

## Parámetros para caracterizar los espectros de energía sísmica

### Resumen

En el procedimiento de diseño sísmico basado en energía (EBSE), el efecto de los terremotos sobre las estructuras es considerado como un “input” de energía a la estructura. El uso de espectros de energía es una herramienta efectiva en este tipo de diseño. Los espectros de energía de entrada ofrecen una interesante alternativa para el análisis sísmico de estructuras sometidas a terremotos. Para una adecuada selección de registros sísmicos a ser utilizadas en diseño sísmico basado en energía resulta de interés establecer una clasificación de los registros de acuerdo a su intensidad. En el presente trabajo se exponen tres parámetros desarrollados previamente por los autores para ponderar la intensidad de un registro acelerométrico de un sismo en término de potencia: potencia de la energía de entrada, espectro de potencia de energía de entrada e intensidad espectral de potencia. Estos parámetros se ponen a prueba con diferentes tipos de registro para evaluar su efectividad. Se observa que los parámetros logran capturar diferencias presentes en los registros. El presente trabajo es una versión reducida y en español del artículo: Frau, C., Panella, S., Tornello, M. (2023). Input Energy Spectra for Pulse-Like Ground Motions. In: Varum, H., Benavent-Climent, A., Mollaioli, F. (eds) Energy-Based Seismic Engineering. IWEBSE 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 236. Springer, Cham.

**Palabras Clave:** Registros Sísmicos – Espectros de Energía - Potencia de la Energía de Entrada.

### 1 Introducción

El concepto de energía en el diseño sísmico de estructuras ha sido ampliamente estudiado durante medio siglo y los métodos basados en energía siempre se han considerado más racionales y confiables para el diseño y evaluación de estructuras bajo efectos sísmicos en comparación con los métodos convencionales basados en fuerzas y métodos basados en desplazamiento (Uang y Bertero, 1990; Akbas y Shen, 2003). En los métodos basados en energía, el efecto sísmico es considerado como un aporte de energía a la estructura y este aporte de energía expresa la demanda total de energía del terremoto. Para considerar una estructura segura, se debe considerar un equilibrio entre la capacidad de disipación de energía y la demanda de energía sísmica. Así, una cuestión importante en el diseño sísmico basado en energía es determinar la energía sísmica de entrada a la estructura. El diseño sismorresistente basado en energía fue propuesto por primera vez por Housner (1956), quien estudió el input de energía sísmica a las estructuras utilizando los espectros elásticos de velocidad. Los parámetros de diseño basados en energía se definieron por primera vez en su investigación, y estos formaron la base para el diseño basado en energía resistente a terremotos. Otros investigadores también hicieron aportes previos sobre el concepto de input de energía y consideraron la energía de entrada como una herramienta eficaz en el diseño sismorresistente (Uang y Bertero, 1990; Fajfar y Fischinger, 1990; Manfredi, 2001). Previamente, Zahrah y Hall (1984), Aki-yama (1985), Kuwamura y Galambos (1989); Fajfar et al (1989) realizaron estudios pioneros como el de Housner sobre conceptos de energía sísmica y propusieron ecuaciones analíticas y empíricas útiles para la energía sísmica de entrada.

Por otro lado, se sabe que las regiones cercanas a la falla están expuestas a efectos de directividad. Cuando una falla rompe hacia un sitio, la velocidad de ruptura es ligeramente más lenta que la velocidad de la onda de corte produciendo acumulación de energía sísmica liberada durante la ruptura (Somerville et al, 1997; Spudich y Chiou, 2008); esto generalmente da como resultado un pulso grande en la historia del tiempo del registro de velocidad. Por lo tanto, en movimientos sísmicos *near fault*, la falla se caracteriza frecuentemente por intensos pulsos de velocidad y desplazamiento de períodos relativamente

largos que los distinguen claramente de los típicos movimientos de los terremotos de campo lejano (*far-field*). Báez y Miranda (2000), comprobaron que la máxima velocidad del suelo y la máxima velocidad incremental son los parámetros que más influyen en la respuesta estructural.

Los movimientos con intensos pulsos de velocidad pueden afectar negativamente el desempeño sísmico de las estructuras (Bertero et al, 1978; Chopra y Chintapakdee, 2001). Anderson y Bertero (1987) demostraron que la presencia de largos pulsos de aceleración exige una mayor resistencia de las estructuras para mantenerse en pie. Malhotra (1999) afirma que la presencia de pulsos característicos de aceleración, velocidad y desplazamiento puede generar mayores esfuerzos de corte en la base de los edificios y mayores desplazamientos laterales en comparación con registros que no tienen estos pulsos; la demanda de ductilidad puede ser mucho mayor y la amortiguación adicional agregado a una estructura puede ser menos efectivo. En estructuras ubicadas en zonas cercanas a la falla, el daño es causado por unos pocos ciclos de deformación inelástica, que coinciden con pulsos de velocidad largos y de gran amplitud (Alavi y Krawlinker, 2000). Por el contrario, en sitios de fallas alejadas el daño se distribuye durante todo el tiempo del registro en muchos ciclos con menor deformación inelástica (Báez y Miranda, 2000).

En el procedimiento de diseño sísmico basado en energía (EBSE), el efecto de los movimientos del suelo sobre las estructuras es considerado como la de energía de entrada. Los espectros de energía de entrada de un terremoto se obtienen combinando la energía de entrada máximas de sistemas de un grado de libertad (UGDL) que tienen una determinada relación de amortiguación para diferentes períodos de vibración natural. La determinación del espectro de energía de entrada es de gran importancia para el diseño sísmico basado en energía, ya que la energía de entrada total de los sistemas estructurales se puede obtener prácticamente a través de estos gráficos.

El uso de espectros de energía es una herramienta eficaz en los métodos diseño sísmico basado en energía (EBSD), como el uso de los espectros de aceleración de diseño de los métodos basados en fuerza y desplazamiento. La obtención de espectros de energía de entrada ofrece una ventaja importante para determinar la energía de entrada en estructuras sometidas a movimientos sísmicos.

En EBSD de estructuras, la demanda de energía de un terremoto debe ser menor o igual a la capacidad de disipación de energía que posee la estructura. Es de suma importancia para la ingeniería sísmica y estructural que la energía de entrada sísmica transmitida a las estructuras sea correctamente evaluada.

A partir de los espectros de energía, se presentan tres parámetros para ponderar la intensidad de un registro acelerométrico de un sismo en término de potencia: potencia de la energía de entrada, espectro de potencia de energía de entrada e intensidad espectral de potencia (Frau et al, 2023). Estos parámetros son comparados con diferentes tipos de registro para evaluar su efectividad.

## 2 Métodos Aplicados

### 2.1 Espectro de energía de entrada elástica

A partir de la definición fundamental de trabajo (es decir, la integral de la fuerza por el desplazamiento), la llamada ecuación de balance de energía se puede obtener fácilmente integrando la ecuación diferencial gobernante del movimiento de un sistema UGDL sujeto a un movimiento horizontal del suelo sobre el desplazamiento relativo de la masa con respecto al suelo:

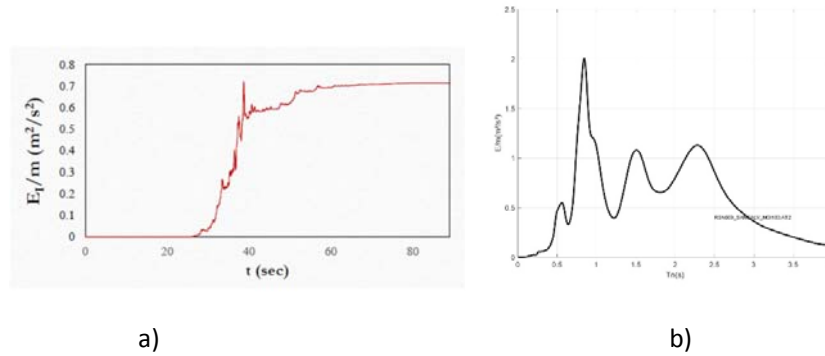
$$\int_0^u m \ddot{u}(t) du + \int_0^u c \dot{u}(t) du + \int_0^u k u(t) du = - \int_0^u m \ddot{u}_g(t) du \quad (1)$$

La cantidad de integrales en el lado izquierdo de esta ecuación identifican los diferentes componentes energéticos de la estructura denominados energía cinética, energía de amortiguación y energía de deformación recuperable, respectivamente. El lado derecho de la ecuación, está estrechamente asociado con el enfoque principal del presente estudio, expresa la energía de entrada total  $EI(t)$ .

De acuerdo con las reglas del análisis matemático, el desplazamiento incremental  $du$  puede expresarse en términos de velocidad y diferencial tiempo; así, la integración de la ecuación gobernante del

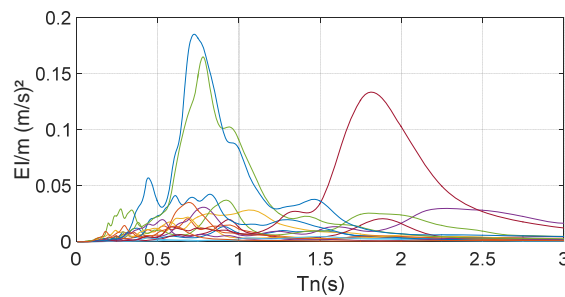
movimiento se puede establecer con respecto a la duración del terremoto. En consecuencia, para un movimiento sísmico específico, la energía de entrada relativa a un sistema UGDL, así como los otros componentes de energía, se obtiene teóricamente integrando la ecuación de movimiento a lo largo del tiempo (Ec. 2); La figura 1-a muestra la energía de entrada en función del tiempo.

$$\frac{E_I}{m} = \int_0^t \ddot{u}_g(t) \dot{u}(t) dt \quad (2)$$



**Fig. 1.** a) Energía de entrada en función del tiempo para un registro con período y amortiguación dados; b) Espectro de energía de entrada.

Cuando este proceso se repite para varios sistemas UGDL con diferentes períodos  $T_n$  pero la misma relación de amortiguamiento, se obtiene un conjunto de energías de entrada elástica  $E_I$  versus  $T_n$ . En síntesis, espectros de energía de entrada sísmica son los gráficos que combinan los valores máximos de energía de entrada correspondientes a diferentes períodos de vibración natural de los sistemas UGDL (Fig. 1-b). La Figura 2 muestra los espectros de energía de entrada para algunos registros del conjunto seleccionado; puede observarse una gran variabilidad.



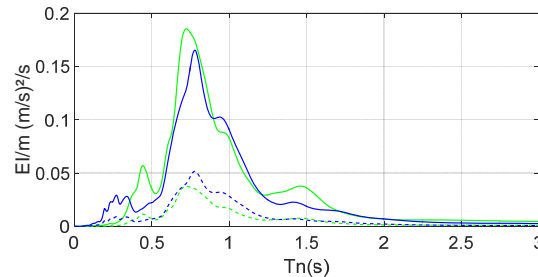
**Fig. 2.** Espectros de energía de entrada para algunos registros del conjunto seleccionado.

## 2.2 Potencia de energía de entrada y espectro de Potencia de Energía de Entrada.

Considerando la energía de entrada para un período dado  $T_i$ , la potencia de energía de entrada ( $IEP$ ) se define como la energía de entrada total dividida el tiempo que tarda la energía en ingresar (Ec. 3). Debido a que la entrega de energía es pequeña al inicio y al final de los registros (ver Fig. 1-a), para definir el  $IEP$  se considera la duración efectiva. Para ello se utiliza la intensidad de Arias; donde la duración efectiva es el intervalo de tiempo entre 5% ( $t_i$ ) y 95% ( $t_f$ ) (Arias, 1970).

$$IEP = \frac{E_I/m}{(t_f - t_i)} = \frac{1}{t_f - t_i} \int_{t_i}^{t_f} \ddot{u}_g(t) \dot{u}(t) dt \quad (3)$$

Luego de calcular el *IEP* para cada período estructural ( $T_n$ ), es posible construir el Espectro de Potencia de Energía de Entrada *SIEP* ( $T_n, \zeta$ ). Este espectro tiene en cuenta, además de la energía que entra al sistema, la potencia con la que lo hace. Hay que reconocer que es importante la cantidad total de energía que entra, pero también el tiempo en el que se debe disipar esa energía, es decir, la potencia. La Figura 3 muestra dos casos estudiados donde uno alcanza mayor energía de entrada pero el otro alcanza mayor potencia.



**Fig. 3.** Espectros de energía de entrada (línea continua) y espectro de potencia de energía de entrada *SIEP*( $T_n, \zeta$ ) (Línea discontinua) para dos registros: RSN569\_SANSALV\_NGI270 y RSN451\_MORGAN\_CYC285.

### 2.3 Intensidad Housner

Housner (1952), definió una intensidad espectral a partir del espectro de respuesta elástica de pseudovelocity, que se obtiene a partir de un registro de aceleración. La intensidad espectral de Housner se define como (Ec. 4):

$$SI(\text{Housner}) = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT \quad (4)$$

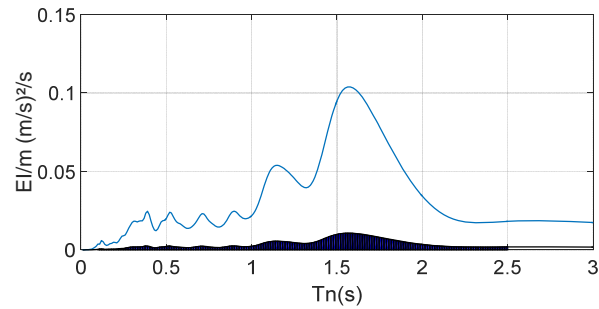
Donde  $S_v$  es el espectro de respuesta elástica de pseudovelocity,  $T$  son los períodos estructurales  $\xi$  es la fracción de amortiguamiento crítico y 0,1-2,5 segundos son los períodos que cubre la integral. La intensidad espectral de Housner expresa la severidad relativa de los terremotos.

### 2.4 Intensidad espectral de energía

Siguiendo la misma idea de la Intensidad de Housner, en este trabajo se propone un nuevo parámetro para evaluar la energía de entrada: la Intensidad Espectral de Energía (*ESI*). Esto se define a partir del espectro de potencia de energía de entrada de acuerdo con la siguiente ecuación (Ec. 5).

$$ESI = \int_{0.1}^{2.5} S_{IEP}(T, \xi) dT \quad (5)$$

*ESI* cuantifica la severidad de los registros sísmicos concentrando en un valor de energía de entrada y la potencia con la que lo hace en los rangos de períodos de interés. Además, permite comparar diferentes registros entre sí; en especial cuando, en muchos casos, los espectros de energía de entrada presentan gran variación de un período a otro (ver Fig. 1-b). La figura 4 muestra un ejemplo de cómo se obtienen los parámetros descritos anteriormente.

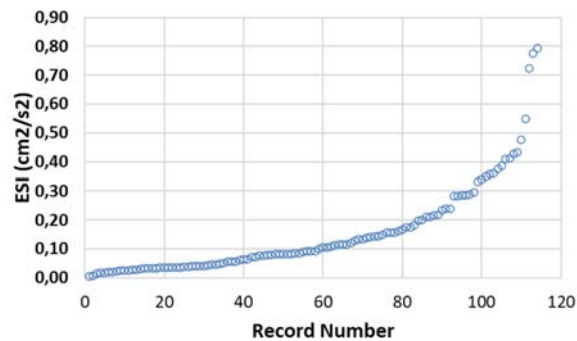


**Fig. 4.** Ejemplo de cómo se obtiene el *ESI*.

#### 4 Resultados

Para el presente estudio, se seleccionó un conjunto de 114 registros de la base de datos propuesta por Panella et al (2017), clasificados como registros tipo impulsivos de campo cercano; de los cuales 14 registros son clasificados de elevada impulsividad, 59 de Impulsividad media y 41 de baja impulsividad. Estos registros son de terremotos en diferentes partes del mundo con magnitud de momento entre 5.5 y 7.35. Las bases de datos de registros colaboran a predecir la respuesta del suelo ante un evento sísmico. (Ver Apéndice 1).

Para el conjunto de registros seleccionados se calculó la intensidad espectral de energía. La Figura 5 muestra los valores alcanzados por el *ESI* de forma ordenada y creciente. Se observa una variación más o menos continua y sin saltos. Esto significa que el conjunto de registros seleccionado es consistente y cubre una amplia gama de casos. El Apéndice 1 contiene los resultados de los parámetros de *ESI* correspondientes al conjunto de registros seleccionados (Ver Apéndice 1).



**Fig. 5.** *ESI* en orden creciente para los registros seleccionados.

#### 4 Conclusiones

Con base en los Espectros Elásticos de Energía de Entrada, se definió un nuevo parámetro para evaluar el ingreso de energía de un registro sísmico que toma en cuenta la potencia con la que ingresa la energía: la Intensidad Espectral de Energía.

Es posible determinar niveles de Intensidad Espectral Energética según los niveles de potencia energética de entrada.

En función de la base de datos del Apéndice 1 se pueden obtener los niveles de impulsividad e intensidad de energía espectral, pudiendo crear una matriz para seleccionar registros impulsivos según diferentes niveles de energía de entrada.

## **Agradecimientos**

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro Regional de Desarrollo Tecnológico para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDe-TeC) de la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina) por su apoyo para el presente estudio.

## **Referencias**

- Uang C.M, Bertero V.V. Evaluation of seismic energy in structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19(1), 77-90, 1990.
- Akbas B, Shen J. Earthquake-resistant design (EQRD) and energy concepts (in Turkish). *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, Article 192, 2877–2901, 2003.
- Housner G.W. Limit design of structures to resist earthquakes. *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering*, Oakland, California, USA, 186–198, 1956.
- Fajfar P, Fischinger M.A. Seismic procedure including energy concept. *Ninth European Conference on Earthquake Engineering (ECEE)*, 2, 312-321, Moscow, 1990.
- Manfredi G. Evaluation of seismic energy demand. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(4), 485-499, 2001.
- Zahrah T.F, Hall W.J. Earthquake energy absorption in SDOF structures. *Journal of Structural Engineering*, 110(8), 1757-1772, 1984.
- Akiyama H. *Earthquake-resistant limit-state design for buildings*. University of Tokyo Press, Japan, 1985.
- Kuwamura H, Galambos T.V. Earthquake load for structural reliability. *Journal of Structural Engineering*, 115(6), 1446-1462, 1989.
- Fajfar P, Vidic T, Fischinger M. Seismic demand in medium- and long-period structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 18(8), 1133-1144, 1989.
- Somerville P.G, Smith NF, Graves R.W, Abrahamson N.A. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismol Res Lett*; 68:199–222, 1997.
- Spudich P, Chiou B.S.J. Directivity in NGA earthquake ground motions: analysis using isochrone theory. *Earthq Spectra*;24(1):279–98, 2008.
- Baez J. I, Miranda E. Amplification factors to estimate inelastic displacement demands for the design of structures in the near field. *12th World Conference in Earthquake Engineering*, New Zealand, Paper 1561, 2000.
- Bertero V.V, Mahin S.A, Herrera R.A. Aseismic design implications of San Fernando earthquake records. *Earthq Eng. Struct Dyn*;6(1):31–42, 1978.
- Chopra A.K, Chintanapakdee C. Comparing response of SDF systems to near- fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions. *EarthqEngStructDyn*;30:1769–89, 2001.
- Anderson J.C, Bertero V.V. Uncertainties in establishing design earthquakes. *J Struct Eng*; 113(8):1709–24, 1987.
- Malhotra P. K. Response of building to near-field pulse-like ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 28, 1309-1326, 1999.
- Alavi B, Krawinkler H. Effects of near-fault ground motions on frame structures. *Technical Report Blume Center Report 138*. Stanford, California; 2001.
- Frau, C., Panella, S., Tornello, M. (2023). Input Energy Spectra for Pulse-Like Ground Motions. In: Varum, H., Benavent-Climent, A., Mollaioli, F. (eds) *Energy-Based Seismic Engineering*. IWEBSE

2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 236. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36562-1\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36562-1_17).

Arias A. A measure of earthquake intensity. In: Hansen R (ed) Seismic design for nuclear power plants. MIT Press, Cambridge, pp 438–483, 1970.

Housner G.W. Intensity of ground motion during strong earthquakes. Earthquake Research Laboratory. California Institute of Technology, 1952.

Panella, D. S., M. E. Tornello & C. D. Frau (2017). A simple and intuitive procedure to identify pulse-like ground motions. Soil Dynamics and Earthquake Engineering (94), 234-243.

## Apéndice 1

Tabla A-1. Parámetros de los registros utilizados en este trabajo.

| N° | ID  | Nombre de Sismo            | Earthquake Magnitude | J-B Dist. (km) | PGA (g) | PGV (cm/s) | IP (cm-s) | IPR | Record Duration (s) | Time IA 5-95% (s) | ESI (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|----|-----|----------------------------|----------------------|----------------|---------|------------|-----------|-----|---------------------|-------------------|--|
| 1  | 174 | RSN182_IMPVAL.L_H_H-E07230 | 6,53                 | 0,6            | 0,47    | 113,1      | 7,2       | 1,0 | 36,8                | 4,8               | 0,429                                  |
| 2  | 159 | RSN171_IMPVAL.L_H_H-EMO270 | 6,53                 | 0,1            | 0,30    | 92,6       | 8,3       | 1,0 | 40,0                | 6,7               | 0,340                                  |
| 3  | 335 | RSN568_SANSALV_GIC090      | 5,80                 | 2,1            | 0,70    | 79,9       | 9,0       | 1,0 | 9,0                 | 4,3               | 0,477                                  |
| 4  | 158 | RSN171_IMPVAL.L_H_H-EMO000 | 6,53                 | 0,1            | 0,32    | 73,0       | 9,3       | 1,0 | 40,0                | 8,2               | 0,158                                  |
| 5  | 172 | RSN181_IMPVAL.L_H_H-E06230 | 6,53                 | 0,0            | 0,45    | 113,6      | 9,3       | 1,0 | 39,1                | 8,7               | 0,148                                  |
| 6  | 336 | RSN568_SANSALV_GIC180      | 5,80                 | 2,1            | 0,42    | 62,4       | 9,3       | 1,0 | 9,0                 | 3,1               | 0,549                                  |
| 7  | 168 | RSN179_IMPVAL.L_H_H-E04230 | 6,53                 | 4,9            | 0,37    | 80,4       | 9,7       | 1,0 | 39,1                | 10,3              | 0,082                                  |
| 8  | 104 | RSN150_COYOTELK_G06230     | 5,74                 | 0,4            | 0,42    | 44,4       | 9,9       | 1,0 | 27,1                | 3,2               | 0,216                                  |
| 9  | 157 | RSN170_IMPVAL.L_H_H-ECC092 | 6,53                 | 7,3            | 0,24    | 73,4       | 10,1      | 1,0 | 40,0                | 13,2              | 0,079                                  |
| 10 | 170 | RSN180_IMPVAL.L_H_H-E05230 | 6,53                 | 1,8            | 0,38    | 96,9       | 10,4      | 1,0 | 39,3                | 9,5               | 0,156                                  |
| 11 | 337 | RSN569_SANSALV_NGI180      | 5,80                 | 3,7            | 0,40    | 56,4       | 10,4      | 1,0 | 20,3                | 6,2               | 0,289                                  |
| 12 | 338 | RSN569_SANSALV_NGI270      | 5,80                 | 3,7            | 0,53    | 73,0       | 10,8      | 1,0 | 20,3                | 4,9               | 0,387                                  |
| 13 | 382 | RSN723_SUPER.B_B-PTS225    | 6,54                 | 1,0            | 0,43    | 134,4      | 11,3      | 1,0 | 22,3                | 10,6              | 0,723                                  |
| 14 | 273 | RSN412_COALINGA_D-PVY045   | 5,77                 | 13,2           | 0,58    | 37,5       | 11,8      | 1,0 | 21,7                | 3,8               | 0,085                                  |
| 15 | 329 | RSN529_PALMSPR_NPS210      | 6,06                 | 0,0            | 0,69    | 66,0       | 12,3      | 1,0 | 20,2                | 4,8               | 0,375                                  |
| 16 | 173 | RSN182_IMPVAL.L_H_H-E07140 | 6,53                 | 0,6            | 0,34    | 51,7       | 12,6      | 1,0 | 36,8                | 6,8               | 0,157                                  |
| 17 | 385 | RSN730_SPITAK_GUK000       | 6,77                 | 24,0           | 0,20    | 28,4       | 12,7      | 1,0 | 20,0                | 10,5              | 0,026                                  |
| 18 | 72  | RSN147_COYOTELK_G02140     | 5,74                 | 8,5            | 0,26    | 32,0       | 12,9      | 1,0 | 26,8                | 4,0               | 0,089                                  |
| 19 | 328 | RSN527_PALMSPR_MVH135      | 6,06                 | 3,6            | 0,22    | 40,0       | 13,2      | 1,0 | 20,1                | 6,7               | 0,285                                  |
| 20 | 177 | RSN184_IMPVAL.L_H_H-EDA270 | 6,53                 | 5,1            | 0,35    | 75,6       | 13,3      | 1,0 | 39,1                | 7,0               | 0,138                                  |
| 21 | 324 | RSN502_MTLewis_HVR090      | 5,60                 | 12,4           | 0,15    | 19,0       | 13,3      | 0,7 | 40,0                | 5,1               | 0,036                                  |
| 22 | 334 | RSN564_GREECE_H-KAL-NS     | 6,20                 | 6,5            | 0,24    | 33,5       | 13,3      | 1,0 | 29,2                | 5,0               | 0,083                                  |
| 23 | 294 | RSN451_MORGAN_CYC285       | 6,19                 | 0,2            | 1,30    | 78,5       | 13,4      | 1,0 | 30,0                | 3,2               | 0,776                                  |
| 24 | 154 | RSN161_IMPVAL.L_H_H-BRA315 | 6,53                 | 8,5            | 0,22    | 40,9       | 13,5      | 1,0 | 37,8                | 14,4              | 0,028                                  |
| 25 | 160 | RSN173_IMPVAL.L_H_H-E10050 | 6,53                 | 8,6            | 0,17    | 50,7       | 13,7      | 1,0 | 37,0                | 12,8              | 0,036                                  |
| 26 | 153 | RSN161_IMPVAL.L_H_H-BRA225 | 6,53                 | 8,5            | 0,16    | 36,6       | 13,9      | 1,0 | 37,8                | 14,9              | 0,019                                  |
| 27 | 77  | RSN148_COYOTELK_G03140     | 5,74                 | 6,8            | 0,26    | 29,6       | 14,1      | 1,0 | 26,8                | 8,7               | 0,035                                  |
| 28 | 279 | RSN415_COALINGA_D-TSM360   | 5,77                 | 3,7            | 1,02    | 47,8       | 14,1      | 1,0 | 21,7                | 3,7               | 0,176                                  |
| 29 | 345 | RSN614_WHITTIER.A_A-BIR180 | 5,99                 | 14,9           | 0,35    | 39,9       | 14,3      | 1,0 | 28,6                | 3,8               | 0,134                                  |
| 30 | 265 | RSN411_COALINGA_D-PVP360   | 5,77                 | 13,2           | 0,41    | 20,2       | 14,4      | 0,8 | 20,6                | 4,5               | 0,021                                  |
| 31 | 213 | RSN316_WESMORL_PTS225      | 5,90                 | 16,5           | 0,23    | 55,6       | 14,6      | 1,0 | 41,7                | 15,2              | 0,042                                  |
| 32 | 171 | RSN181_IMPVAL.L_H_H-E06140 | 6,53                 | 0,0            | 0,45    | 67,0       | 14,7      | 1,0 | 39,1                | 11,5              | 0,162                                  |
| 33 | 212 | RSN292_ITALY_A-STU270      | 6,90                 | 6,8            | 0,32    | 72,0       | 14,7      | 1,0 | 39,3                | 15,2              | 0,093                                  |
| 34 | 391 | RSN764_LOMAP_GOF160        | 6,93                 | 10,3           | 0,29    | 43,4       | 14,7      | 1,0 | 40,0                | 8,9               | 0,107                                  |
| 35 | 381 | RSN722_SUPER.B_B-KRN360    | 6,54                 | 18,5           | 0,14    | 29,6       | 14,8      | 1,0 | 22,0                | 12,4              | 0,032                                  |
| 36 | 179 | RSN185_IMPVAL.L_H_H-HVP225 | 6,53                 | 5,4            | 0,26    | 53,2       | 15,1      | 1,0 | 37,8                | 11,8              | 0,041                                  |
| 37 | 180 | RSN185_IMPVAL.L_H_H-HVP315 | 6,53                 | 5,4            | 0,22    | 51,5       | 15,3      | 1,0 | 37,8                | 12,8              | 0,036                                  |
| 38 | 278 | RSN415_COALINGA_D-TSM270   | 5,77                 | 3,7            | 0,78    | 47,5       | 15,5      | 1,0 | 21,7                | 4,0               | 0,283                                  |
| 39 | 161 | RSN173_IMPVAL.L_H_H-E10320 | 6,53                 | 8,6            | 0,23    | 46,4       | 15,6      | 1,0 | 37,0                | 12,0              | 0,082                                  |
| 40 | 349 | RSN668_WHITTIER.A_A-NOR360 | 5,99                 | 14,4           | 0,25    | 26,3       | 15,6      | 0,9 | 30,2                | 9,4               | 0,021                                  |

Tabla A-1. Continua

| N° | ID  | Nombre de Sismo            | Earthquake Magnitude | J-B Dist. (km) | PGA (g) | PGV (cm/s) | IP (cm-s) | IPR | Record Duration (s) | Time IA 5-95% (s) | ESI (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|----|-----|----------------------------|----------------------|----------------|---------|------------|-----------|-----|---------------------|-------------------|--|
| 41 | 187 | RSN214_LIVERMOR_A-KOD180   | 5,80                 | 15,2           | 0,15    | 20,8       | 15,7      | 0,8 | 20,9                | 10,4              | 0,035                                  |
| 42 | 346 | RSN615_WHITTIER.A_A-DWN18  | 5,99                 | 15,0           | 0,21    | 30,7       | 15,7      | 1,0 | 40,0                | 9,2               | 0,033                                  |
| 43 | 347 | RSN645_WHITTIER.A_A-OR2010 | 5,99                 | 19,8           | 0,23    | 31,5       | 15,8      | 1,0 | 32,1                | 8,0               | 0,055                                  |
| 44 | 217 | RSN33_PARKF_TMB205         | 6,19                 | 16,0           | 0,36    | 22,3       | 16,4      | 0,8 | 30,4                | 4,4               | 0,037                                  |
| 45 | 175 | RSN183_IMPVAL.L_H_H-E08140 | 6,53                 | 3,9            | 0,61    | 54,5       | 16,5      | 1,0 | 37,6                | 6,8               | 0,199                                  |
| 46 | 210 | RSN285_ITALY_A-BAG270      | 6,90                 | 8,1            | 0,19    | 34,7       | 16,5      | 1,0 | 36,8                | 16,1              | 0,046                                  |
| 47 | 105 | RSN150_COYOTELK_G06320     | 5,74                 | 0,4            | 0,32    | 25,4       | 16,6      | 0,9 | 27,1                | 3,5               | 0,073                                  |
| 48 | 182 | RSN192_IMPVAL.L_H_H-WSM180 | 6,53                 | 14,8           | 0,11    | 22,6       | 16,6      | 0,8 | 40,0                | 25,6              | 0,007                                  |
| 49 | 327 | RSN527_PALMSPR_MVH045      | 6,06                 | 3,6            | 0,22    | 31,0       | 16,6      | 1,0 | 20,1                | 5,1               | 0,220                                  |
| 50 | 348 | RSN652_WHITTIER.A_A-DEL000 | 5,99                 | 22,4           | 0,30    | 32,4       | 16,6      | 1,0 | 29,7                | 11,2              | 0,041                                  |
| 51 | 176 | RSN183_IMPVAL.L_H_H-E08230 | 6,53                 | 3,9            | 0,47    | 52,1       | 16,7      | 1,0 | 37,6                | 5,8               | 0,112                                  |
| 52 | 323 | RSN496_NAHANNI_S2330       | 6,76                 | 0,0            | 0,36    | 32,0       | 16,7      | 1,0 | 10,0                | 7,3               | 0,056                                  |
| 53 | 295 | RSN459_MORGAN_G06090       | 6,19                 | 9,9            | 0,29    | 36,5       | 16,8      | 1,0 | 30,0                | 6,5               | 0,117                                  |
| 54 | 165 | RSN178_IMPVAL.L_H_H-E03230 | 6,53                 | 10,8           | 0,22    | 43,3       | 17,0      | 1,0 | 39,6                | 14,1              | 0,016                                  |
| 55 | 322 | RSN496_NAHANNI_S2240       | 6,76                 | 0,0            | 0,52    | 29,6       | 17,0      | 1,0 | 10,0                | 7,2               | 0,034                                  |
| 56 | 91  | RSN149_COYOTELK_G04360     | 5,74                 | 4,8            | 0,25    | 31,9       | 17,1      | 1,0 | 27,1                | 11,0              | 0,040                                  |
| 57 | 188 | RSN235_MAMMOTH.J_J-MLS254  | 5,69                 | 1,5            | 0,39    | 24,2       | 17,2      | 0,9 | 30,0                | 3,9               | 0,023                                  |
| 58 | 147 | RSN159_IMPVAL.L_H_H-AGR273 | 6,53                 | 0,0            | 0,19    | 41,8       | 17,6      | 1,0 | 28,4                | 12,4              | 0,081                                  |
| 59 | 145 | RSN158_IMPVAL.L_H_H-AEP045 | 6,53                 | 0,0            | 0,31    | 42,8       | 17,8      | 1,0 | 14,7                | 9,8               | 0,133                                  |
| 60 | 293 | RSN451_MORGAN_CYC195       | 6,19                 | 0,2            | 0,71    | 52,9       | 17,8      | 1,0 | 30,0                | 4,1               | 0,295                                  |
| 61 | 296 | RSN461_MORGAN_HVR240       | 6,19                 | 3,5            | 0,31    | 39,4       | 17,8      | 1,0 | 40,0                | 10,7              | 0,061                                  |
| 62 | 181 | RSN192_IMPVAL.L_H_H-WSM090 | 6,53                 | 14,8           | 0,08    | 22,2       | 18,3      | 0,7 | 40,0                | 24,7              | 0,005                                  |
| 63 | 342 | RSN585_BAJA_CPE251         | 5,50                 | 3,4            | 0,91    | 55,4       | 18,3      | 1,0 | 40,0                | 4,2               | 0,431                                  |
| 64 | 400 | RSN77_SFERN_PUL164         | 6,61                 | 0,0            | 1,22    | 114,5      | 18,4      | 1,0 | 41,7                | 7,0               | 0,794                                  |
| 65 | 156 | RSN170_IMPVAL.L_H_H-ECC002 | 6,53                 | 7,3            | 0,21    | 38,4       | 18,8      | 1,0 | 40,0                | 10,4              | 0,106                                  |
| 66 | 164 | RSN178_IMPVAL.L_H_H-E03140 | 6,53                 | 10,8           | 0,27    | 48,0       | 18,9      | 1,0 | 39,6                | 11,9              | 0,078                                  |
| 67 | 344 | RSN611_WHITTIER.A_A-CAS000 | 5,99                 | 18,3           | 0,32    | 29,5       | 19,1      | 0,9 | 31,1                | 8,0               | 0,048                                  |
| 68 | 383 | RSN723_SUPER.B_B-PTS315    | 6,54                 | 1,0            | 0,38    | 53,2       | 19,1      | 1,0 | 22,3                | 11,0              | 0,117                                  |
| 69 | 330 | RSN540_PALMSPR_WWT180      | 6,06                 | 0,0            | 0,48    | 38,5       | 19,2      | 1,0 | 20,1                | 5,5               | 0,092                                  |
| 70 | 183 | RSN20_NCALIF.FH_H-FRN044   | 6,50                 | 26,7           | 0,16    | 36,1       | 19,3      | 1,0 | 40,0                | 17,3              | 0,072                                  |
| 71 | 390 | RSN763_LOMAP_GIL067        | 6,93                 | 9,2            | 0,36    | 31,1       | 19,3      | 1,0 | 40,0                | 5,0               | 0,065                                  |
| 72 | 207 | RSN266_VICT_CHI102         | 6,33                 | 18,5           | 0,15    | 26,0       | 19,4      | 0,8 | 26,9                | 16,4              | 0,027                                  |
| 73 | 169 | RSN180_IMPVAL.L_H_H-E05140 | 6,53                 | 1,8            | 0,53    | 48,9       | 19,9      | 1,0 | 39,3                | 8,3               | 0,141                                  |
| 74 | 361 | RSN692_WHITTIER.A_A-EJS048 | 5,99                 | 11,5           | 0,47    | 34,4       | 20,7      | 1,0 | 37,8                | 5,8               | 0,079                                  |
| 75 | 286 | RSN448_MORGAN_AND250       | 6,19                 | 3,2            | 0,42    | 25,4       | 20,8      | 0,8 | 28,4                | 6,9               | 0,038                                  |
| 76 | 214 | RSN316_WESMORL_PTS315      | 5,90                 | 16,5           | 0,15    | 32,7       | 20,9      | 1,0 | 41,7                | 18,7              | 0,024                                  |
| 77 | 341 | RSN585_BAJA_CPE161         | 5,50                 | 3,4            | 1,28    | 46,4       | 21,0      | 1,0 | 40,0                | 3,2               | 0,358                                  |
| 78 | 184 | RSN20_NCALIF.FH_H-FRN314   | 6,50                 | 26,7           | 0,20    | 26,2       | 21,3      | 0,8 | 40,0                | 19,4              | 0,036                                  |
| 79 | 167 | RSN179_IMPVAL.L_H_H-E04140 | 6,53                 | 4,9            | 0,48    | 39,7       | 21,3      | 1,0 | 39,1                | 6,7               | 0,200                                  |
| 80 | 196 | RSN250_MAMMOTH.L_L-LUL09   | 5,94                 | 9,7            | 0,41    | 34,1       | 21,3      | 1,0 | 26,0                | 7,1               | 0,115                                  |



Tabla A-1.

| Nº  | ID  | Nombre de Sismo            | Earthquake Magnitude | J-B Dist. (km) | PGA (g) | PGV (cm/s) | IP (cm-s) | IPR | Record Duration (s) | Time IA 5-95% (s) | ESI (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ) |
|-----|-----|----------------------------|----------------------|----------------|---------|------------|-----------|-----|---------------------|-------------------|--|
| 81  | 223 | RSN359_COALINGA.H_H-PV1090 | 6,36                 | 24,8           | 0,23    | 27,5       | 21,3      | 0,8 | 60,0                | 10,9              | 0,051                                  |
| 82  | 68  | RSN126_GAZLI_GAZ000        | 6,80                 | 3,9            | 0,70    | 66,3       | 21,4      | 1,0 | 13,5                | 6,4               | 0,360                                  |
| 83  | 287 | RSN448_MORGAN_AND340       | 6,19                 | 3,2            | 0,29    | 27,8       | 21,4      | 0,8 | 28,4                | 5,2               | 0,106                                  |
| 84  | 69  | RSN126_GAZLI_GAZ090        | 6,80                 | 3,9            | 0,86    | 67,7       | 21,7      | 1,0 | 13,5                | 7,0               | 0,286                                  |
| 85  | 343 | RSN595_WHITTIER.A_A-JAB297 | 5,99                 | 10,3           | 0,22    | 28,3       | 21,7      | 0,8 | 34,3                | 10,4              | 0,025                                  |
| 86  | 244 | RSN407_COALINGA_D-OLC270   | 5,77                 | 2,0            | 0,84    | 40,0       | 22,1      | 1,0 | 21,2                | 2,8               | 0,283                                  |
| 87  | 362 | RSN692_WHITTIER.A_A-EJS318 | 5,99                 | 11,5           | 0,46    | 31,6       | 22,1      | 0,9 | 37,8                | 6,0               | 0,044                                  |
| 88  | 90  | RSN149_COYOTELK_G04270     | 5,74                 | 4,8            | 0,23    | 25,8       | 22,2      | 0,7 | 27,1                | 8,2               | 0,047                                  |
| 89  | 67  | RSN125_FRIULI.A_A-TMZ270   | 6,50                 | 15,0           | 0,32    | 30,5       | 22,4      | 0,9 | 36,4                | 4,9               | 0,121                                  |
| 90  | 162 | RSN174_IMPVAL.L_H_H-E11230 | 6,53                 | 12,6           | 0,38    | 44,6       | 22,4      | 1,0 | 39,4                | 7,9               | 0,083                                  |
| 91  | 387 | RSN753_LOMAP_CLS000        | 6,93                 | 0,2            | 0,65    | 56,0       | 22,5      | 1,0 | 40,0                | 6,9               | 0,233                                  |
| 92  | 333 | RSN558_CHALFANT.A_A-ZAK36  | 6,19                 | 6,4            | 0,40    | 44,7       | 22,7      | 1,0 | 40,0                | 8,1               | 0,183                                  |
| 93  | 386 | RSN737_LOMAP_AGW000        | 6,93                 | 24,3           | 0,17    | 33,5       | 22,7      | 0,9 | 60,0                | 21,2              | 0,016                                  |
| 94  | 320 | RSN495_NAHANNI_S1010       | 6,76                 | 2,5            | 1,11    | 43,9       | 23,1      | 1,0 | 10,3                | 7,5               | 0,099                                  |
| 95  | 215 | RSN319_WESMORL_WSM090      | 5,90                 | 6,2            | 0,38    | 44,2       | 23,2      | 1,0 | 65,0                | 6,9               | 0,210                                  |
| 96  | 146 | RSN159_IMPVAL.L_H_H-AGR003 | 6,53                 | 0,0            | 0,29    | 35,3       | 23,4      | 0,9 | 28,4                | 13,3              | 0,057                                  |
| 97  | 379 | RSN721_SUPER.B_B-ICC000    | 6,54                 | 18,2           | 0,36    | 48,1       | 23,6      | 1,0 | 60,0                | 28,0              | 0,033                                  |
| 98  | 195 | RSN250_MAMMOTH.L_L-LUL00   | 5,94                 | 9,7            | 0,95    | 30,3       | 24,3      | 0,8 | 26,0                | 6,5               | 0,082                                  |
| 99  | 178 | RSN184_IMPVAL.L_H_H-EDA360 | 6,53                 | 5,1            | 0,48    | 41,0       | 24,8      | 1,0 | 39,1                | 6,6               | 0,238                                  |
| 100 | 388 | RSN753_LOMAP_CLS090        | 6,93                 | 0,2            | 0,48    | 47,6       | 24,8      | 1,0 | 40,0                | 7,9               | 0,239                                  |
| 101 | 380 | RSN721_SUPER.B_B-ICC090    | 6,54                 | 18,2           | 0,26    | 41,8       | 25,0      | 1,0 | 60,0                | 35,7              | 0,032                                  |
| 102 | 71  | RSN143_TABAS_TAB-T1        | 7,35                 | 1,8            | 0,86    | 123,6      | 25,1      | 1,0 | 32,8                | 16,3              | 0,351                                  |
| 103 | 321 | RSN495_NAHANNI_S1280       | 6,76                 | 2,5            | 1,20    | 40,6       | 25,1      | 1,0 | 10,3                | 7,3               | 0,145                                  |
| 104 | 389 | RSN755_LOMAP_CYC285        | 6,93                 | 20,0           | 0,49    | 40,6       | 25,2      | 1,0 | 40,0                | 12,2              | 0,092                                  |
| 105 | 331 | RSN540_PALMSPR_WWT270      | 6,06                 | 0,0            | 0,63    | 30,8       | 25,3      | 0,7 | 20,1                | 3,4               | 0,127                                  |
| 106 | 332 | RSN558_CHALFANT.A_A-ZAK27  | 6,19                 | 6,4            | 0,45    | 36,9       | 25,4      | 0,9 | 40,0                | 6,2               | 0,166                                  |
| 107 | 224 | RSN367_COALINGA.H_H-PVB04  | 6,36                 | 7,7            | 0,30    | 39,4       | 26,0      | 0,9 | 58,1                | 8,3               | 0,144                                  |
| 108 | 225 | RSN368_COALINGA.H_H-PVY04  | 6,36                 | 7,7            | 0,60    | 60,5       | 26,8      | 1,0 | 58,1                | 8,2               | 0,332                                  |
| 109 | 211 | RSN292_ITALY_A-STU000      | 6,90                 | 6,8            | 0,23    | 37,0       | 27,9      | 0,8 | 39,3                | 15,0              | 0,064                                  |
| 110 | 216 | RSN319_WESMORL_WSM180      | 5,90                 | 6,2            | 0,50    | 35,8       | 28,4      | 0,7 | 65,0                | 6,1               | 0,176                                  |
| 111 | 384 | RSN725_SUPER.B_B-POE270    | 6,54                 | 11,2           | 0,48    | 41,3       | 29,2      | 0,8 | 22,3                | 13,7              | 0,078                                  |
| 112 | 70  | RSN143_TABAS_TAB-L1        | 7,35                 | 1,8            | 0,85    | 99,1       | 31,5      | 1,0 | 32,8                | 16,5              | 0,412                                  |
| 113 | 148 | RSN160_IMPVAL.L_H_H-BCR140 | 6,53                 | 0,4            | 0,60    | 46,8       | 31,9      | 0,8 | 37,8                | 9,6               | 0,210                                  |
| 114 | 401 | RSN77_SFERN_PUL254         | 6,61                 | 0,0            | 1,24    | 57,4       | 34,9      | 0,7 | 41,7                | 7,3               | 0,410                                  |