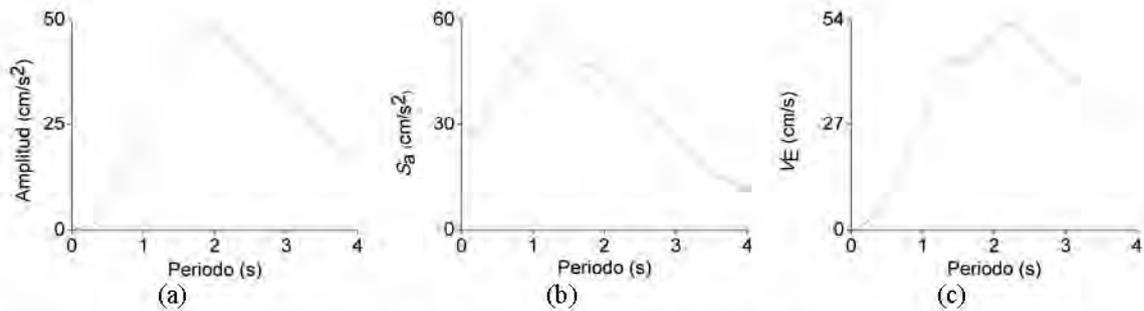


Figura D.57 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 57.

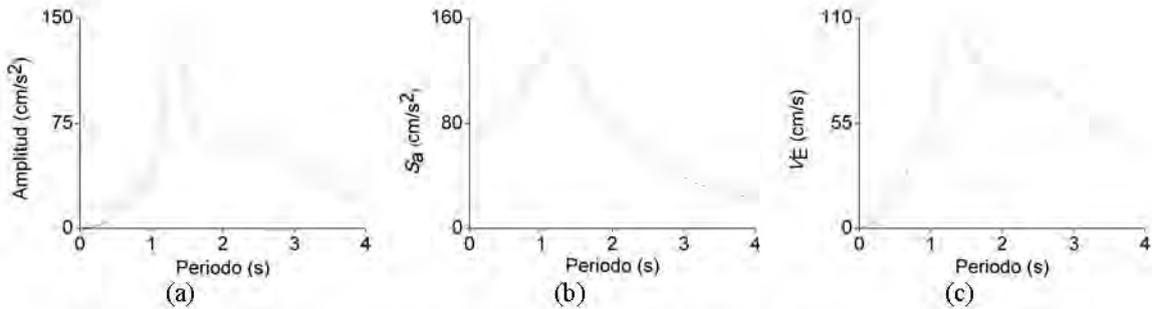


Figura D.58 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 58.

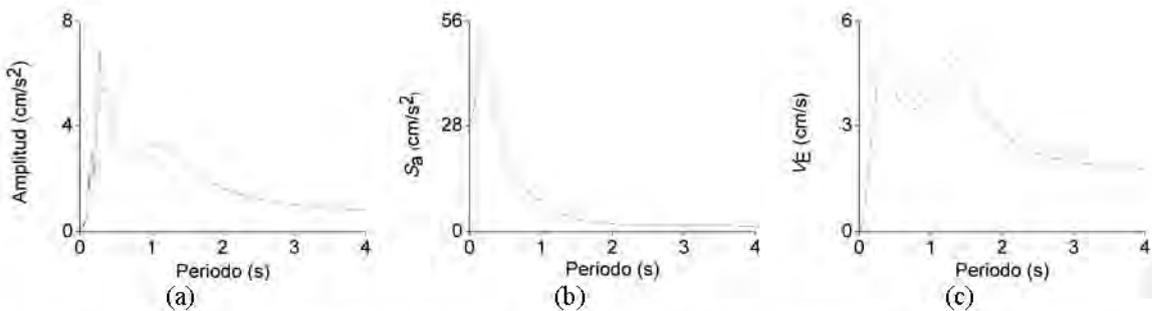


Figura D.59 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 59.

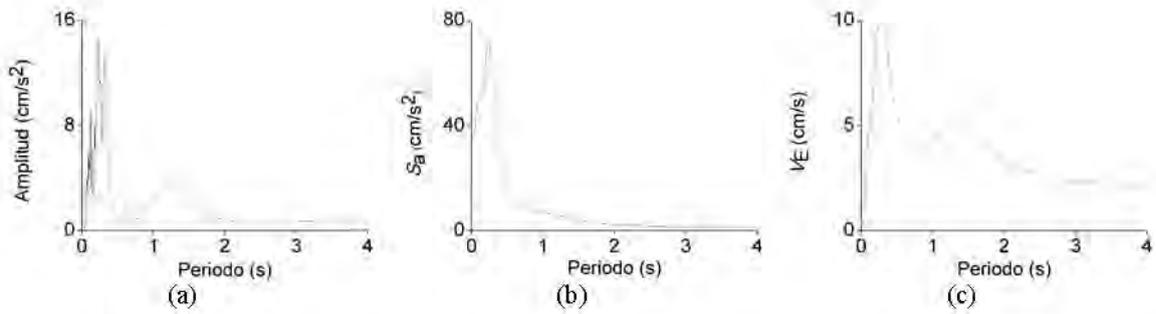


Figura D.60 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 60.

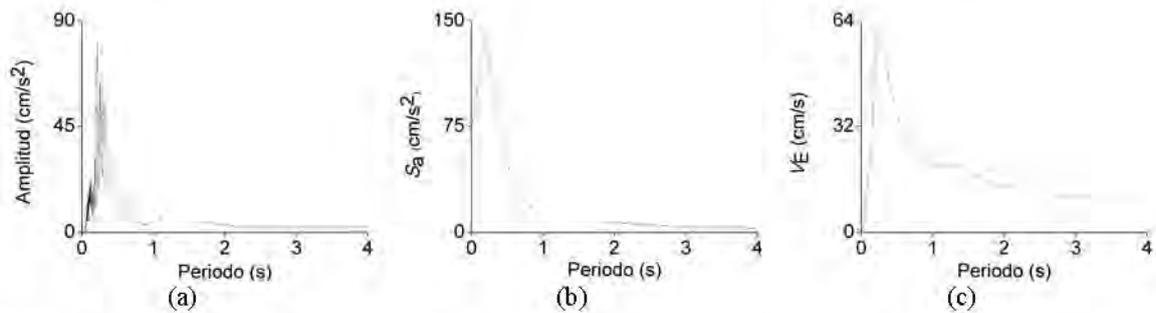


Figura D.61 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 61.

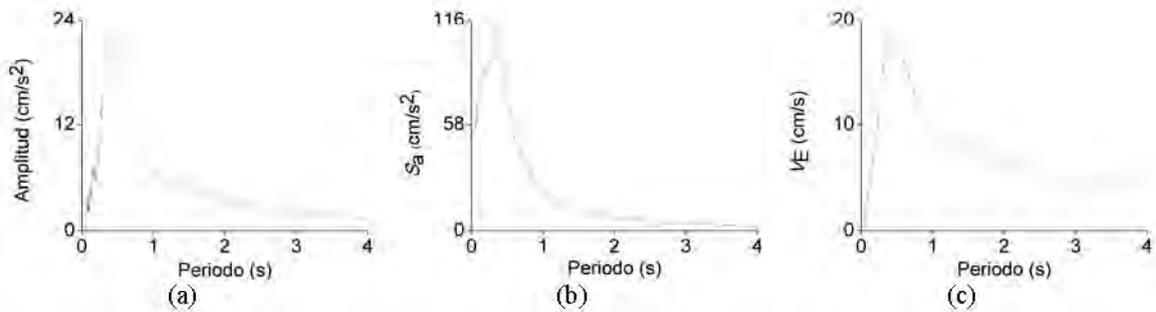


Figura D.62 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 62.

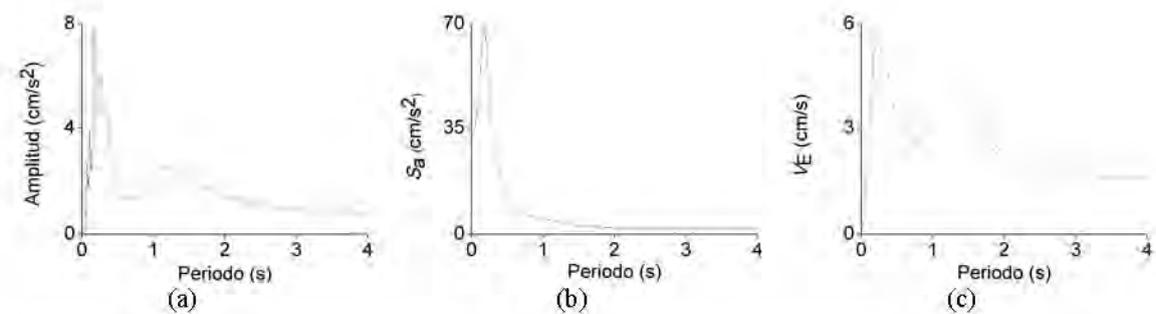


Figura D.63 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 63.

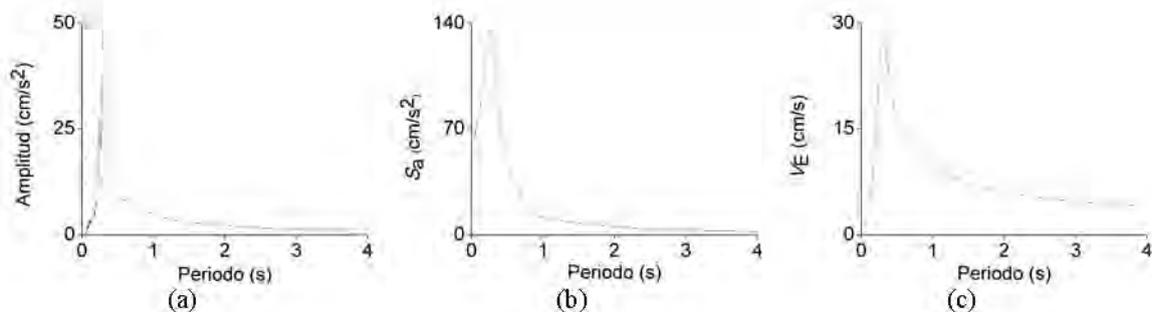


Figura D.64 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 64.

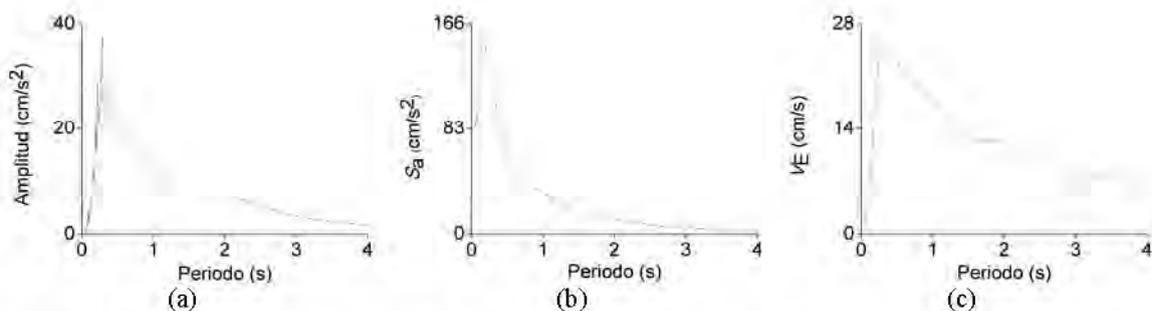


Figura D.65 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 65.

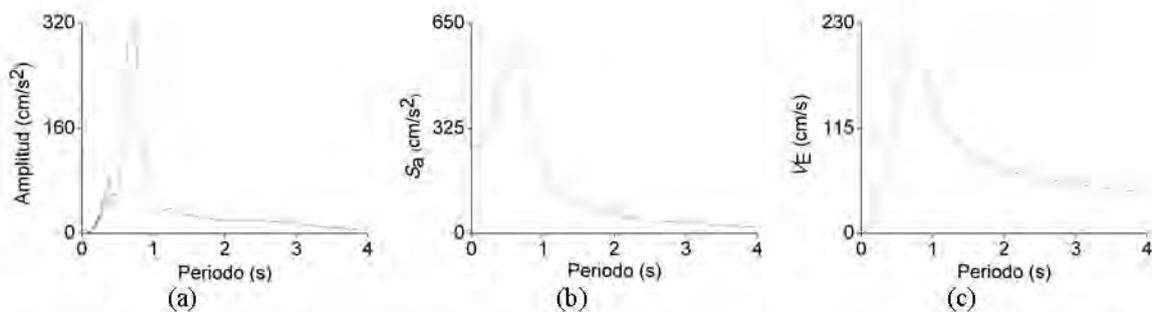


Figura D.66 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 66.

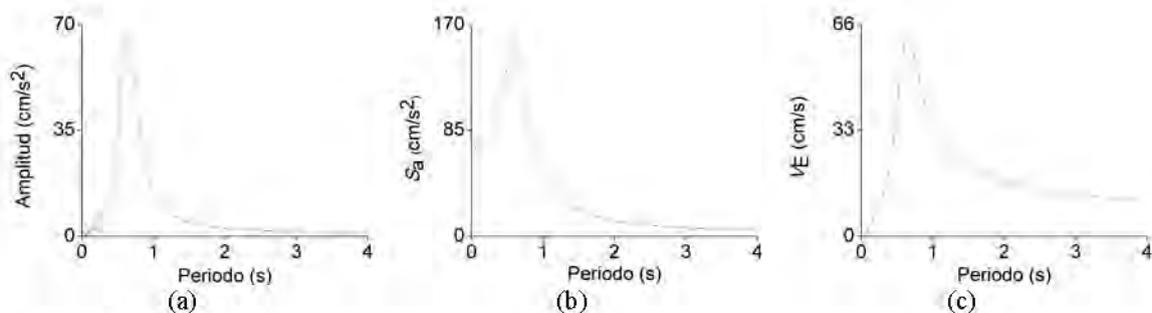


Figura D.67 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 67.

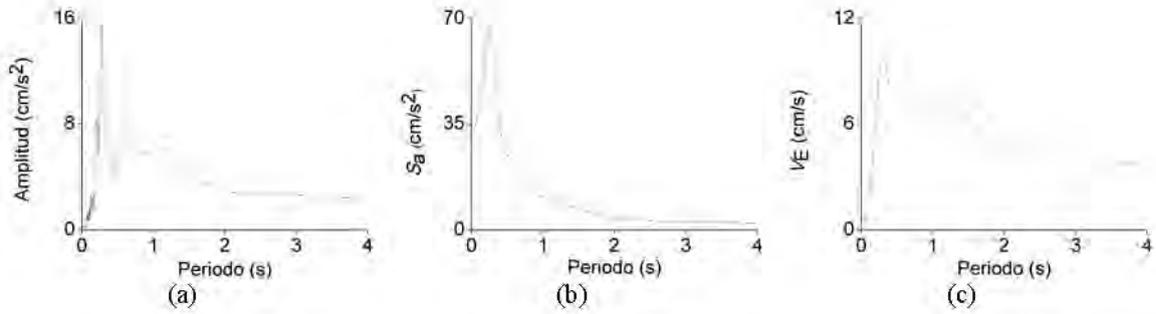


Figura D.68 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 68.

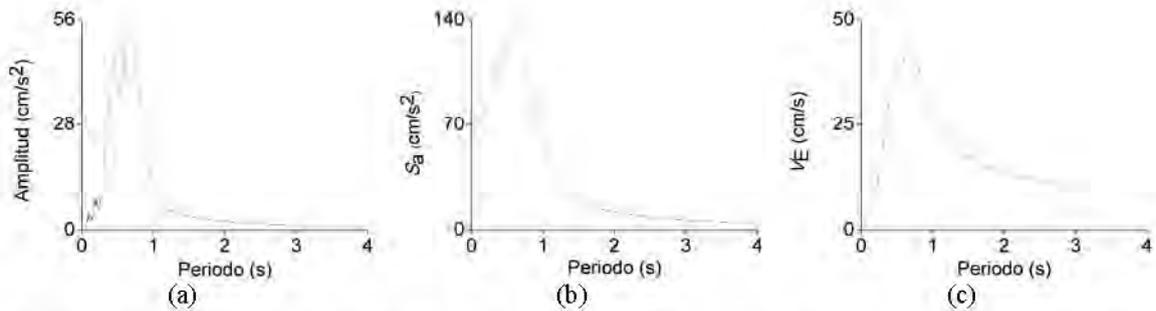


Figura D.69 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 69.

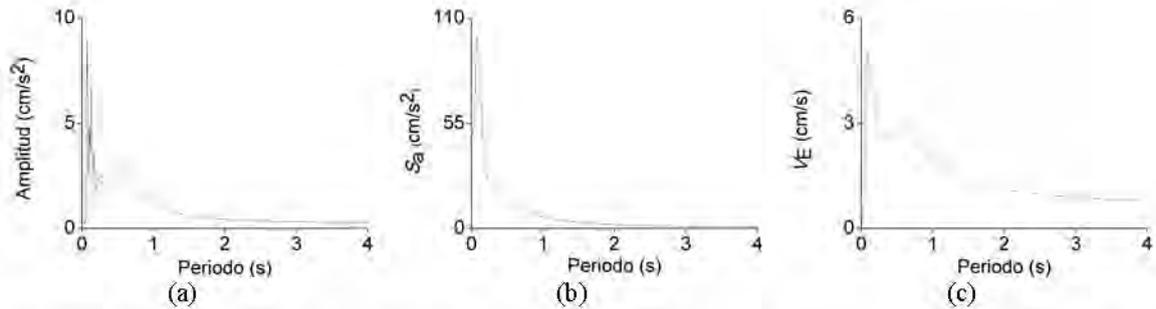


Figura D.70 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 70.

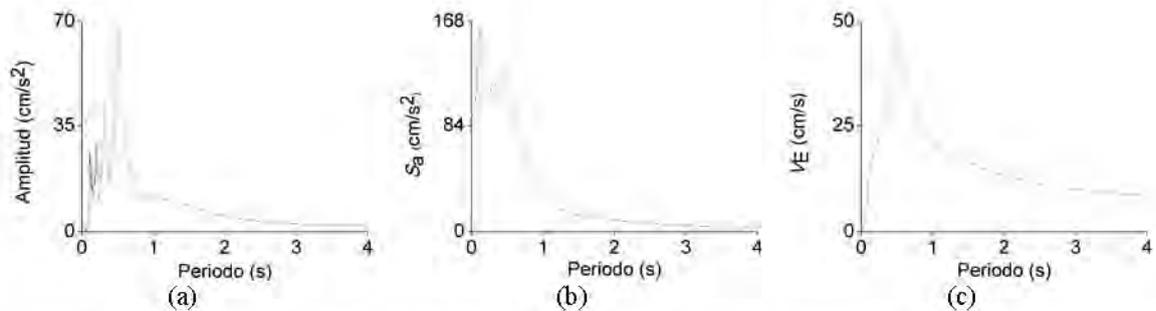


Figura D.71 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 71.

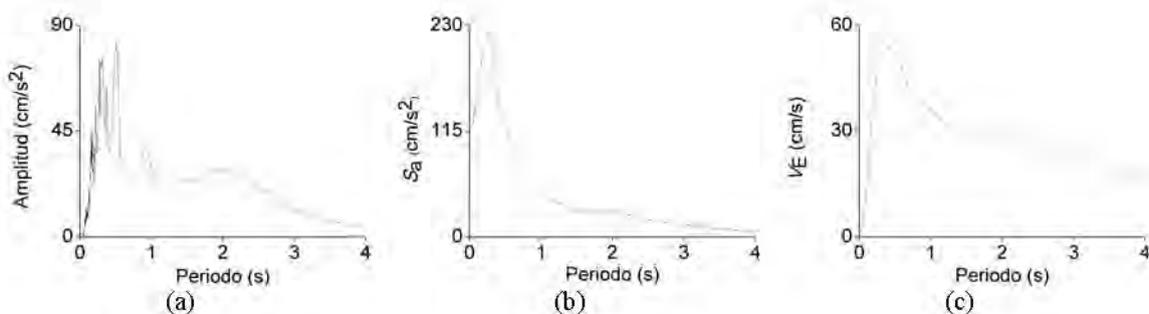


Figura D.72 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 72.

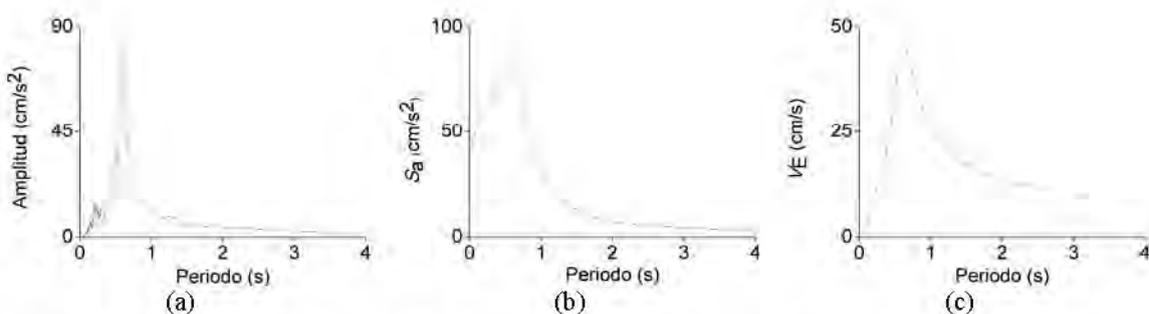


Figura D.73 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 73.

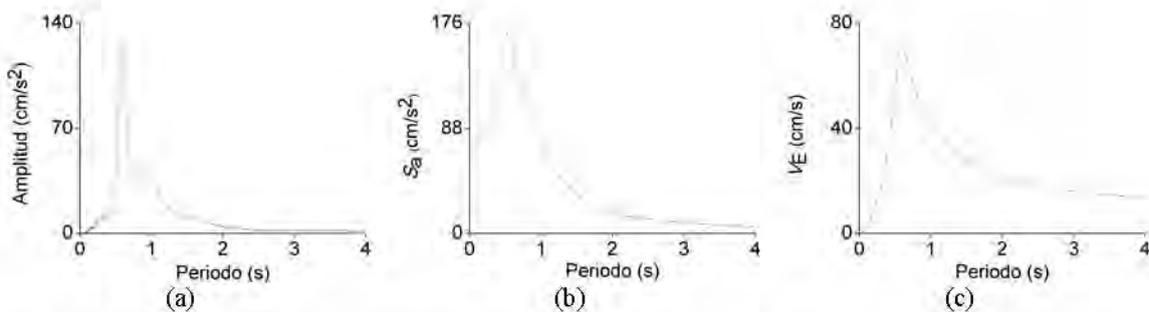


Figura D.74 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 74.

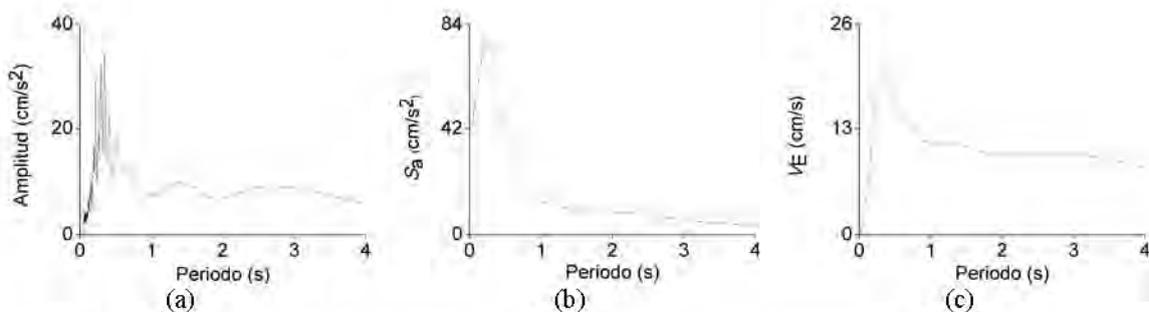


Figura D.75 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 75.

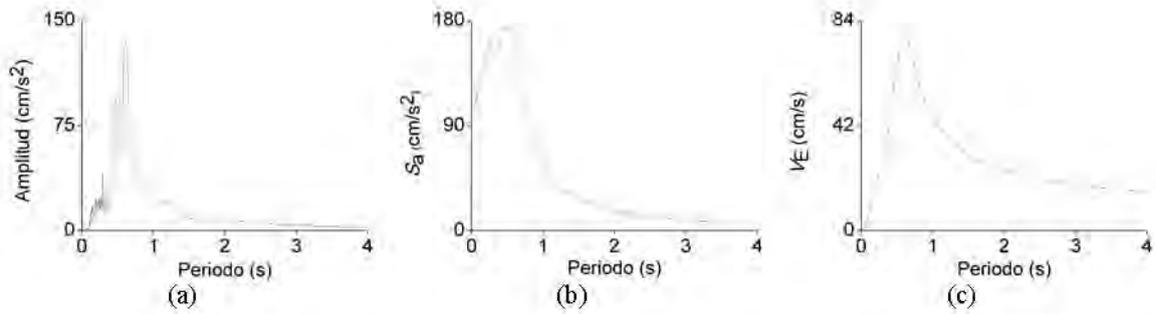


Figura D.76 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 76.

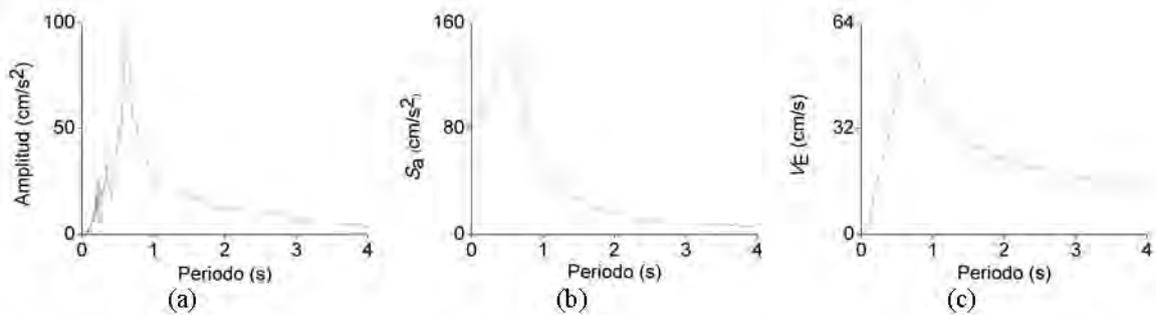


Figura D.77 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 77.

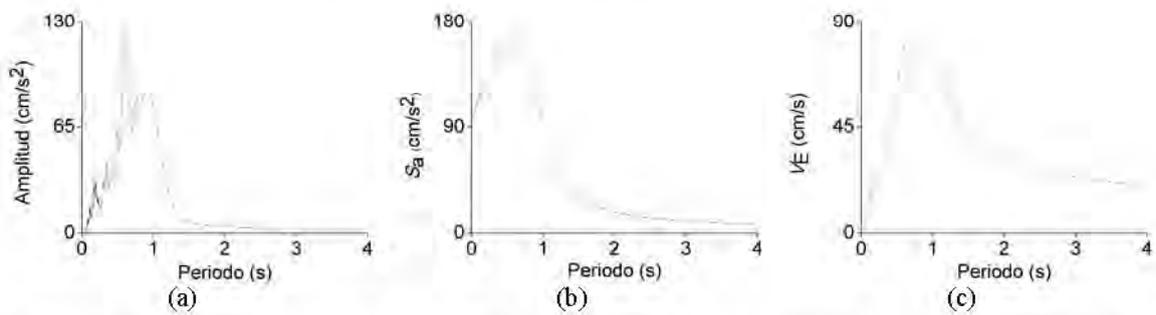


Figura D.78 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 78.

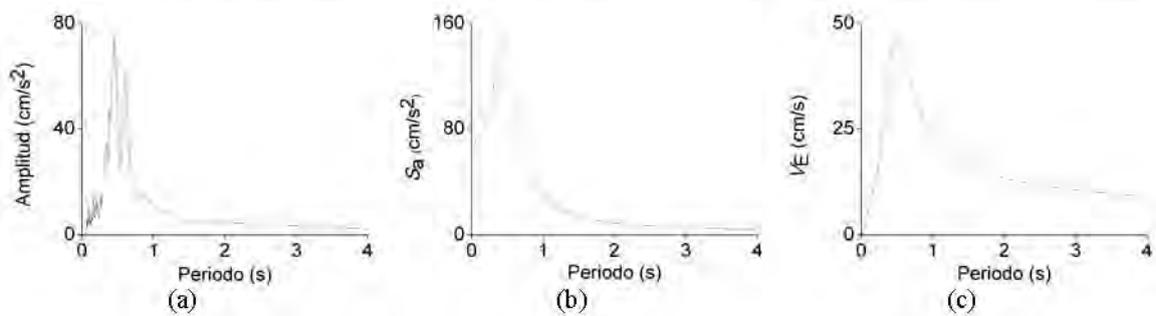


Figura D.79 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 79.

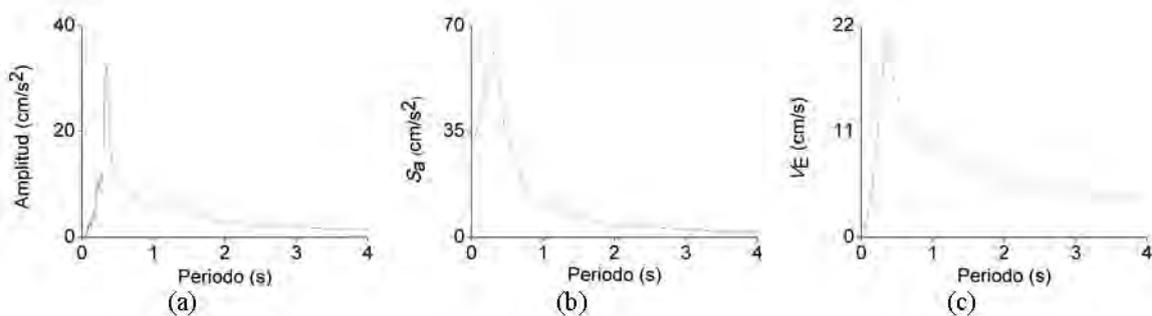


Figura D.80 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 80.

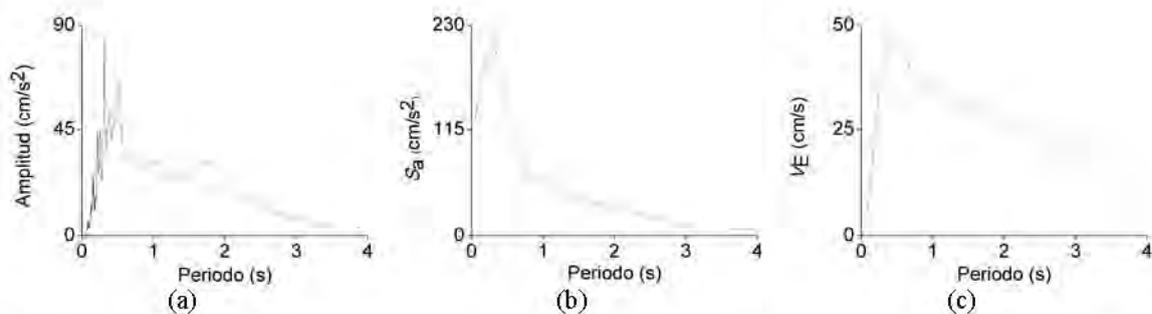


Figura D.81 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 81.

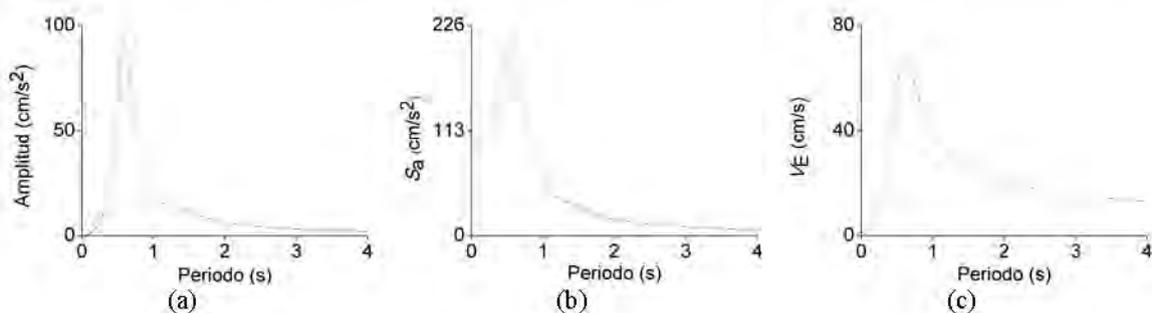


Figura D.82 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 82.

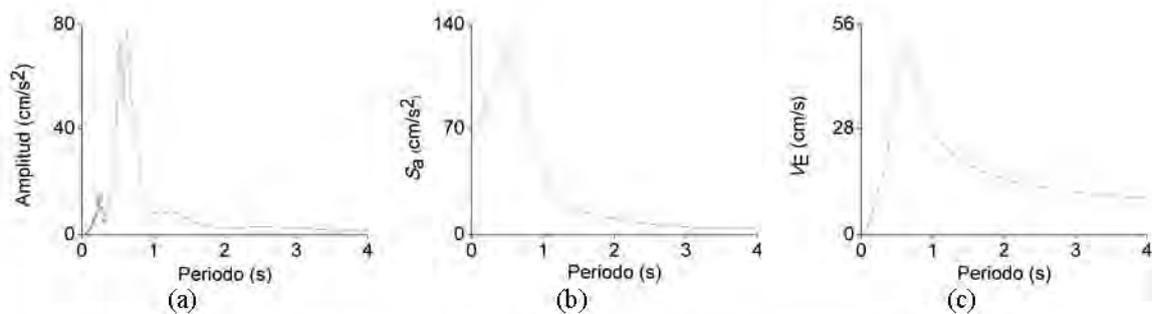


Figura D.83 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 83.

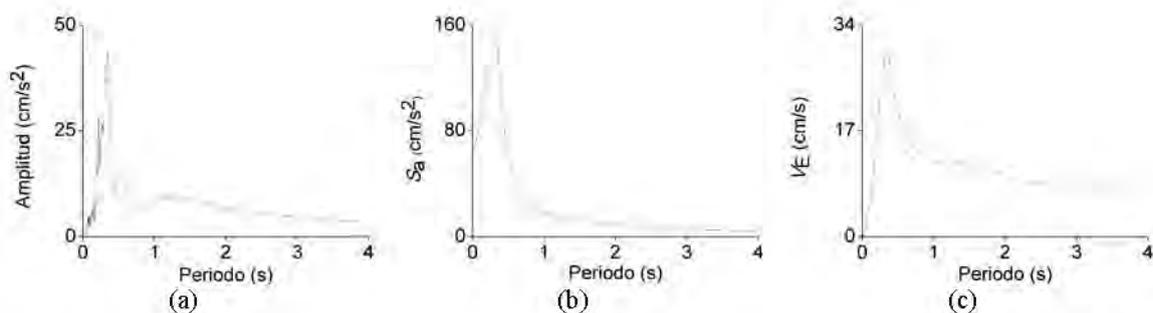


Figura D.84 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 84.

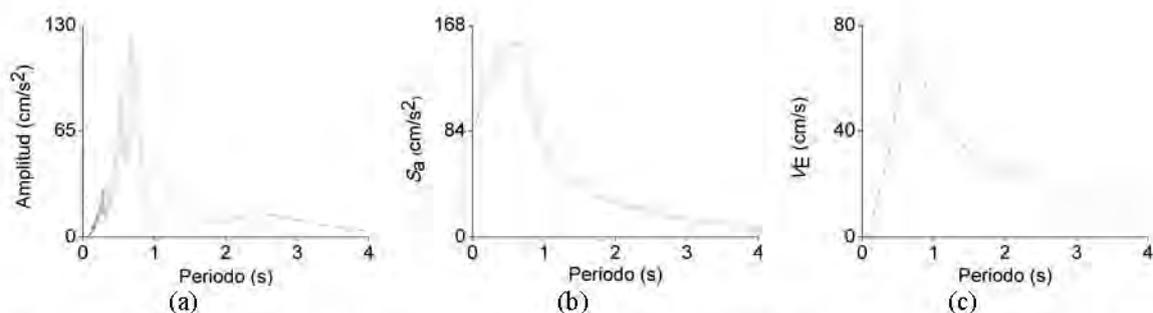


Figura D.85 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 85.

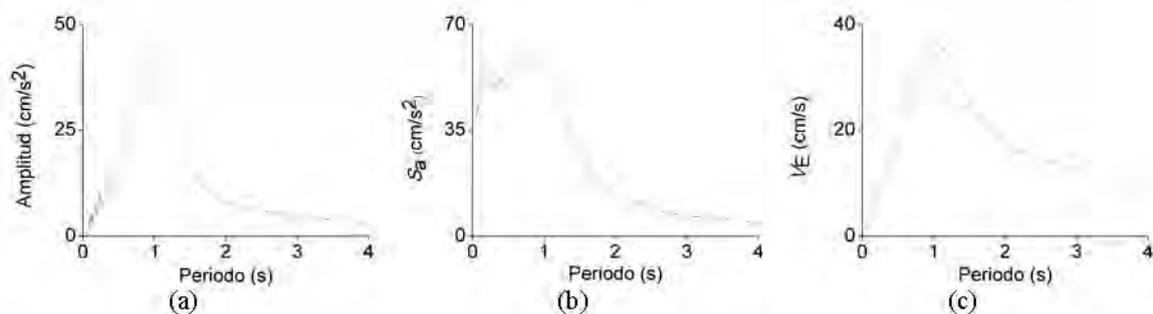


Figura D.86 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 86.

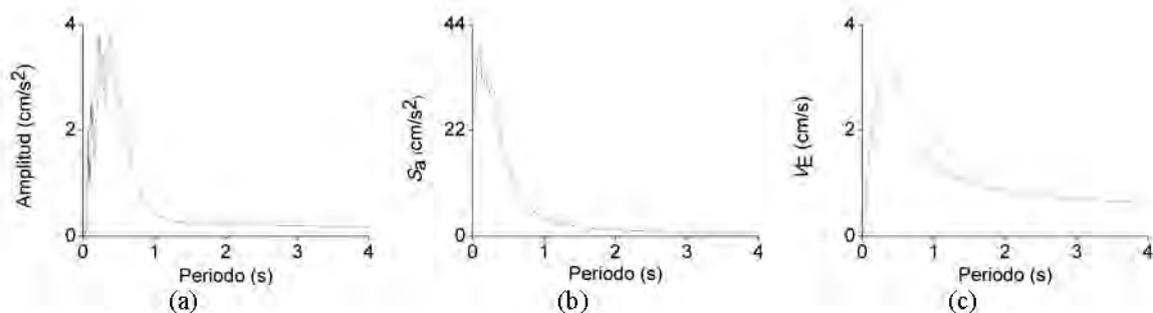


Figura D.87 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 87.

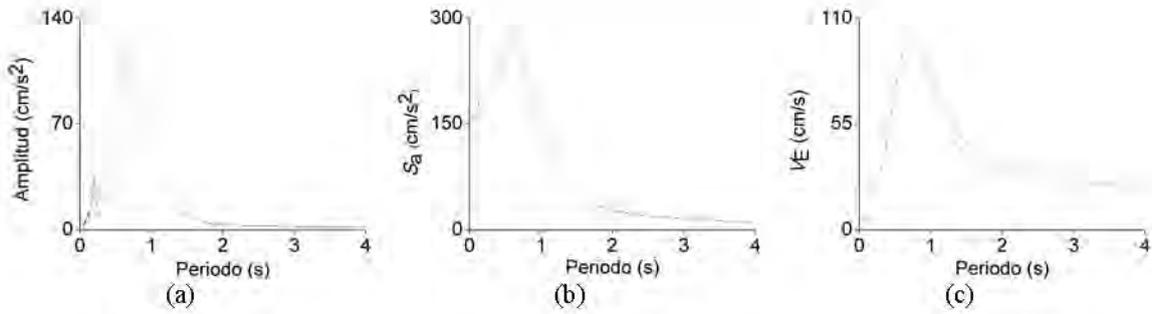


Figura D.88 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 89.

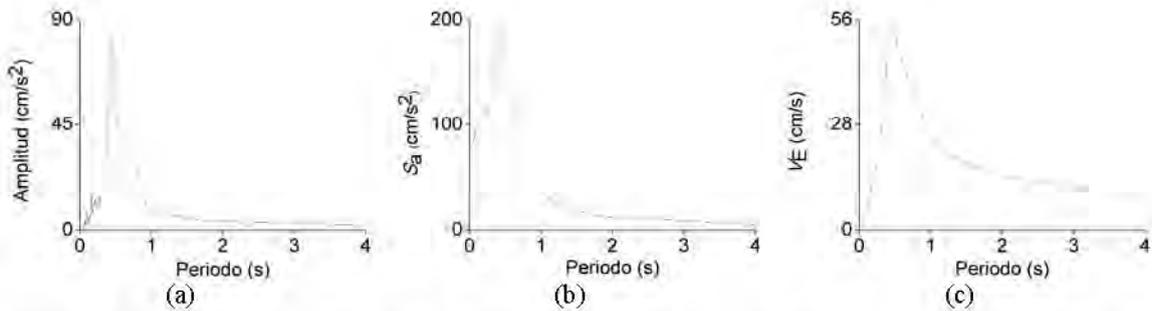


Figura D.89 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 89.

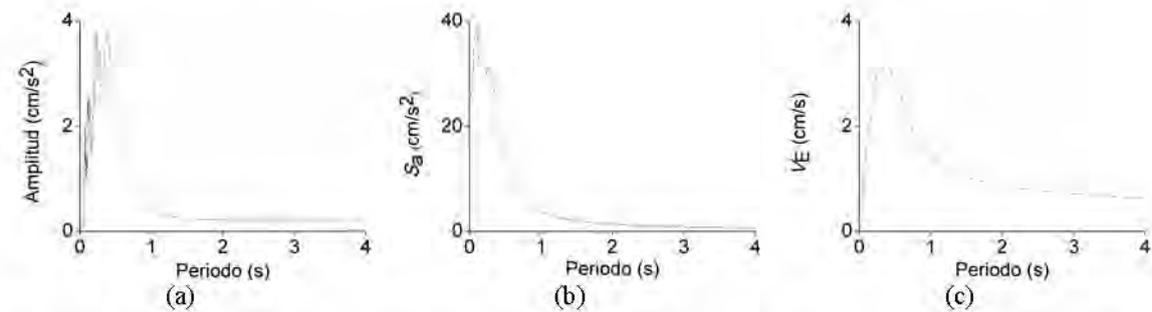


Figura D.90 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 90.

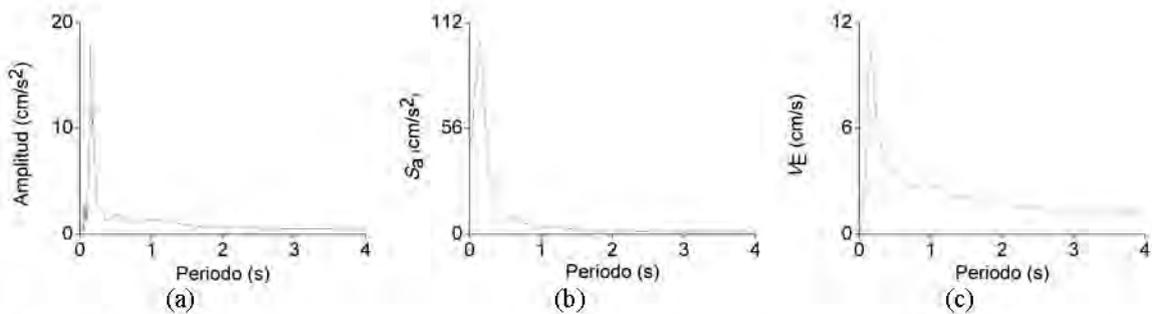


Figura D.91 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 91.

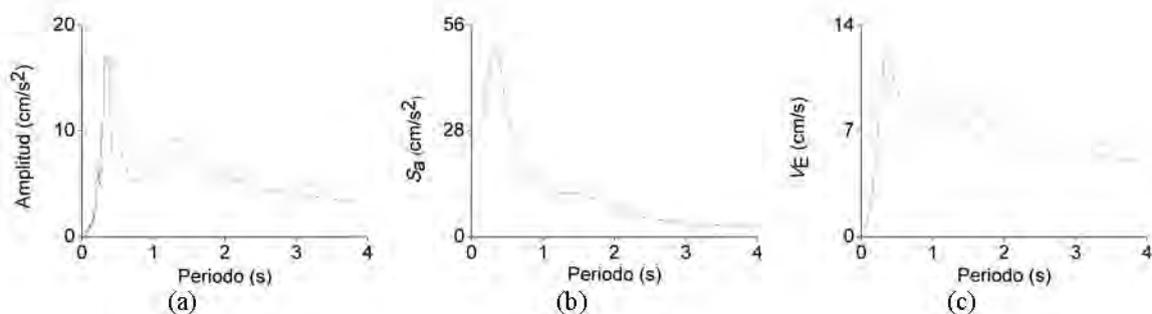


Figura D.92 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 92.

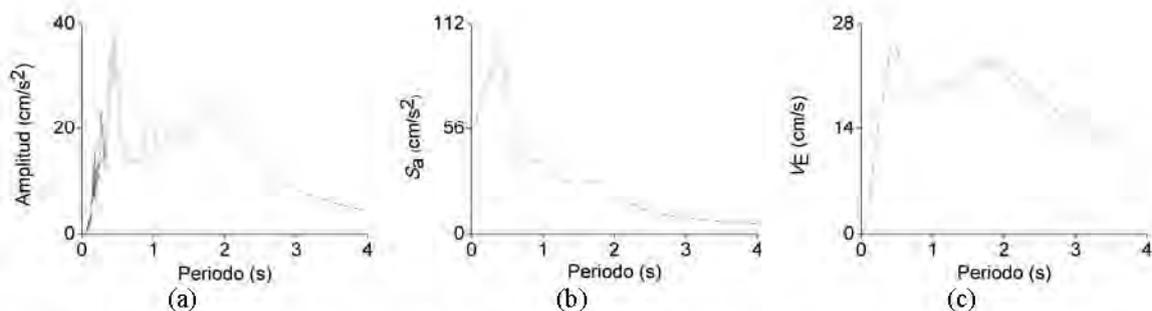


Figura D.93 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 93.

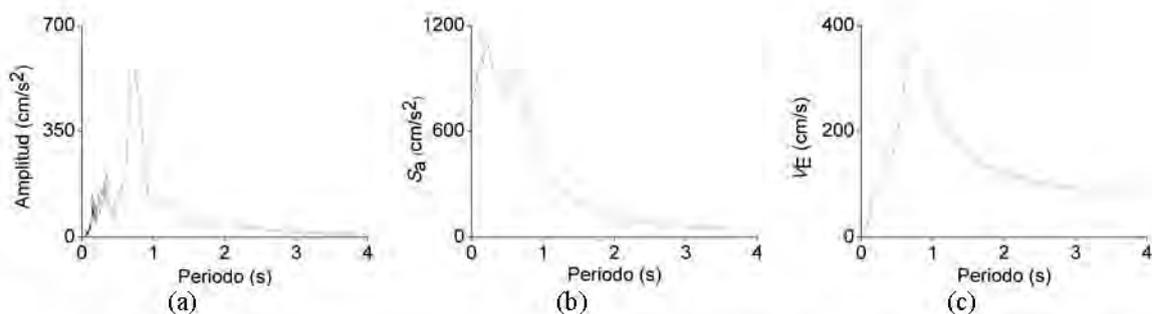


Figura D.94 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 94.

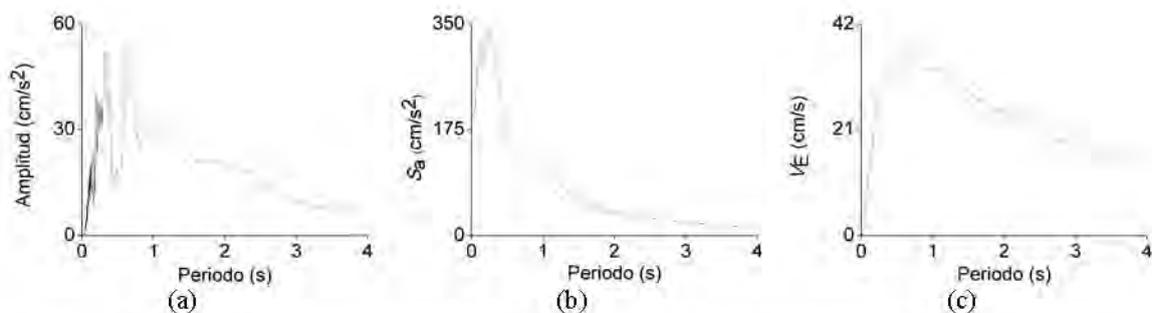


Figura D.95 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 95.

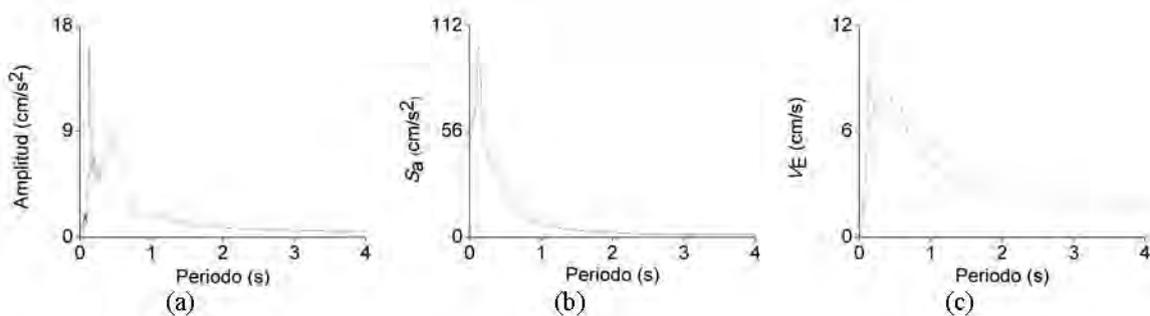


Figura D.96 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 96.

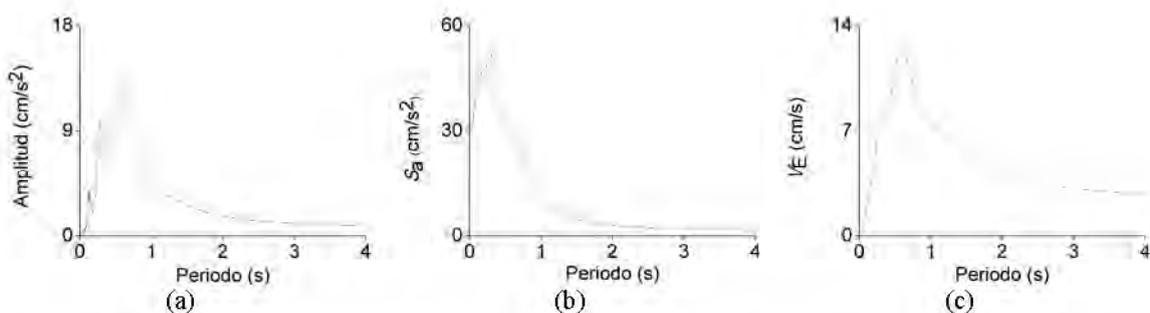


Figura D.97 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 97.

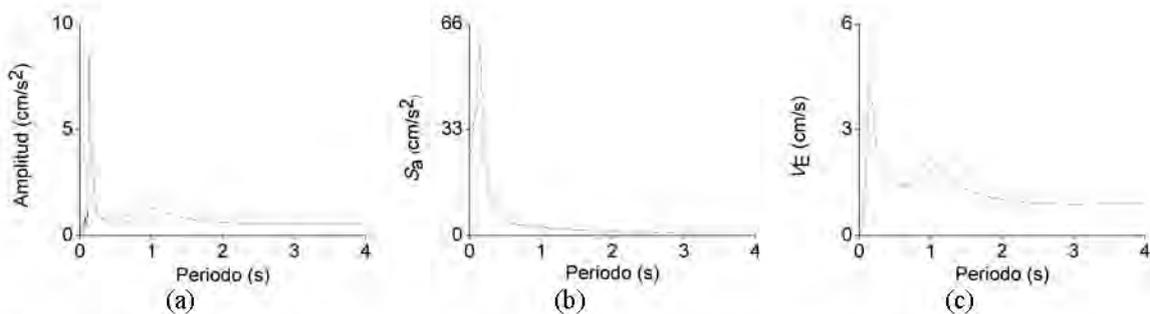


Figura D.98 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 98.

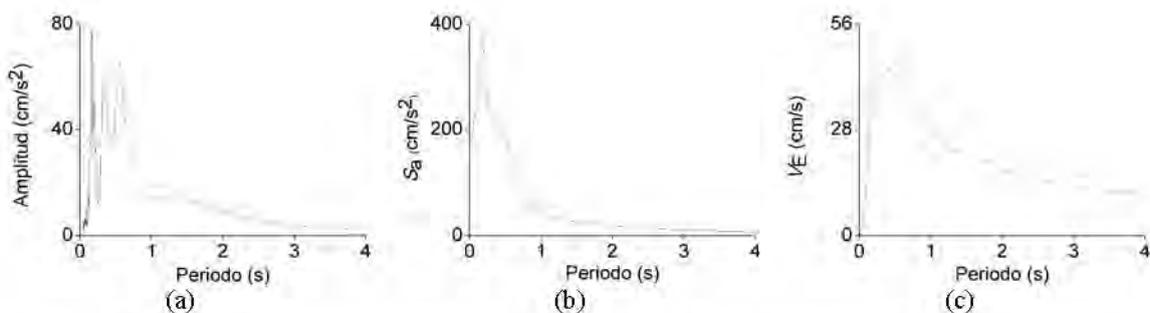


Figura D.99 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 99.

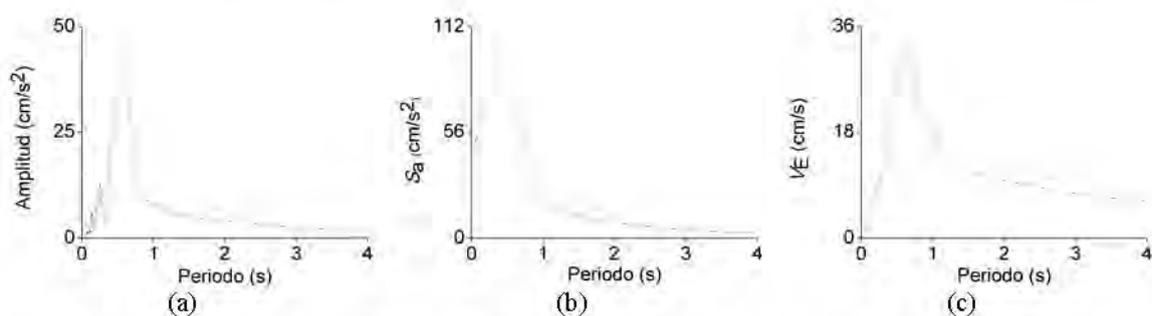


Figura D.100 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 100.

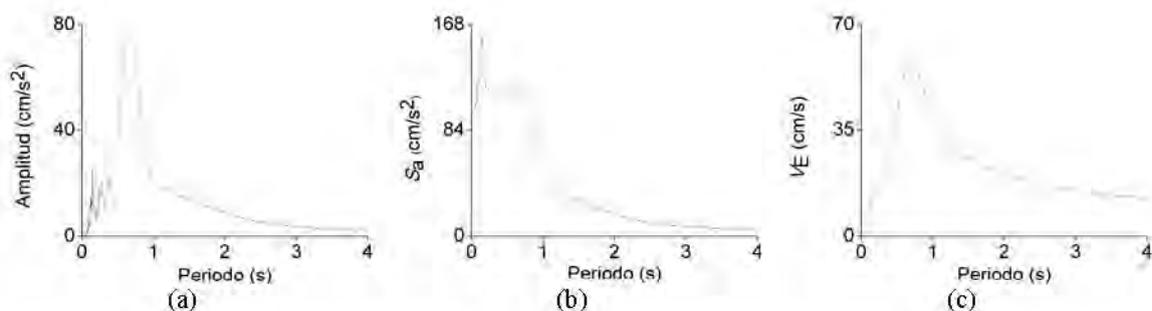


Figura D.101 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 101.

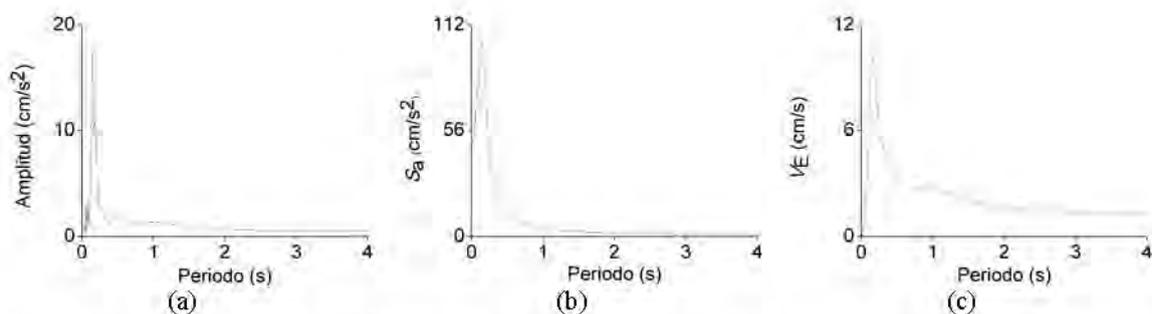


Figura D.102 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 102.

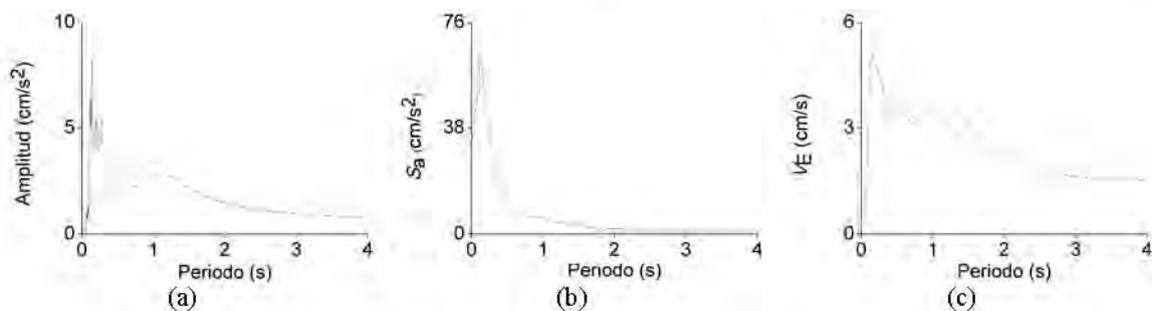


Figura D.103 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 103.

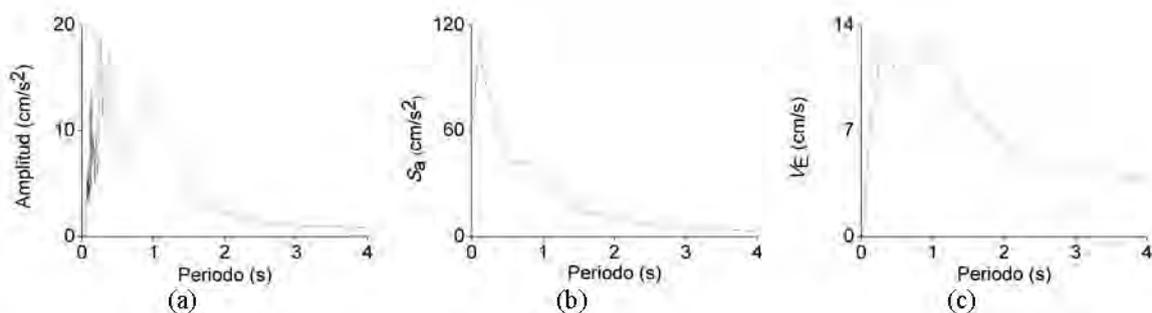


Figura D.104 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 104.

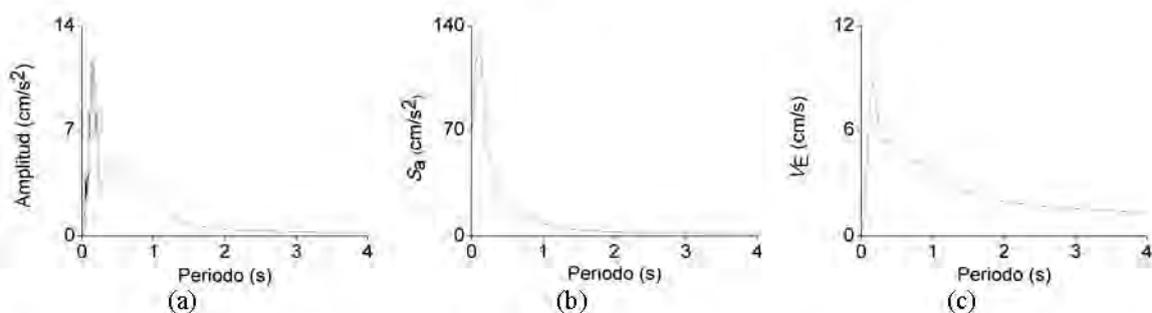


Figura D.105 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 105.

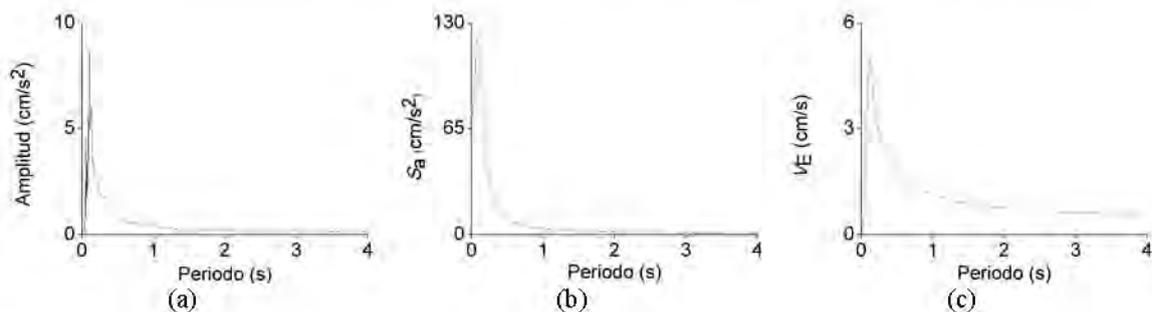


Figura D.106 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 106.

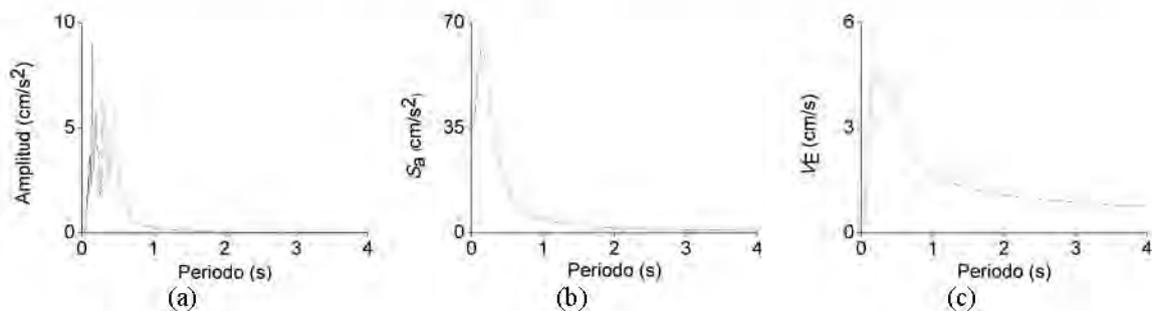


Figura D.107 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 107.

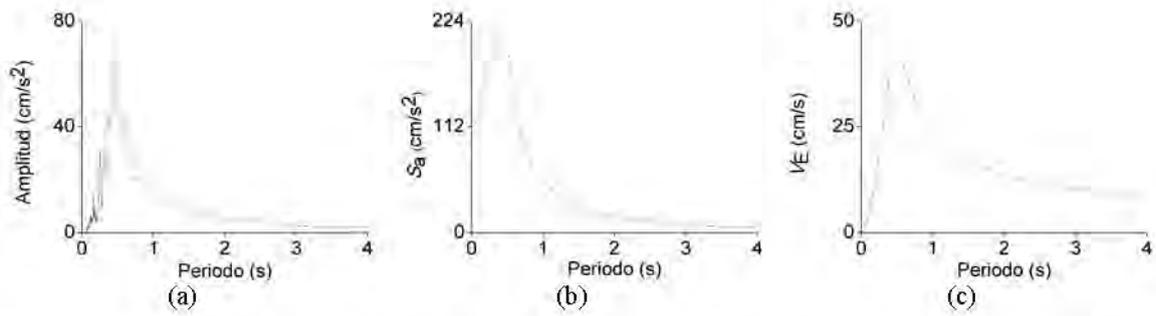


Figura D.108 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 108.

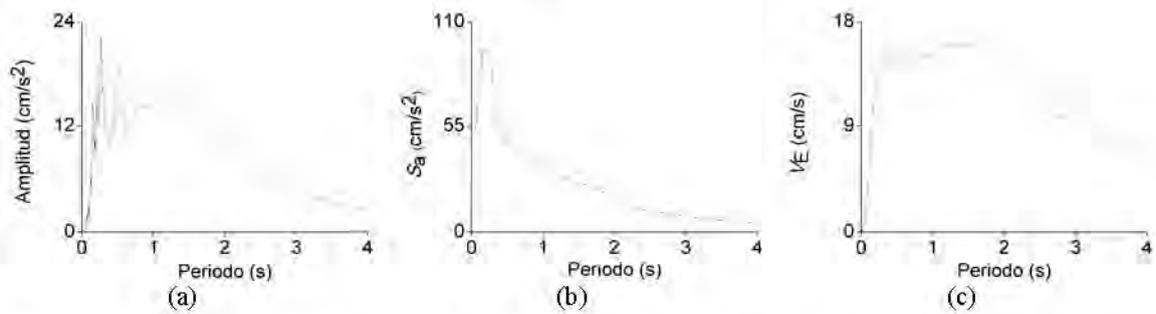


Figura D.109 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 109.

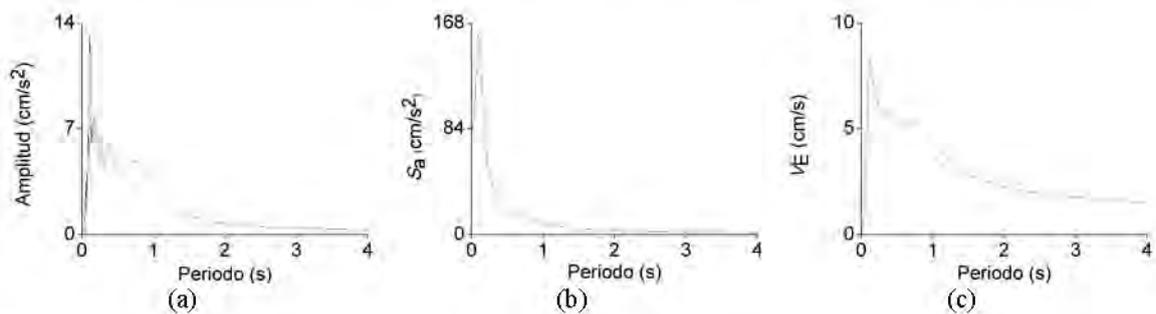


Figura D.110 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 110.

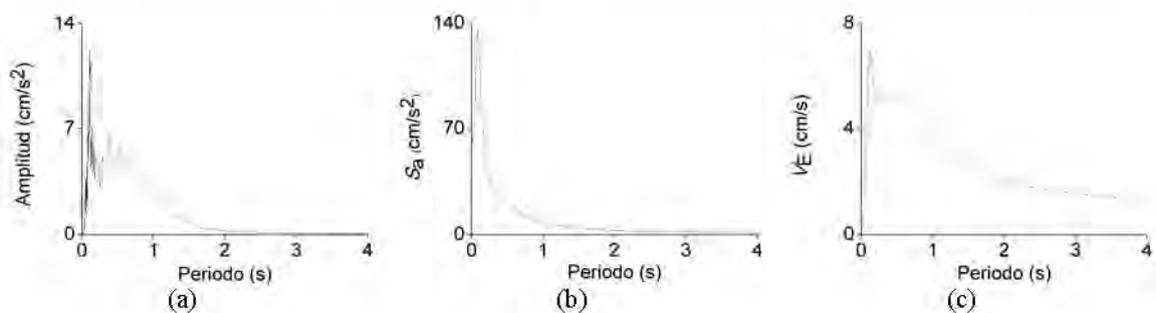


Figura D.111 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 111.

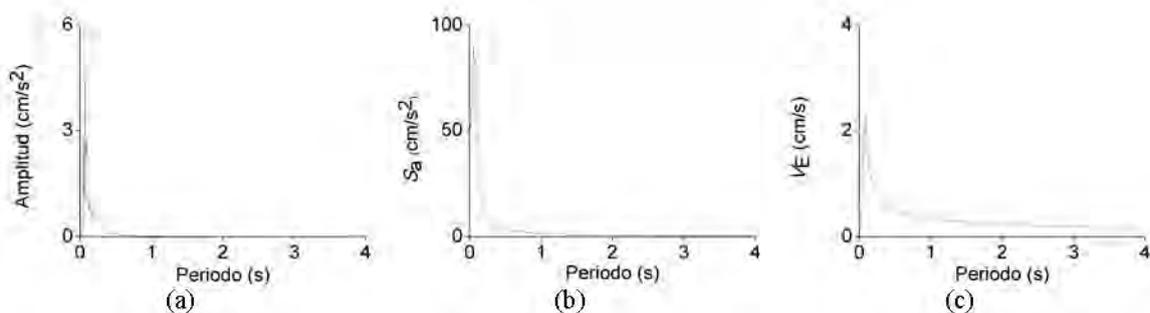


Figura D. 112 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 112.

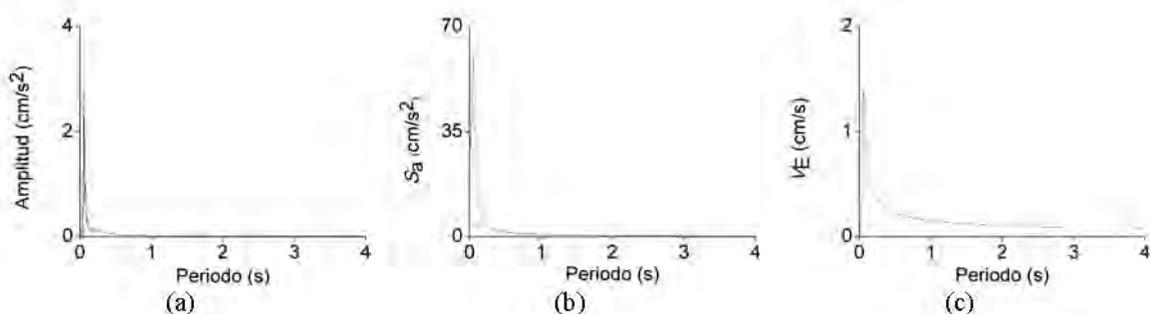


Figura D.113 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 113.

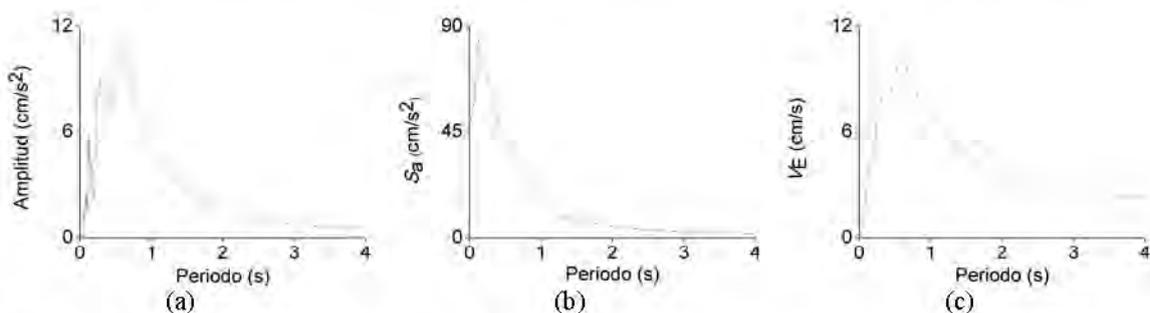


Figura D.114 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 114.

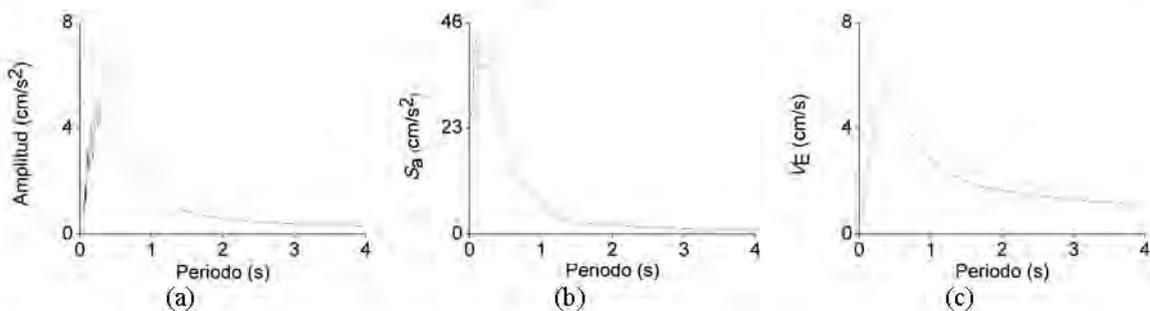


Figura D.115 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 115.

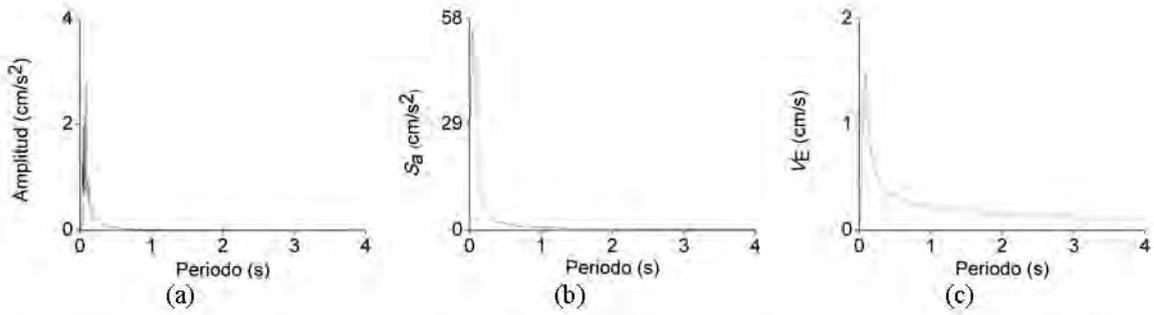


Figura D. 116 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 116.

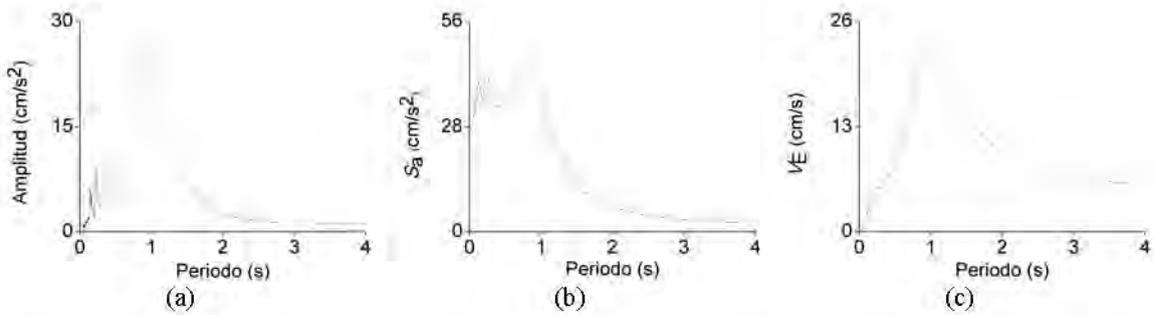


Figura D.117 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 117.

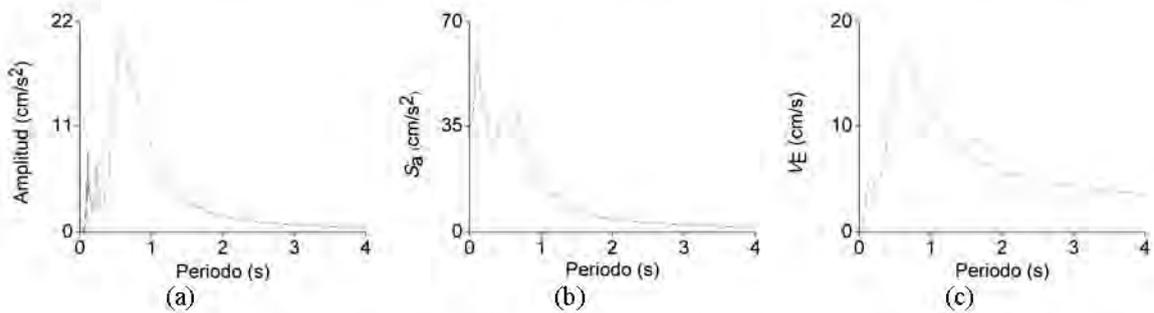


Figura D.118 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 118.

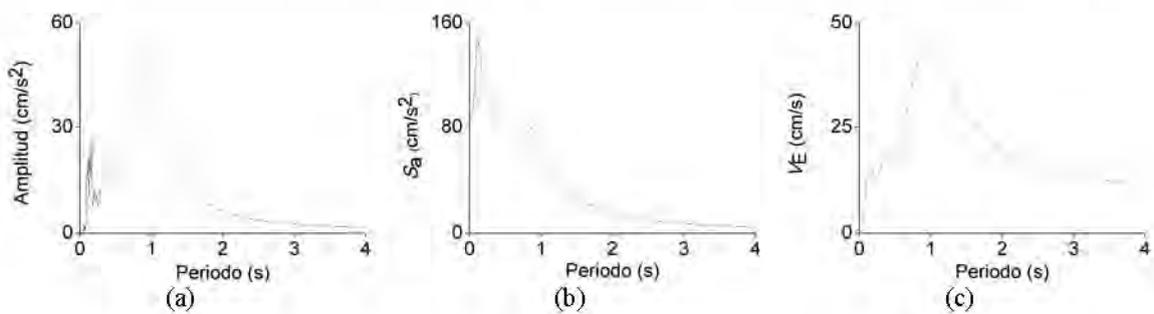


Figura D.119 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 119.

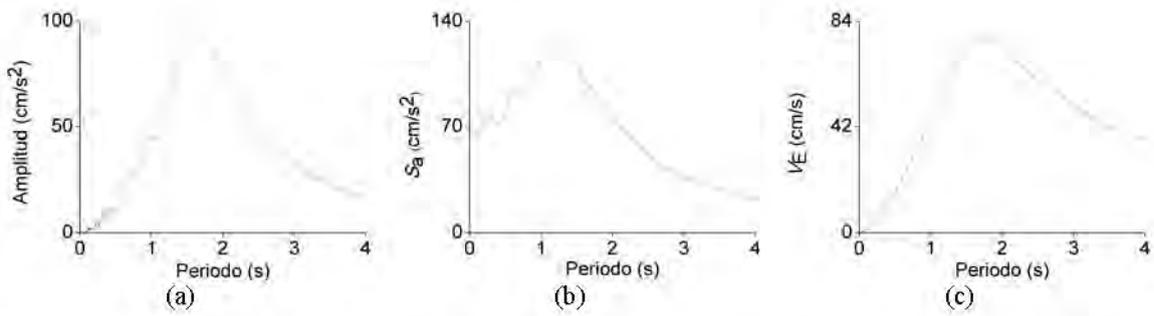


Figura D.120 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 120.

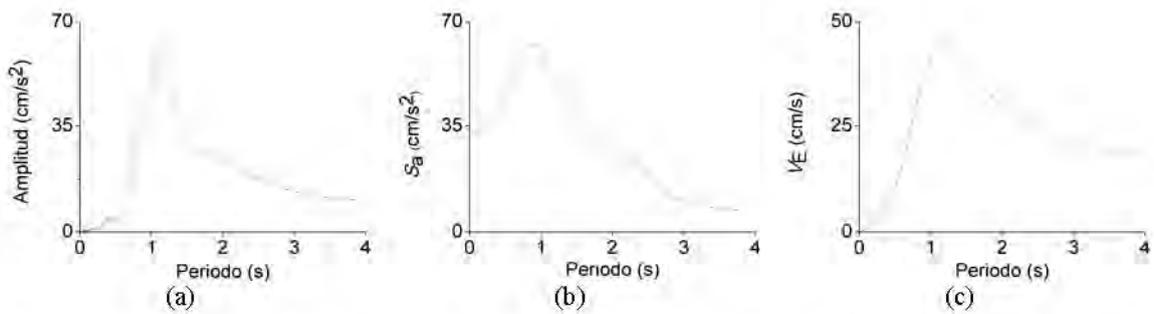


Figura D.121 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 121.

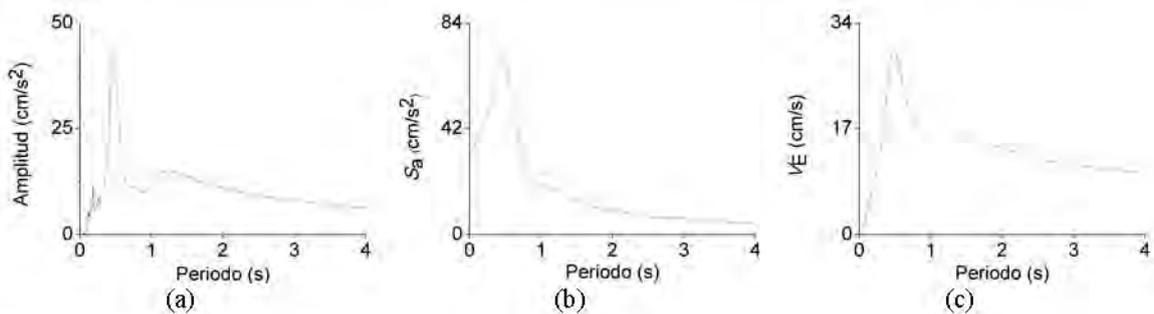


Figura D.122 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 122.

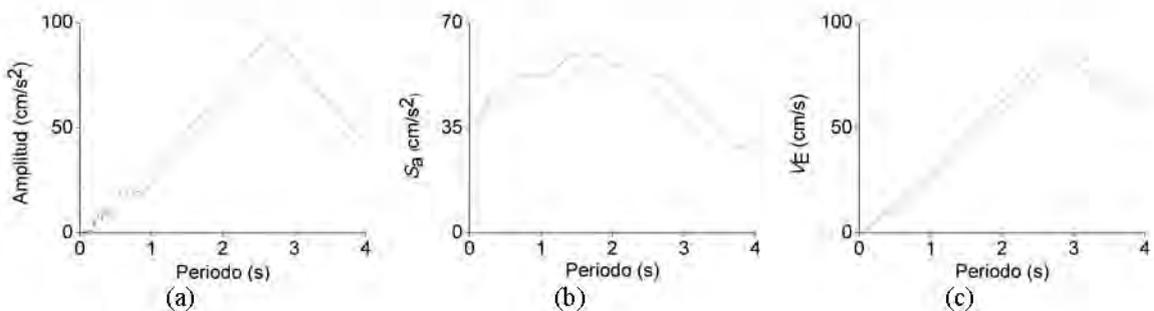


Figura D.123 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 123.

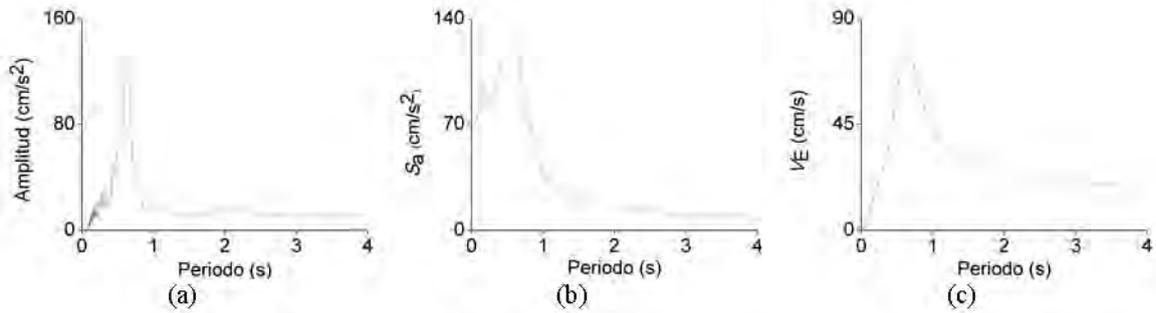


Figura D.124 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 124.

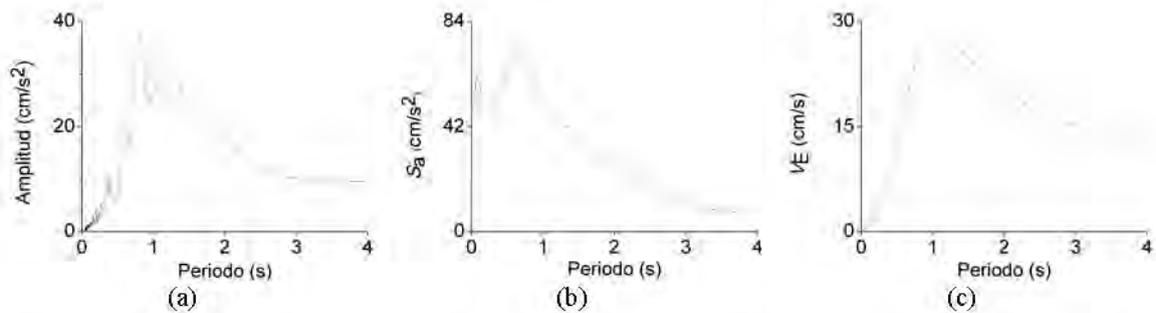


Figura D.125 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 125.

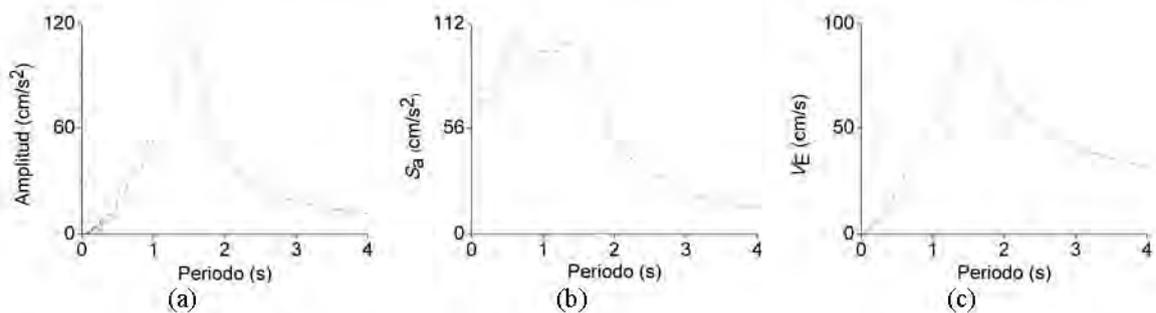


Figura D.126 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 126.

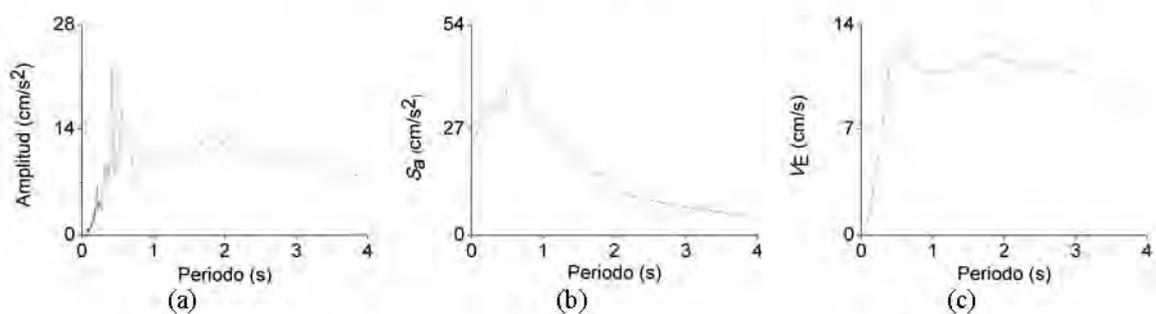


Figura D.127 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 127.

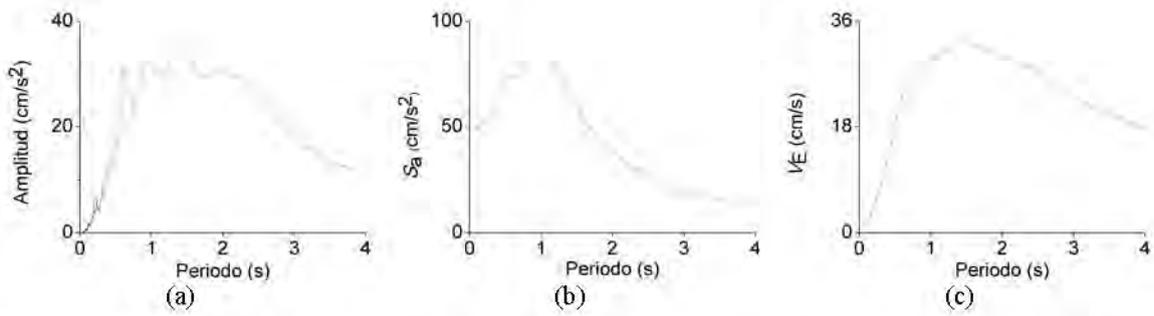


Figura D.128 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 128.

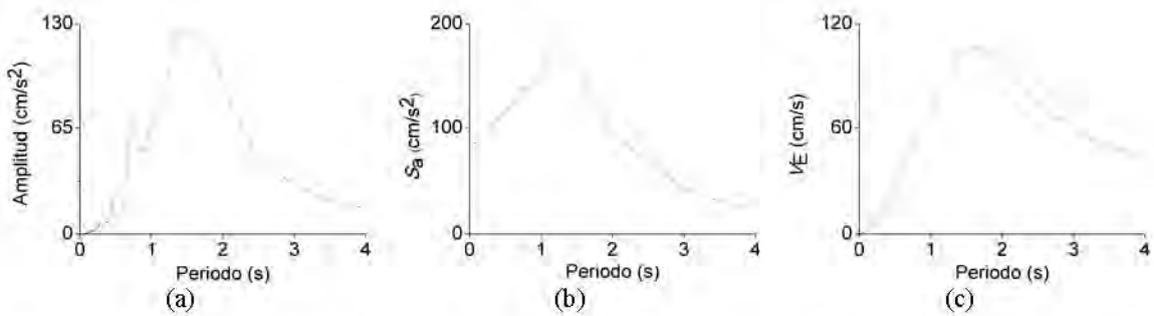


Figura D.129 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 129.

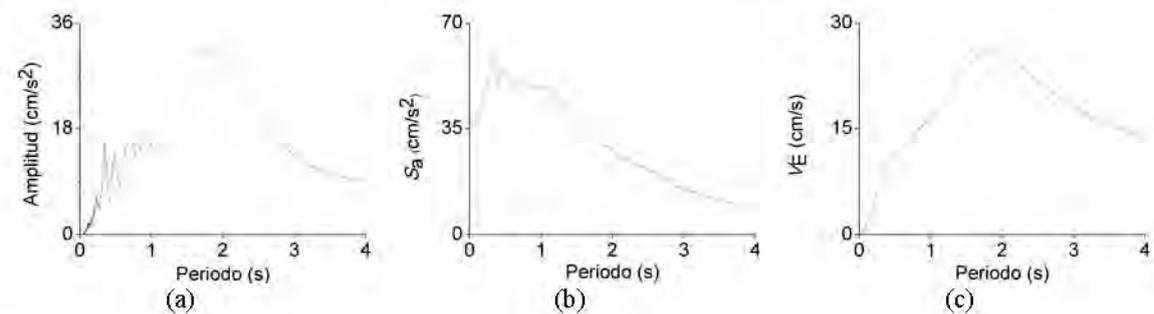


Figura D.130 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 130.

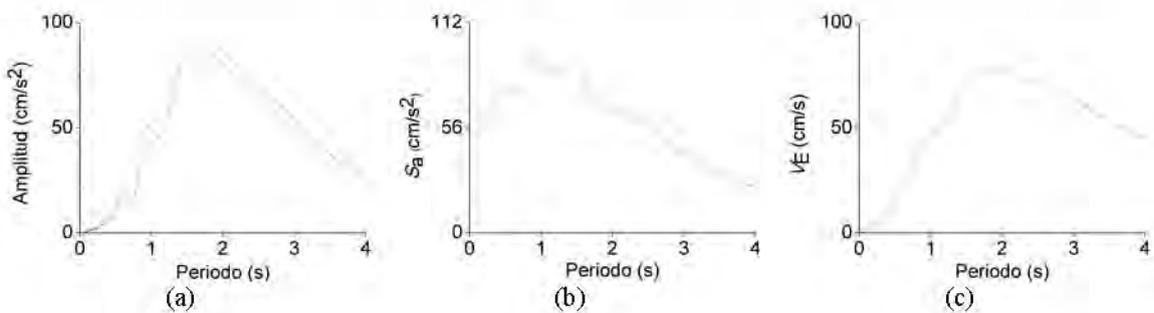


Figura D.131 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 131.

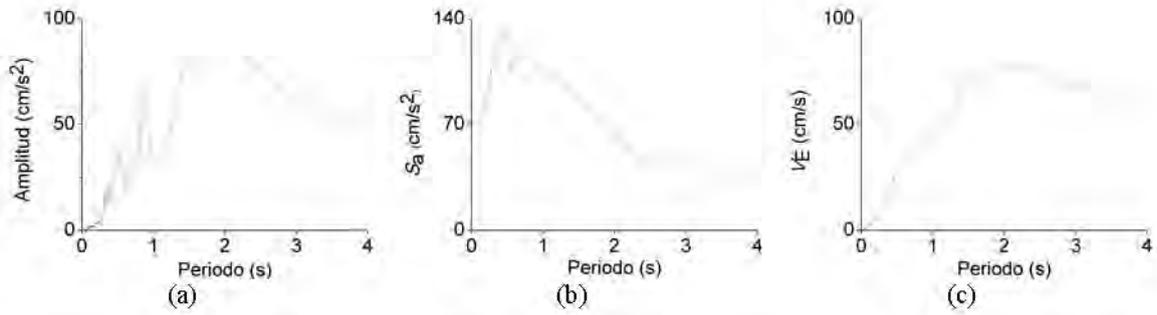


Figura D.132 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 132.

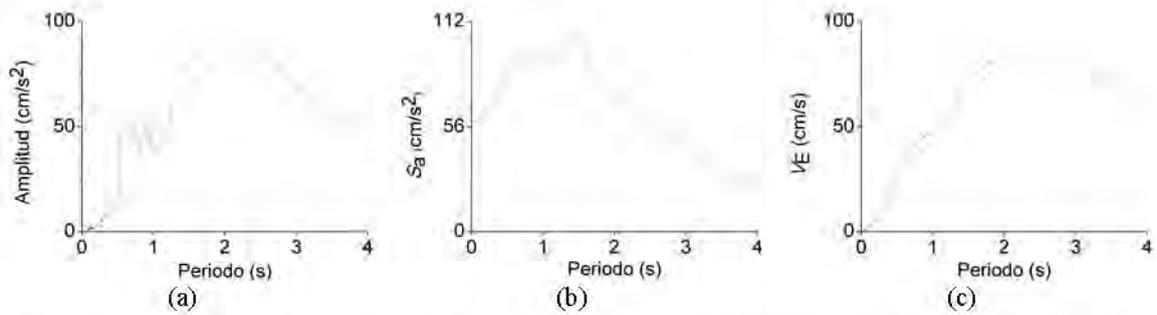


Figura D.133 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 133.

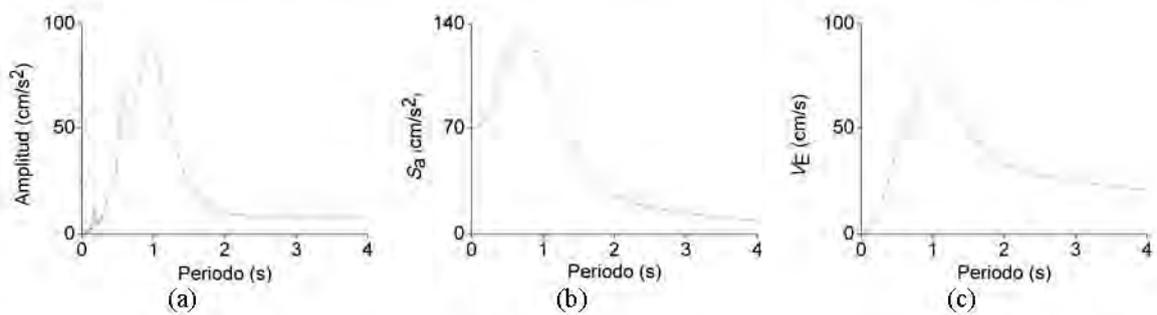


Figura D.134 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 134.

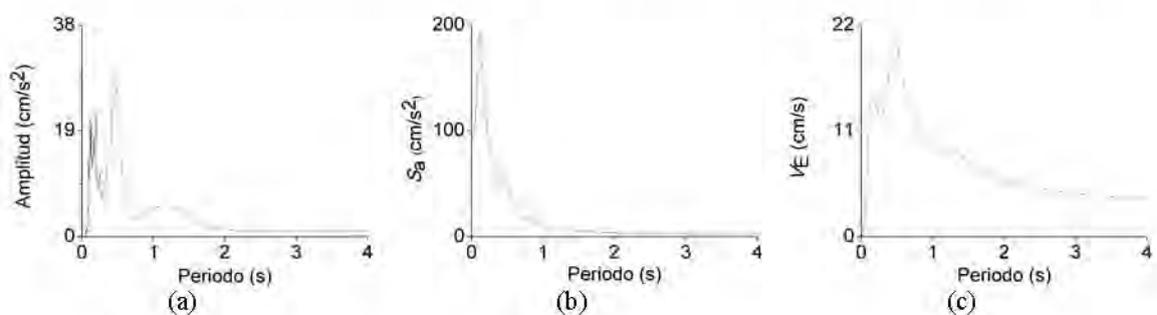


Figura D.135 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 135.

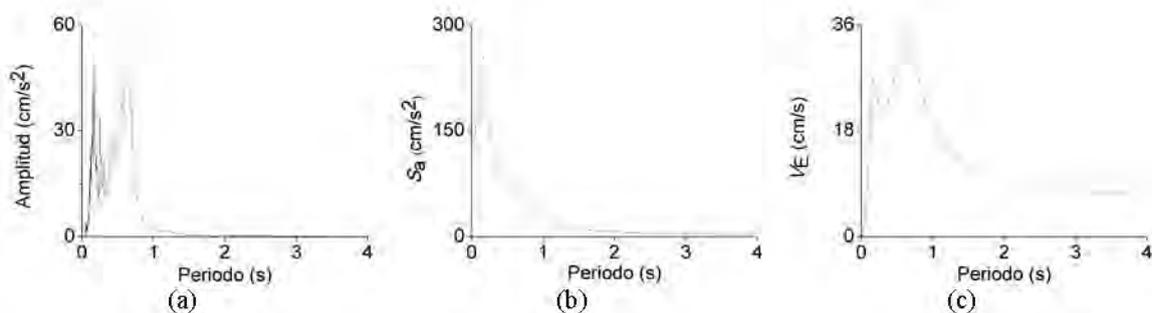


Figura D.136 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 136.

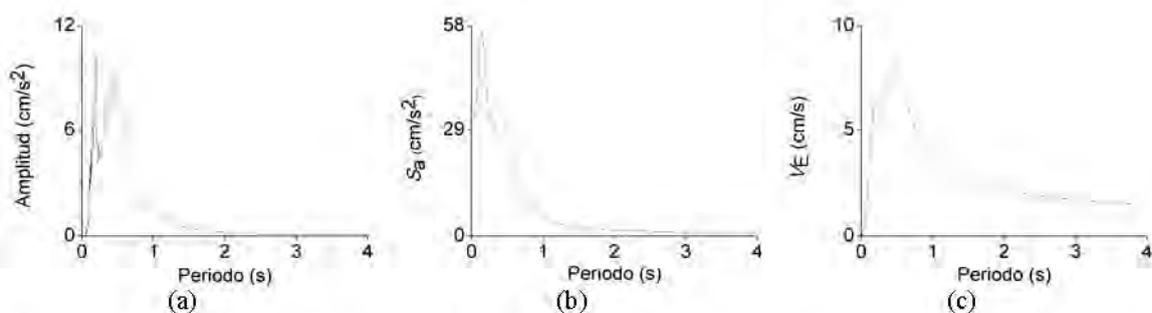


Figura D.137 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 137.

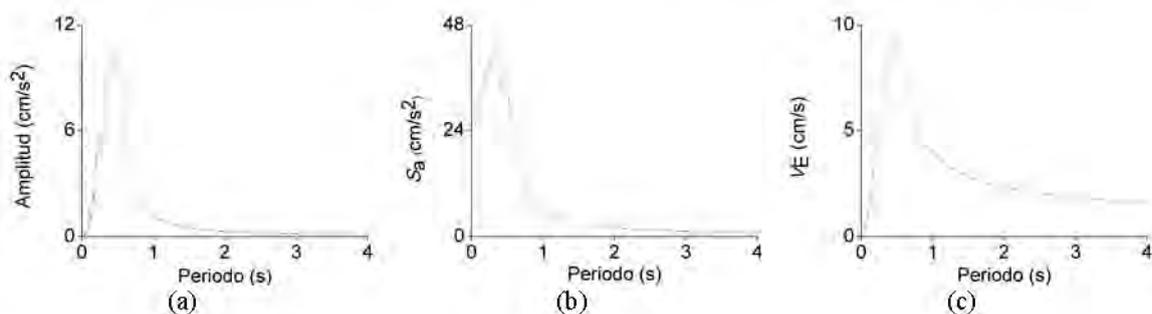


Figura D.138 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 138.

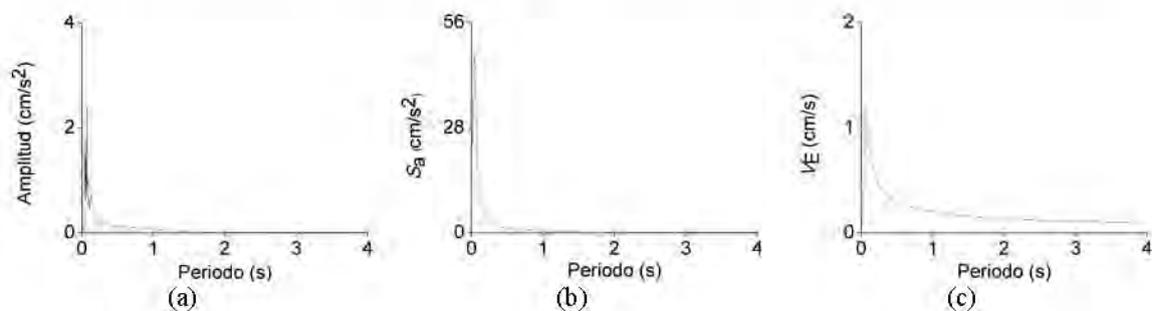


Figura D.139 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 139.

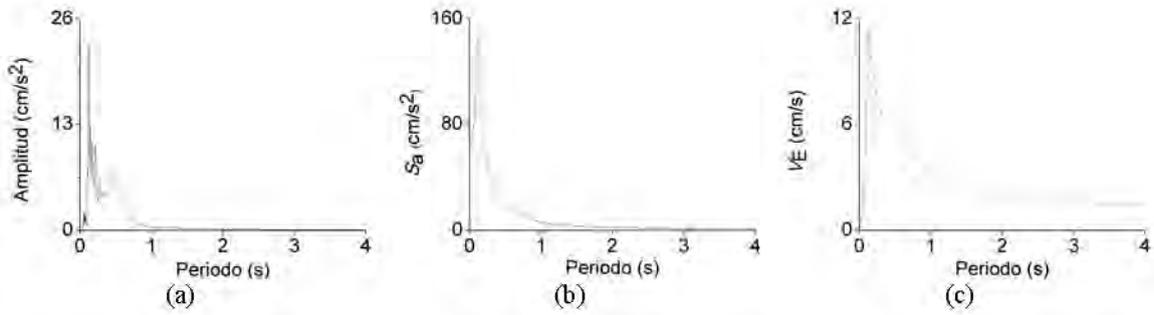


Figura D.140 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 140.

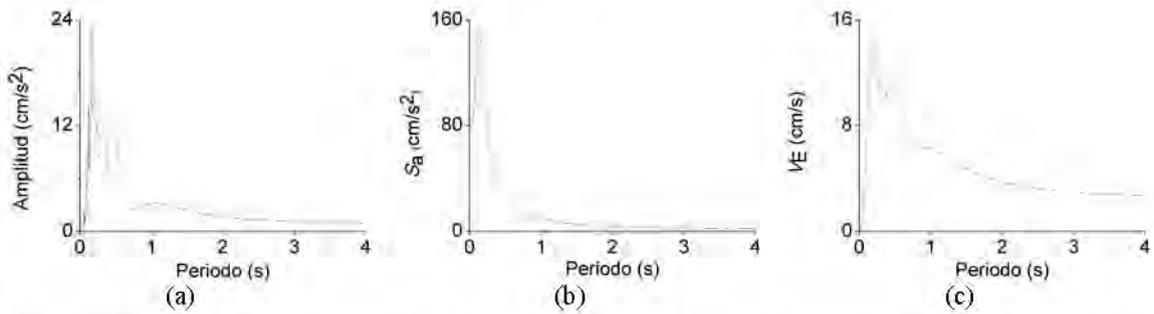


Figura D.141 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 141.

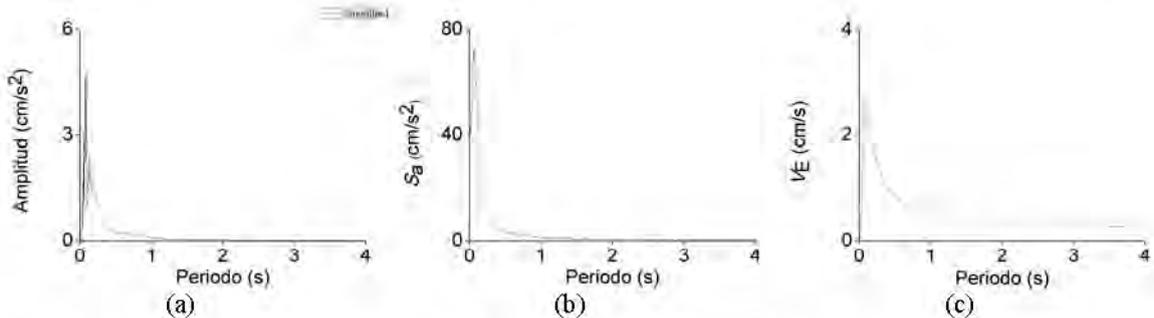


Figura D.142 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 142.

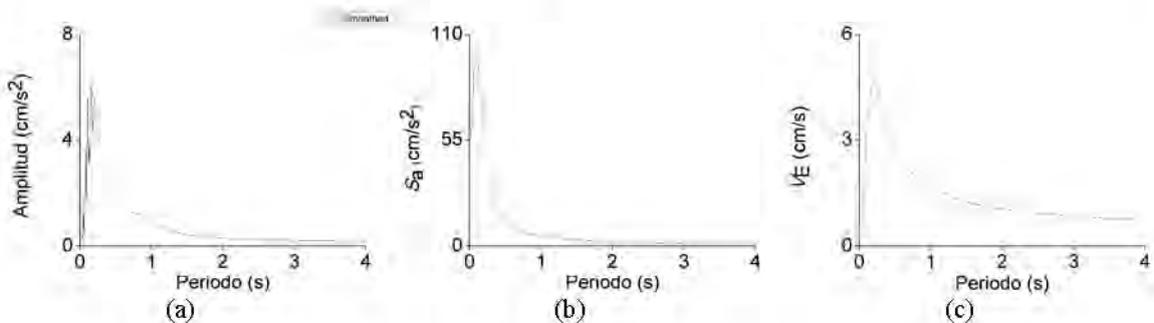


Figura D.143 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro n° 143.

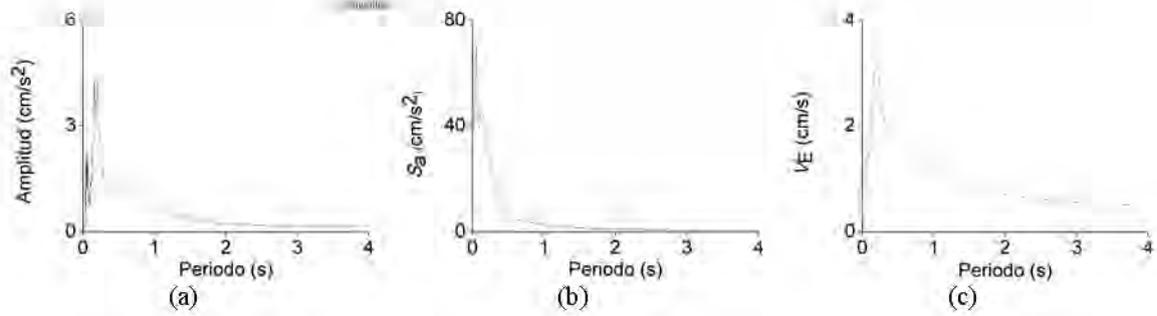


Figura D.144 Espectros de Fourier (a), de aceleración absoluta S_a (b) y de energía V_E (c) del registro nº 144.

Anejo E. Publicaciones generadas durante esta investigación

Esta investigación ha permitido, hasta la fecha, generar dos publicaciones científicas: un artículo aceptado para su publicación a la revista “Soil Dynamics and Earthquake Engineering” y un artículo aceptado para su presentación a la conferencia “14th European Conference on Earthquake Engineering” (14ECEE) que tendrá lugar en Ohrid (Macedonia) desde el 30 de agosto al 3 de septiembre de 2010.

A continuación se presentan los detalles de dichas publicaciones.

- Benavent Climent A., López Almansa F. and Bravo González D.A. Design energy input spectra for moderate-to-high seismicity regions based on Colombian earthquakes. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Pendiente de publicación.
- López Almansa F., Yazgan A.U., Bravo González D.A. and Benavent Climent A. Design Energy Spectra for Colombia and Turkey. Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering (14ECEE). Ohrid (Macedonia) 2010.

Es destacable que la revista “Soil Dynamics and Earthquake Engineering” se encuentra indexada por el ISI (“Institute of Scientific Information”) con un “Impact Factor” actual igual a 1,182 y un “5-Year Impact Factor” igual a 1,394.

En un futuro próximo se piensa elaborar una nueva ponencia para ser presentada al próximo cuarto congreso español sobre ingeniería sísmica que se celebrará en Granada en el año 2011.