Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Universidad Autónoma de Baja California ISSN 2594-1925
Volumen 9 (4): e481. Octubre-Diciembre, 2026. https://doi.org/10.37636/recit.v9n4e481

Artículo de investigación

Hacia una ley de atenuación sísmica para estimar I_{Np} mediante algoritmos genéticos

Towards a seismic attenuation law to estimate INp using genetic algorithms

Daniel Alonso Yee Morales[1], Edén Bojórquez Mora[1], Juan Bojórquez Mora[1], Ali Abraham Rodríguez Castellanos[2], Omar Jhovany Payan Serrano[3]

[1]Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa Cd. Universitaria, Blvd. de las Américas y Blvd. Universitarios, S/N, C.P. 80040, Culiacán Rosales, Sinaloa, México
[2]Facultad de ingeniería y tecnología de Mazatlán (FITEM), Universidad Autónoma de Sinaloa Cd. Universitaria, Av. Ejército Mexicano S/N, C.P. 82017, Mazatlán, Sinaloa, México
[3]Metal-Mecánica, Instituto Tecnológico de Culiacán, calle Juan de Dios Bátiz No. 310 Poniente, Colonia Guadalupe, C.P. 80220, Culiacán Rosales, Sinaloa, México

Autor de correspondencia: Daniel Alonso Yee Morales, Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería, Culiacán, Cd. Universitaria, Blvd. de las Américas y Blvd. Universitarios, S/N, C.P. 80040, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. Correo electrónico: danielyee@uas.edu.mx. ORCID: 0009-0005-7840-187X, Edén Bojórquez Mora, Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería, Culiacán, Cd. Universitaria, Blvd. de las Américas y Blvd. Universitarios, S/N, C.P. 80040, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. Correo electrónico: eden@uas.edu.mx. ORCID: 0000-0001-6402-1693.

Recibido: 16 de abril del 2026 **Aceptado:** 12 de agosto del 2026 **Publicado:** 3 de noviembre del 2026

Resumen. – *La predicción del movimiento del suelo a través de leyes de atenuación ha sido objeto de estudio por diversos investigadores. En la actualidad, en los códigos de construcción son implementadas medidas de intensidad sísmica tradicionales como la seudoaceleración para el periodo fundamental de la estructura Sa(T_1), aceleración máxima del suelo (AMS), entre otras, que han mostrado una incertidumbre significativa al predecir las demandas sísmicas. Actualmente, existen medidas de intensidad sísmica que reducen de forma considerable la incertidumbre en la predicción de la respuesta estructural. Investigaciones previas han demostrado que la medida de intensidad sísmica I_{Np} cuantifica con mayor precisión las características del evento sísmico y la respuesta estructural ante acciones sísmicas. Por lo anterior, en este estudio se presenta una propuesta preliminar de ley de atenuación que estima el movimiento del suelo basado en una medida de intensidad sísmica avanzada I_{Np}. Dicha propuesta se desarrolla mediante la aplicación de algoritmos genéticos, herramienta metaheurística caracterizada por su elevada robustez y precisión. Durante el estudio, fueron generados espectros de respuesta I_{Np} a partir de una base de datos de eventos sísmicos interplaca registrados por estaciones de Ciudad Universitaria en la Universidad Nacional Autónoma de México. Finalmente, a través de la técnica de optimización, se estimaron los coeficientes de ajuste para los periodos estructurales seleccionados, lo que permitió obtener resultados satisfactorios al compararlos con los espectros de respuesta I_{Np} previamente generados.*

Palabras clave: Ley de atenuación; Medida de intensidad sísmica; Algoritmos genéticos; Espectros de respuesta.

Abstract. – Prediction of ground motion through attenuation laws has been the studied by many researchers. Currently, building codes implement traditional seismic intensity measures such as pseudo-acceleration for the fundamental period of the structure Sa (T_1), peak ground acceleration (PGA), among others, which have shown significant uncertainty when predicting seismic demands. At present, there are seismic intensity measures that considerably reduce the uncertainty in predicting structural response. Previous research has demonstrated that the seismic intensity measure I_{Np} quantifies more accurately the characteristics of the seismic event and the structural response to seismic actions. Therefore, this study presents a preliminary proposal of an attenuation law that estimates ground motion based on an advanced seismic intensity measure I_{Np}. This proposal is developed through the application of genetic algorithms, a metaheuristic tool characterized by its high robustness and accuracy. During the study, I_{Np} response spectra were generated from a database of interplate seismic events recorded by stations at Ciudad Universitaria at the National Autonomous University of México. Finally, through the optimization technique, the adjustment coefficients for the selected structural periods were estimated, which allowed for obtaining satisfactory results when compared with the previously generated I_{Np} response spectra.

Keywords: Attenuation law; Seismic intensity measurement; Genetic algorithms; Response spectra.

ISSN: 2594-1925

1. Introducción

Las leyes de atenuación son herramientas que permiten predecir la intensidad sísmica en un lugar específico y su degradación en función de la distancia. En la actualidad, se han desarrollado diversas leyes de atenuación para distintas regiones del mundo basadas en medidas de intensidad sísmicas que generan cierta incertidumbre a la hora de predecir la respuesta estructural [1], [2], [3]. En México, se han presentado múltiples estudios en los cuales se analiza la aceleración y velocidad máxima del suelo [4], [5], algunas más recientes han sido presentadas por García [6], Jaimes et al [7], Villalobos et al [8].

En la literatura existen múltiples ecuaciones basadas en medidas de intensidad sísmicas como la AMS y Sa (T_1), hoy en día podemos encontrar medidas de intensidad sísmicas que predicen con mayor eficiencia la respuesta estructural. Córdova et al [9], propusieron un parámetro que considera la elongación del periodo estructural como consecuencia de las deformaciones plásticas. Por su parte, Bojórquez y Ievorlino [10] definieron el parámetro N_p que posee el potencial de representar con gran precisión la forma espectral. Posteriormente, propusieron una medida de intensidad sísmica escalar I_{Np} que incorpora la seudoaceleración para el periodo fundamental de la estructura $Sa(T_1)$ y N_p.

Numerosas investigaciones han evaluado la medida de intensidad sísmica I_{Np} [11], [12], [13], [14], [15], [16] permitiendo concluir en una mayor eficiencia al estimar la intensidad del evento sísmico. Por lo anterior, en el presente trabajo se busca establecer una ley de atenuación para I_{Np}, puesto que actualmente no se ha empleado para desarrollar leyes de atenuación que hagan posible estimar las demandas sísmicas**.** Para este propósito, se implementaron Algoritmos Genéticos (AG) con codificación real, cuya fortaleza radica en su robustez y eficiencia en la solución de problemas complejos, logrando evitar estancamiento en óptimos locales mediante métodos tradicionales basados en el gradiente; además, los algoritmos genéticos han sido ampliamente utilizados en problemas de ingeniería sísmica y sismología con alta efectividad en comparación con otras técnicas metaheurísticas.

2. Antecedentes

2.1 Estado del arte

Las leyes de atenuación representan ecuaciones matemáticas que hacen posible predecir la intensidad sísmica en un punto determinado, como consecuencia de la ocurrencia de un movimiento sísmico en un punto distinto. Esta ecuación establece una relación entre la magnitud, la distancia y otros parámetros del evento sísmico con la intensidad. Por lo que el acceso a una base de datos sísmica de la zona de estudio resulta fundamental. Las primeras leyes de atenuación tenían como base la distancia entre la fuente sísmica y el área de estudio [1]. Después del terremoto de San Francisco en 1971 la base de datos de registros sísmicos se incrementó permitiendo a diversos investigadores [1], [2], [3], [17], [18] replantear investigaciones previas y establecer leyes de atenuación que no solo consideraban la distancia, sino otros parámetros relevantes del movimiento del suelo. Campbell y Bozornia [19], incorporaron el tipo de falla y las condiciones del terreno. Boore et at [3] no solo consideraron los parámetros propuestos por Cambell y Bozornia [19], sino que incluyeron la velocidad promedio de la onda de corte del suelo por encima de los 30 metros. En México, ha sido un camino explorado por algunos investigadores [4], [20]. Esteva y

ISSN: 2594-1925

Villaverde [4], establecieron curvas de velocidad y aceleración máxima del suelo, a partir de eventos sísmicos de Estados Unidos de América.

Después del terremoto del 19 de septiembre de 1985 registrado en la Ciudad de México y cuyos daños aún siguen marcados en la memoria de los mexicanos, se llevaron a cabo estudios centrados en eventos sísmicos de subducción registrados en estaciones localizadas en la Ciudad México [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27]. Como resultado se obtuvieron ecuaciones de movimiento basadas en la aceleración máxima del suelo, velocidad máxima del suelo (VMS), desplazamiento máximo del suelo (DMS), más recientemente energía de entrada y entre las más empleadas e investigadas la seudoaceleración. Esta última, presenta algunas limitaciones al no considerar la elongación del periodo de vibración por la no linealidad. Durante los últimos años, se han propuesto medidas de intensidad sísmica que reducen significativamente sus deficiencias. Cordoba et al [9] mostraron la eficacia de un indicador de la forma espectral que tiene en consideración el alargamiento del periodo estructural causado por las deformaciones plásticas. Mehanny [28] retomó lo planteado por Cordoba y empleó una forma espectral de amplio intervalo dando lugar a una medida de intensidad sísmica más eficiente. Existen medidas de intensidad sísmica vectoriales como la propuesta por Baker y Cornell [29], Tothong y Luco [30]. Sin embargo, algunas de ellas resultan ineficientes al estimar la respuesta estructural. En 2011 Bojórquez y Iervolino [10] propusieron el parámetro N_p que permite representar de manera más eficiente la forma espectral. Posteriormente, desarrollaron la medida de intensidad sísmica $I_{Np,}$ la cual contempla la Sa (T_1) y N_p. Numerosos investigadores han analizado su capacidad, concluyendo que la medida de intensidad sísmica I_{Np} permite estimar con mayor precisión las fuerzas
sísmicas que condicionan el comportamiento sísmico de las edificaciones [11], [12], [13], [14], [15], [16].

3. Metodología

3.1 Modelo de atenuación

El movimiento sísmico del suelo se expresa de manera más apropiada en función de los parámetros que caracterizan el movimiento del terreno, medida de intensidad sísmica (MIS). Por tanto, resulta necesario recurrir a métodos que logran estimar la intensidad sísmica con mayor precisión. De este modo, las ecuaciones del movimiento del suelo establecen la relación entre la intensidad con magnitud, distancia, características de la fuente, efectos del sitio, etc. Con base en el planteamiento de David M. Boore et al., la aceleración máxima del suelo, velocidad y el espectro de respuesta puede describirse mediante la magnitud y la distancia del terremoto [31]. En la figura 1 se muestran los parámetros considerados en el modelo de atenuación presentes en este trabajo.

ISSN: 2594-1925

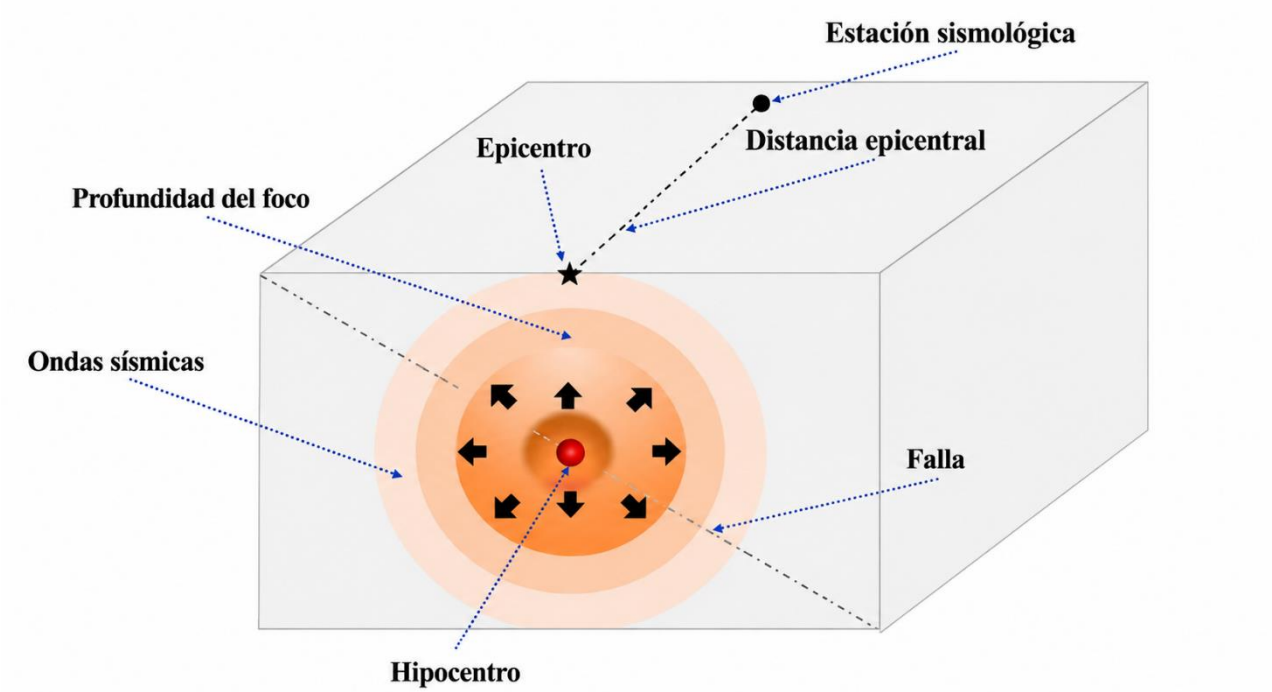


Figura 1. Características sísmicas

La ecuación (1) establece la forma del funcional que fue adoptada para estimar los valores de I_{Np} derivados de rupturas de zonas de contacto entre placas tectónicas. Los coeficientes de la ecuación C_1, C_2, C_3 hasta C_n, se asocian a los parámetros de ajuste del modelo.

$$\ln Y = c_1 + c_2 M_w + c_3 \log R + c_4 R + c_5 \alpha + \varepsilon \quad (1)$$

Donde:

Y	Representa los coeficientes de respuesta I_{Np}
M	Magnitud del evento sísmico
R	Distancia epicentral
α	Parámetro alfa
C	Coeficientes de la ecuación

En la literatura se reportan diversos análisis para estimar los coeficientes de ajuste siendo uno de los procedimientos más empleados el método de mínimos cuadrados. Sin embargo, cuenta con la desventaja de generar soluciones locales y requiere de un gradiente de la función objetivo [32]. Diversos investigadores han explorado el uso de algoritmos genéticos, descubriendo su capacidad sobresaliente en la resolución de problemas sencillos y complejos. Dicha técnica se fundamenta en los principios de la evolución, destacando su robustez y alta precisión.

ISSN: 2594-1925

3.2 Algoritmos Genéticos (AG)

Se ha encontrado que la metodología darwiniana cuenta con un amplio espectro para la resolución de problemas. Su principal fortaleza radica en su robustez y eficiencia al reducir la incertidumbre, aunque la información disponible sea limitada. La propuesta inicial fue implementada por Holland [33], consolidándose como una herramienta metaheurística con alta capacidad de adaptación, destacando su eficiencia al optimizar la solución de problemas complejos. Es así, que el método basado en selección natural es aplicado para el desarrollo del presente trabajo. Siendo los siguientes puntos los más destacados de dicha técnica.

Inicio, codificación y generación del individuo

La población inicial se compone de N individuos generados aleatoriamente, controlados por un límite inferior (LI) y límite superior (LS); límites derivados del fenómeno sísmico e investigaciones previamente realizadas [6], [27]. Esto garantiza que cada individuo se encuentre dentro del espacio de búsqueda señalado, evitando sesgos hacia otras regiones, consumo innecesario de memoria y ahorro en los tiempos de ejecución. Cada gen del vector de parámetros o cromosoma se encuentra restringido a los intervalos previamente establecidos. En la Tabla 1 se muestra un ejemplo de la estructura del cromosoma seleccionado por el modelo.

De acuerdo con la ecuación (2), $C^{(i)}$ representa una posible solución del problema mediante un esquema de codificación real, donde el índice *i* corresponde a la identificación de cada uno de los individuos que forman parte de la población N. Los coeficientes c_{j1} a c_{jn} representan los parámetros o genes a optimizar en la ley de atenuación, donde cada cromosoma $C^{(i)}$ se estructura como un vector de longitud n. Es decir, para el caso particular de nuestro modelo de atenuación tendríamos la estructura señalada en la ecuación (3).

$$C^{(i)}=(c_{j_1}^{(i)},c_{j_2}^{(i)},c_{j_3}^{(i)},\ldots,c_{j_n}^{(i)}) \quad (2)$$

Donde:

C	Vector de parámetros reales
i=1, 2,..,N	Número de individuos
n	Número de parámetros o cantidad de genes
$c_j^{(i)}$	Componente del vector de parámetros reales

$$C=(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5) \quad (3)$$

Tabla 1. Límite superior e inferior del modelo

Gen / posición	Parámetro	L_I	L_S	Cromosoma C
	Coeficiente			
C_1	base C_1	-20	20	7.8094
C_2	Coeficiente Magnitud C_2	0.1	3.5	0.9099
C_3	Coeficiente de atenuación geométrica C_3	-3.5	-0.5	-2.1533
C_4	Coeficiente atenuación anelástica C_4	-0.1	0	-0.0037
C_5	Coeficiente de calibración C_5	-11	11	3.8467

ISSN: 2594-1925

Evaluación de aptitudes y selección de individuos

Se procede a la evaluación de cada individuo que integra la población permitiendo conocer su capacidad para la solución del problema, seleccionando aquellos con mayor grado de aptitud y llevar a cabo el proceso de reproducción. Lo anterior se efectúa a través de una función fitness, ecuación (4), que corresponde al Error Cuadrático Medio en el espacio logarítmico (ECM) que cuantifica la precisión de ajuste del modelo respecto a los datos reales.

$$ECM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(lny_i - \widehat{lny_i})^2 \quad (4)$$

Donde:

n	Número total de datos
lny_i	Valores reales de los coeficientes de respuesta I_{Np}
$\widehat{lny_i}$	Valores estimados de los coeficientes de respuesta I_{Np}

Es importante destacar que los límites establecidos en la Tabla 1, cumplen la función de restricciones del modelo, razón por la cual no se implementaron funciones de penalización externas. Estas fronteras actúan como barreras restringiendo la generación y la evolución de la población N, garantizando que los cromosomas evaluados a lo largo de las generaciones constituyan soluciones factibles.

Cruzamiento y mutación

Tras la selección de los individuos, se lleva a cabo el cruzamiento de los padres P_i y P_j mediante cruce aritmético, ecuación (5). Dando lugar a la descendencia h_i y h_j, resultado de combinar sus genes quedando delimitados por los segmentos anteriormente mencionados en la Tabla 1.

$$h_i = \alpha P_i + (1-\alpha)P_j \quad (5)$$
$$h_j = \alpha P_j + (1-\alpha)P_i$$

Donde:

h_i e h_j	Hijos generados por cruzamiento de padres
P_i e P_j	Padres seleccionados
α	Número generado al azar

Posterior al cruce entra en función el operador genético de mutación polinomial. Cuya característica principal se centra en reducir tiempos de ejecución y mejorar el desempeño en comparación con otros operadores [34]. Como punto inicial, se introducen perturbaciones a los genes del cromosoma

ISSN: 2594-1925

seleccionado, si se cumple que r < p_m. Donde r es un valor aleatorio en un intervalo de 0 a 1 y p_m probabilidad de mutación, ecuación (6).

$$p_m = {}^{1}/_{n_{var}} \quad (6)$$

Donde:

n_{var} Número de variables

Como se ha mencionado previamente los genes de cada cromosoma se encuentran restringidos bajo los límites establecidos, ver Tabla 1, de manera que se generan valores dentro de ese mismo rango.

Una vez identificado el gen a mutar, se aplica el operador polinomial. Método que fija un índice constante como η_m y cuyo valor adecuado oscila entre 20 a 100 [35]. Se genera un valor aleatorio u en el rango de 0 a 1, dato que permite especificar la expresión mediante la cual se llevará a cabo el proceso de mutación [35], ecuación (7). De acuerdo a la expresión (7), c es el gen seleccionado con límites establecidos L_I y L_S, mientras que c' corresponde al gen mutado.

$$c' = \begin{cases} c + \delta_L(c - L_I), & para\ u \leq 0.5 \\ c + \delta_R(L_S - c), & para\ u > 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta_L = (2u)^{1/(1+\eta_m)} - 1, para\ u \leq 0.5,$$
$$\delta_R = 1 - (2(1-u))^{1/(1+\eta_m)}, para\ u > 0.5$$

Reemplazo e iteración

El proceso del reemplazo consistió en actualizar el 95 % de la población por los individuos que forman parte de la nueva generación, mientras que el 5 % con mejor fitness se mantuvo garantizando la preservación de las mejores soluciones.

Este proceso se repite hasta lograr el número de generaciones señaladas en el planteamiento inicial del problema o bien si el mejor fitness no mejora durante 75 generaciones consecutivas**.** El método de AG ha sido adoptado en diversas investigaciones dentro de la ingeniería sísmica para el desarrollo de ecuaciones de movimiento del suelo, Tavakoli y Pezeshk [36], Scherbaum et al [37], Ching-Yun Kao et al [38]. Concluyendo que su aplicación e implementación en la resolución de problemas aumenta la probabilidad de generar modelos más precisos. Por lo anterior, en la presente investigación se aplica la metodología de AG con el objetivo de obtener los parámetros de ajuste de la ecuación del movimiento del suelo considerando la medida de intensidad sísmica I_{Np}.

3.3 Medida de intensidad sísmica

A través de las medidas de intensidad sísmica se puede cuantificar las características de un terremoto, aspecto esencial para la cuantificación de su potencial destructivo y evaluación de la respuesta estructural ante la ocurrencia de este fenómeno. Es posible que la respuesta estructural incursione en el rango lineal o la no linealidad según la intensidad del movimiento. En la literatura, múltiples estudios han propuesto medidas de intensidad sísmica que permiten reducir la incertidumbre de la respuesta estructural [39], [40],

ISSN: 2594-1925

[41], [42], [43], [44]. La medida de intensidad sísmica adoptada por los códigos de construcción es la $Sa(T_1)$. Esta medida da lugar a un nivel de incertidumbre elevado al incurrir en la fase no lineal ante la ocurrencia de un evento sísmico de gran intensidad. Dando lugar a la pérdida de rigidez estructural, lo que conduce al alargamiento del periodo de vibración estructural (T_N), es decir, aumenta el periodo fundamental de la estructura (T_1), figura 2.

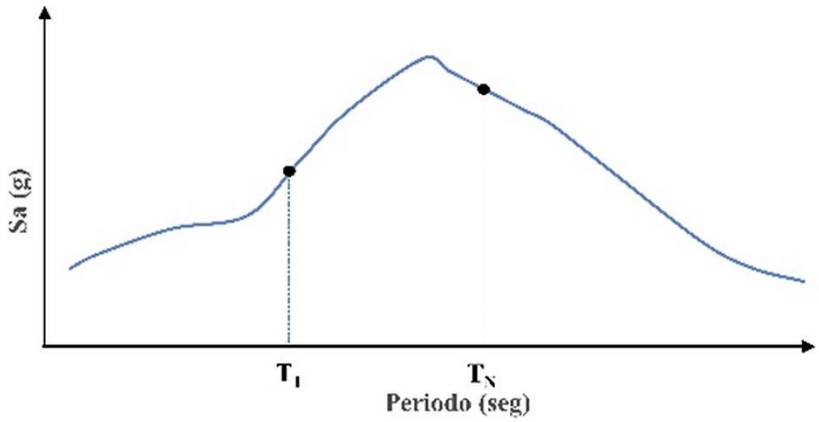


Figura 2. Periodo T_1 y alargamiento a T_N

Actualmente, existen medidas de intensidad sísmicas que toman en cuenta este comportamiento y proporcionan información relevante sobre la forma espectral. Se ha destacado la importancia de un indicador de la forma espectral puesto que contempla la elongación del periodo estructural toda vez que la estructura incursione en el rango inelástico [9]. Baker y Cornerll [29] desarrollaron un parámetro que permite suavizar, ajustar y reducir la variabilidad de la forma del espectro en relación con el nivel de intensidad del evento sísmico expresado en la ecuación (8). Bojórquez et al [43] normalizan la media geométrica Sa_{avg} con respecto a $Sa(T_1)$, partiendo de esta relación establecieron el parámetro de la forma espectral N_p, ecuación (9).

$$Sa_{avg}(T_1,\ldots,T_N)=\left(\prod_{i=1}^{N} Sa(T_1)\right)^{1/N} \quad (8)$$

Donde:

$T_1, \ldots, T_N$ Corresponden a los N-esimos periodos de interés

$$N_P=\frac{Sa_{avg}(T_1,\ldots,T_N)}{Sa(T_1)} \quad (9)$$

Cuando N_p es menor a la unidad el espectro muestra una pendiente negativa, en cambio, cuando N_p es mayor a la unidad el espectro presenta una pendiente positiva, figura 3.

ISSN: 2594-1925

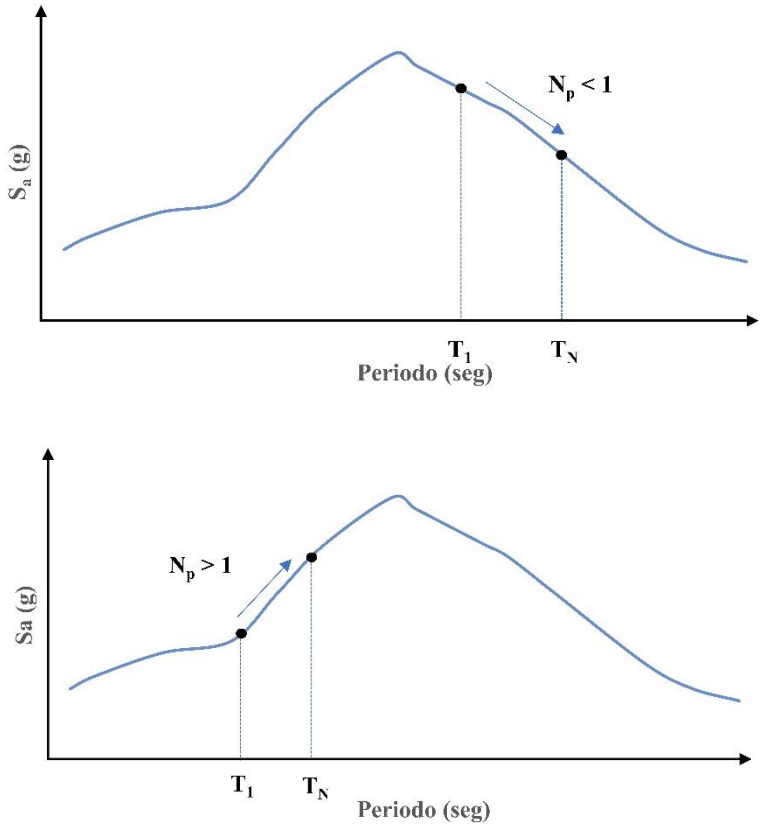


Figura 3. Comportamiento del espectro de respuesta.

3.4 Medida de intensidad I_{Np}

Las medidas de intensidad sísmica escalares Sa (T_1), AMS, VMS, DMS; las cuales son ampliamente aplicadas en la rama de la ingeniería sísmica presentan algunas limitaciones que reducen su eficiencia. Por lo anterior, Bojórquez y Iervolino [10] desarrollaron la medida de intensidad sísmica $I_{Np,}$ que incorpora la Sa(T_1), el parámetro de la forma espectral N_p, ecuación (10).

$$I_{Np}=Sa(T_1)N_p^{\alpha} \quad (10)$$

Donde:

- α Parámetro calibrado en función de la estructura y la demanda sísmica

De acuerdo con Bojórquez y Iervolino [10] el parámetro calibrado de α es aproximadamente igual a 0.4. I_{Np} se caracteriza por dos aspectos relevantes; cuando α es igual a cero, I_{Np} =Sa(T_1) y cuando α es igual a la unidad, I_{Np} = Sa_{avg} (T_1,…,T_N).

Diversos estudios [11], [12], [13], [14], [15], [16], han señalado que la medida de intensidad sísmica I_{Np} es una alternativa más eficiente al evaluar la intensidad de un evento sísmico que influye en el comportamiento sísmico de las estructuras.

ISSN: 2594-1925

3.5 Selección de registros sísmicos

México al ubicarse en el área conocida como cinturón de fuego es uno de los países que cuenta con mayor sismicidad Lo anterior permite disponer de una base de datos confiable para el presente estudio. Los resultados obtenidos de seudoaceleración e I_{Np} se estimaron para la base de datos seleccionada, considerando suelo duro de la Ciudad de México. La tabla 2 muestra la fecha de ocurrencia, magnitudes Mw y distancia R de los eventos sísmicos seleccionados de la base de datos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Tabla 2. Registros sísmicos

Registro	*Fecha*	*Magnitud (M_w)*	*Distancia (Km)*
1	23/08/1965	7.8	466
2	02/08/1968	7.4	326
3	19/03/1978	6.4	285
4	29/11/1978	7.8	414
5	14/03/1979	7.6	287
6	25/10/1981	7.3	330
7	07/06/1982	6.9	304
8	07/06/1982	7	303
9	19/09/1985	8.1	295
10	21/09/1985	7.6	318
11	30/04/1986	7	409
12	25/04/1989	6.9	290
13	31/05/1990	6.1	304
14	15/05/1993	6	320
15	24/10/1993	6.7	310
16	14/09/1995	7.3	320
17	09/10/1995	8	530
18	15/07/1996	6.6	301
19	19/07/1997	6.7	394
20	03/02/1998	6.3	509
21	09/08/2000	6.5	380
22	01/01/2004	6	323
23	20/03/2012	7.4	329
24	18/04/2014	7.2	304
25	08/05/2014	6.4	298

La ubicación geográfica del epicentro de los registros sísmicos se muestra en la figura 4.

ISSN: 2594-1925



Figura 4. Ubicación epicentral de eventos sísmicos

4. Resultados y discusión

Como resultado se obtuvieron los espectros de respuesta en función de la medida de intensidad sísmica I_{Np} y la base de datos mostrada en la tabla 2, considerando el suelo duro de la Ciudad de México. Se estimaron los parámetros de ajuste obtenidos a través del análisis de algoritmos genéticos. Lo anterior permitió analizar la eficiencia de la ecuación de movimiento propuesta (ecuación 1) mediante el contraste entre ambos resultados.

4.1 Espectros de respuesta basados en I_{Np}

Para cada registro sísmico de la tabla 2, se obtuvieron los espectros de respuesta I_{Np} a partir del espectro de Sa (T_1), para periodos estructurales desde 0.1 a 3 segundos, considerando que $T_N = 2\ T_{1\ y}$ valores de α desde 0 hasta 1. En la figura 5, se muestran los espectros de respuesta (ER) I_{Np} para los registros sísmicos S_{01}, S_{05} y S_{10} en función del parámetro α. Se demuestra que, cuando α=0, el espectro de respuesta de I_{Np} corresponde al espectro de Sa (T_1). Las ordenadas espectrales de I_{Np} tienden a disminuir en la medida en que aumenta el valor de α. Se presentan puntos de cruce; punto donde N_p alcanza valores próximos a la unidad.

ISSN: 2594-1925

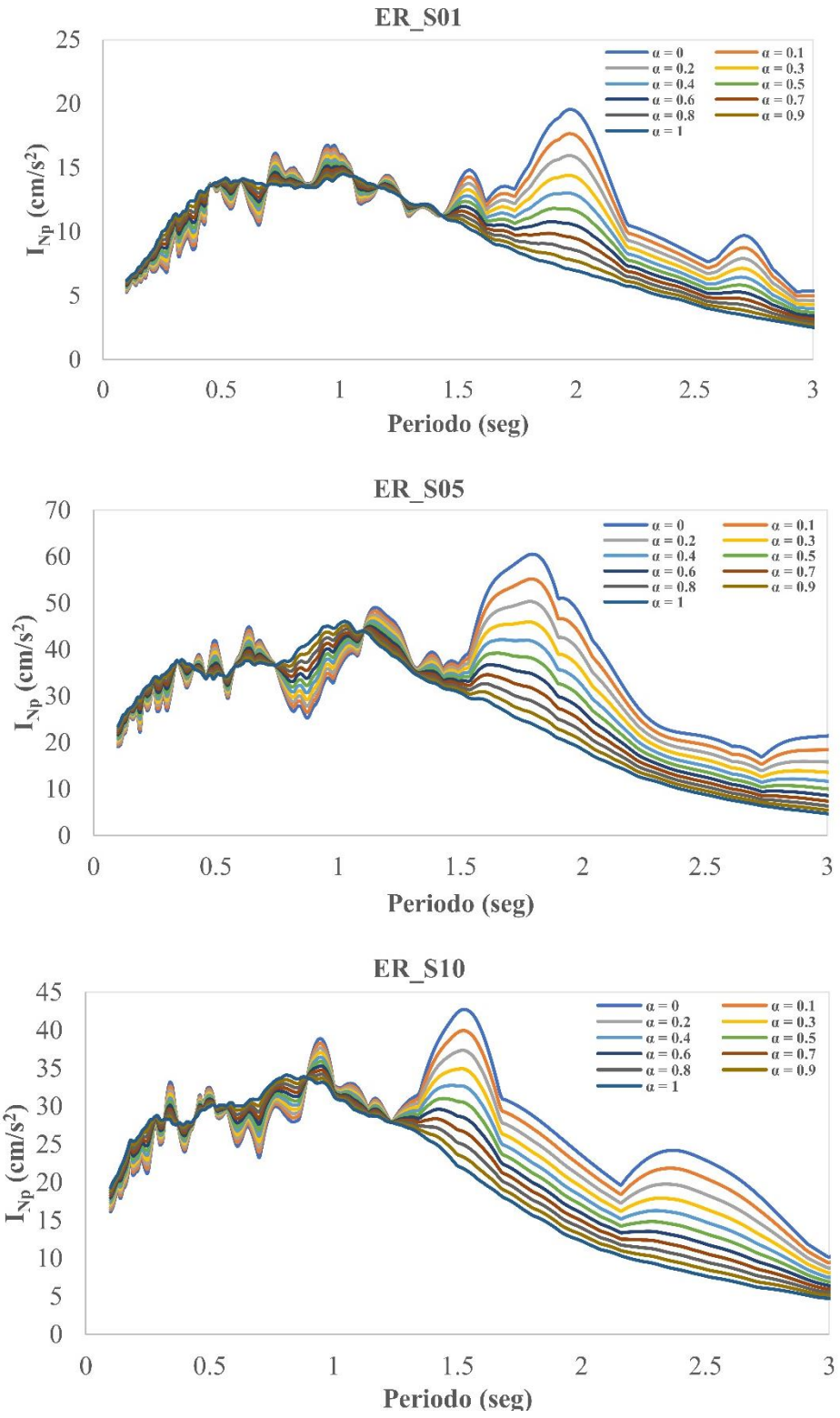


Figura 5. Espectros de Respuesta I_{Np} (ER_S01, ER_05, ER_10)

ISSN: 2594-1925

4.2 Valores de I_{Np} reales vs estimados

Para determinar los coeficientes de ajuste del modelo de predicción (ecuación 1), se aplicó la metodología basada en algoritmos genéticos, descrita brevemente antes. La ecuación 1, describe la relación entre el logaritmo de I_{Np} y las características principales de los eventos sísmicos: magnitud y distancia. Además, se considera el parámetro $\alpha = 0.4$, valor sugerido por Bojórquez y Iervolino [10] y Bojórquez et al 2012 [44]. Fueron seleccionados los valores de I_{Np} reales para compararlos con los valores estimados por la propuesta de atenuación sugerida, tomando en cuenta periodos estructurales de 0.1 a 3.0 segundos, en intervalos de 0.25 segundos. Este procedimiento se llevó a cabo con la finalidad de comprobar la eficiencia de los coeficientes estimados para la ley de atenuación. En la figura 6, se muestran los valores reales de I_{Np} frente a las estimaciones del modelo de atenuación; la comparación permite evaluar su precisión, evidenciando que la calibración de los coeficientes del modelo resulta adecuada para la mayoría de los registros sísmicos y los periodos estructurales seleccionados. En la tabla 3, se muestran los valores obtenidos de los coeficientes de ajuste de C_1 a C_5 para los periodos estructurales (T) de 0.1 a 3.0 segundos.

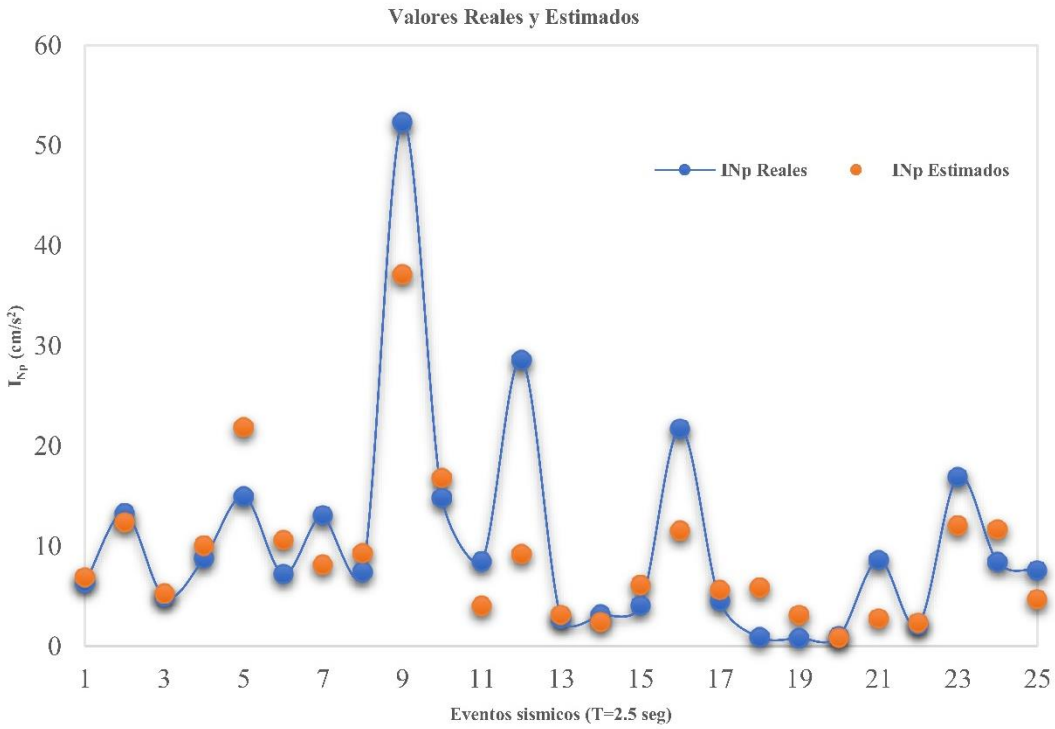


Figura 6A. Valores de I_{Np} reales vs estimados (T=2.5 seg.).

ISSN: 2594-1925

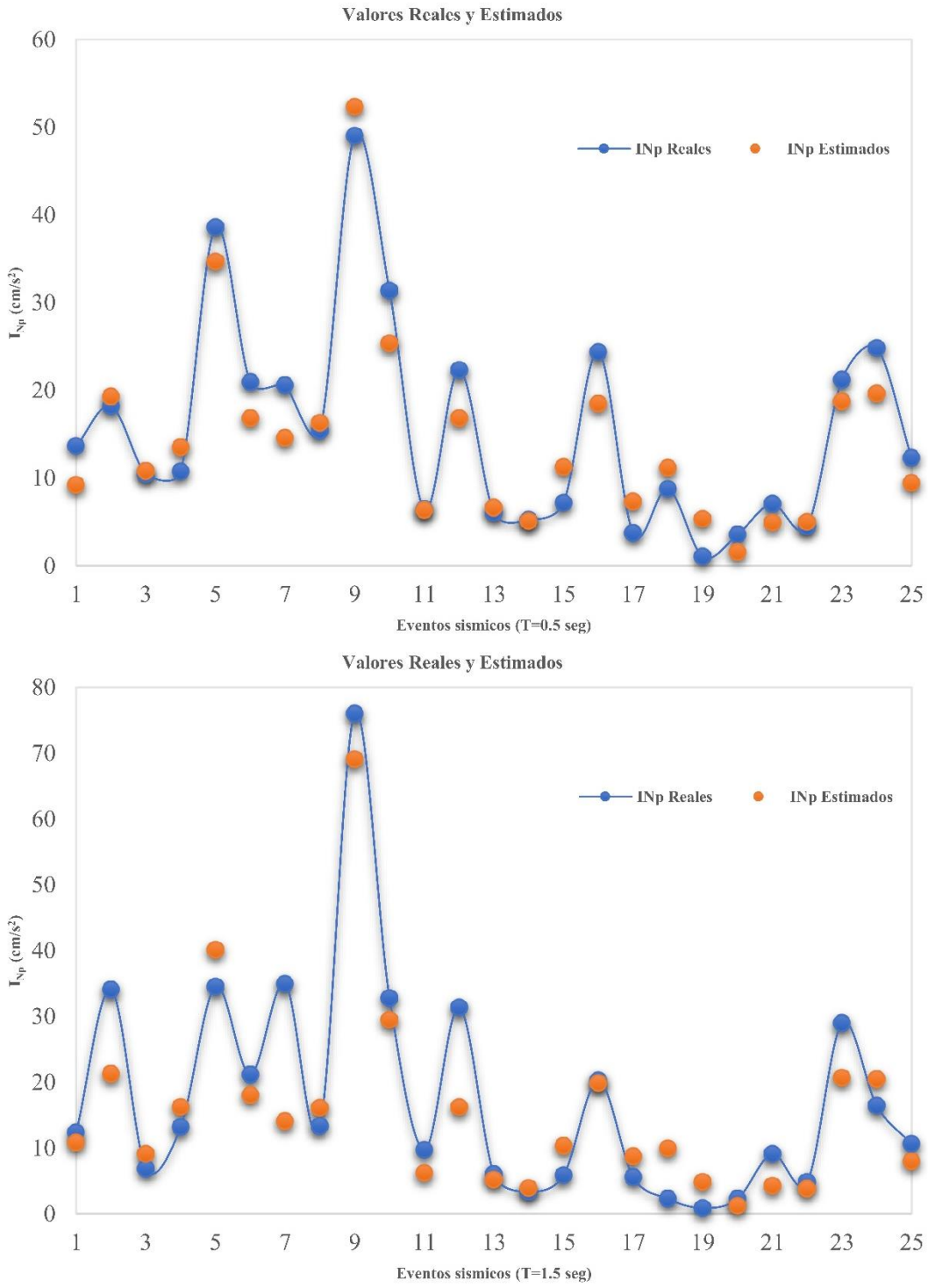


Figura 6B. Valores de I_{Np} reales vs estimados (T= 0.5 seg. y T= (1.5 seg.).

ISSN: 2594-1925

Tabla 3. Coeficientes de ajuste

T_n	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
0.1	7.8094	0.9099	-2.1533	-0.0037	3.8467
0.25	8.3171	0.9122	-2.6228	-0.0036	10.1505
0.5	9.9895	0.9875	-2.6382	-0.0014	3.4444
0.75	9.8564	1.0789	-2.6194	-0.0014	2.0616
1	8.9561	1.0724	-2.8378	-0.0007	7.1264
1.25	8.0912	1.1698	-2.6501	-0.0012	5.0501
1.5	8.0438	1.2502	-2.0885	-0.0031	-2.8864
1.75	7.7472	1.336	-1.9387	-0.0043	-4.8139
2	6.4762	1.3295	-1.3441	-0.0043	-10.6987
2.25	5.787	1.2421	-1.3344	-0.0036	-8.561
2.5	3.436	1.2002	-1.2038	-0.0045	-3.4078
2.75	3.3308	1.2627	-1.4507	-0.0041	-1.263
3	2.7357	1.2626	-1.4013	-0.0039	-0.9319

4.3 Espectros de respuesta de I_{Np} reales vs estimados

En general, la propuesta de la ecuación de movimiento presenta buen ajuste en un número considerable de los eventos sísmicos seleccionados. Como se observa en la figura 7, los espectros de respuesta estimado para los registros sísmicos RS_01, RS_05 y RS_10 presentan valores de ordenadas espectrales próximos a los reales. Es decir, a pesar de que en algunos registros sísmicos la forma espectral no logra con precisión la forma real, las ordenadas espectrales son satisfactorias en la mayoría de los eventos sísmicos interplaca.

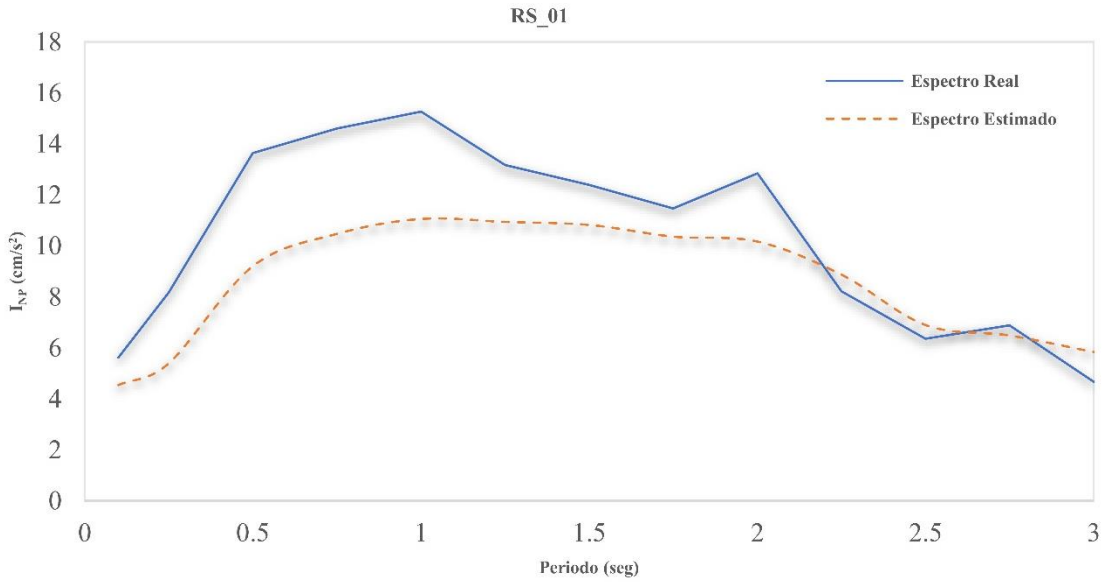


Figura 7A. Espectro de respuesta I_{Np} reales vs estimados (RS 01).

ISSN: 2594-1925

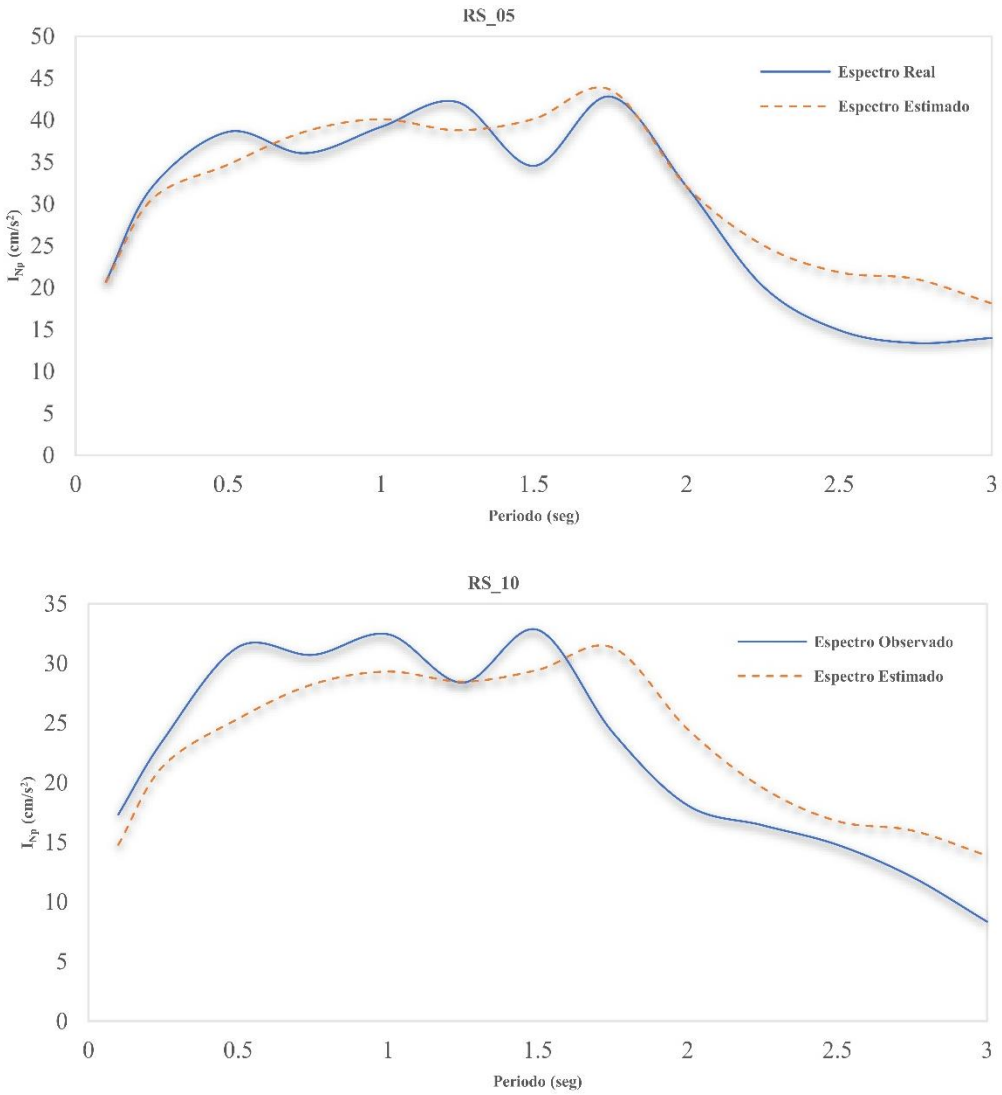


Figura 7B. Espectro de respuesta I_{Np} reales vs estimados (RS 05 y RS 10).

5. Conclusiones

Los espectros de respuesta I_{Np} para los eventos sísmicos interplaca registrados en suelo duro de la Ciudad de México cumplen las particularidades de I_{Np}; cuando $\alpha = 0$, I_{Np} coincide con el espectro de respuesta de seudoaceleración del periodo fundamental de vibración de la estructura. Mientras que, cuando $\alpha = 1$, el espectro de respuesta corresponde a la media geométrica $Sa_{ave}(T_1 \ldots T_N)$. De acuerdo con las ordenadas espectrales en los espectros de respuesta, podemos concluir que el parámetro α influye en el comportamiento estructural, dado que reduce significativamente las intensidades de I_{Np}. La ecuación del movimiento del suelo propuesta integra las principales variables que caracterizan el movimiento del suelo: magnitud, distancia epicentral y condiciones de sitio, logrando predicciones con alto grado de exactitud en un gran número de registros sísmicos. Al efectuar el análisis comparativo de los espectros de respuesta reales de I_{Np} y los estimados con el modelo de atenuación, ambos presentan formas espectrales semejantes. Finalmente, las desviaciones estándar del estudio oscilan entre 0.42 a 0.69; rangos similares publicados

ISSN: 2594-1925

por otros investigadores. Demostrando un nivel de dispersión aceptable para los periodos estructurales seleccionados.

6. Agradecimientos

El presente trabajo se desarrolló gracias al apoyo brindado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (*SECIHTI*) durante el transcurso de los estudios de posgrado del primer autor, así como mediante el proyecto Ciencia de Frontera CF-2023-G-1636.

7. Agradecimientos de autoría

Daniel Alonso Yee Morales: Conceptualización; Investigación; Metodología; Análisis formal; Borrador original. *Edén Bojórquez Mora*: Conceptualización; Ideas; Escritura; Revisión y edición; Administración de proyecto. *Juan Bojórquez Mora*: Análisis formal; Recursos; Validación; Revisión y edición. *Omar Jhovany Payan Serrano*: Ideas; Conceptualización; Revisión y edición. *Ali Abraham Rodríguez Castellanos*: Ideas; Conceptualización; Revisión y edición.

Referencias

[1] N. C. Donovan, *"Earthquake Hazards for Buildings,"* in Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Building Research Services 46, pp. 82-111, 1973.

[2] W. B. Joyner and D. M. Boore, "Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, No. 6, pp. 2011-2038, 1981. https://doi.org/10.3133/ofr81365

[3] D. M. Boore, W. B. Joyner and T. E. Fumal, "Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work," *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 128-153, 1997. https://doi.org/10.1785/gssrl.76.3.368

[4] L. Esteva and R Villaverde, "Seismic risk, design spectra and structural reliability*," Proc. 5th World Conf. Earthquake Eng*., Rome, Italy, 1973, pp.2586-2597.

[5] J. Carballo, "Estudio de riesgo sísmico para Chílpancingo," Tesis de Maestría. DEPFI, UNAM. Ciudad de México, México, 1994.

[6] J. D. García, "Estimación de parámetros del movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México Central," Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2006.

[7] M.A. Jaimes and A. D. García-Soto. "Updated ground motion prediction model for Mexican intermediate-depth intraslab earthquakes including V/H ratios," *Earthquake Spectra*, vol. 36, No. 3, pp. 1298-1330, 2020. https://doi.org/10.1177/8755293019899947

[8] G. P. Villalobos-Escobar et al. "Empirical Ground-Motion Relations in Northeastern México from intraplate moderate earthquakes," *Journal of Earthquake Engineering, vol.* 27, No. 3, pp. 769-786, 2023. https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2033363

[9] P. P. Cordova, G. G. Deierlein, S. S. Mehanny, and C.A. Cornell, "Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure," in *the second US-Japan workshop on performance-based earthquake engineering methodology for reinforced concrete building structures*, 2000, pp. 187–206. Disponible: https://apps.peer.berkeley.edu/research/peertestbeds/Cct/Cordova%20et%20al%202001.pdf

[10] E. Bojórquez and I. Iervolino, "Spectral shape proxies and non-linear structural response," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, No. 7, pp. 996– 1008, 2011. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.03.006

[11] N. Buratti, "Confronto tra le performance di diverse misure di intensitá dello scuotimento sísmico," *Congreso Nacional de Ingeniería de Italia* (ANIDIS), Bari, Italia, 2011.

[12] N. Buratti, "A comparison of the performances of various ground-motion intensity measures," *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, Sep. 24-28, 2012, paper No. 5499. Disponible: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5499.pdf

ISSN: 2594-1925

[13] A. Modica and P. J, Stafford, "Vector fragility surfaces for reinforced concrete frames in Europe," *Bull Earthquake Eng.*, vol. 12, pp. 1725–1753, 2014. https://doi.org/10.1007/s10518-013-9571-z

[14] E. Javadi and M. Yakhchalian. "Selection of Optimal Intensity Measure for Seismic Assessment of Steel Buckling Restrained Braced Frames under Near-Fault Ground Motions," *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, vol. 7, No. 4, pp. 114-113, 2019. https://doi: 10.22075/jrce.2018.14908.1278

[15] N. Zavala et al., "Vector-Valued Intensity Measures Based on Spectral Shape to Predict Seismic Fragility Surfaces in Reinforced Concrete Buildings," *Buildings*, vol. 13, No. 1, Art. No. 137, 2023. https://doi.org/10.3390/buildings13010137

[16] J. Carvajal et al. "Comparing hysteretic energy and ductility uniform annual failure rate spectra for traditional and a spectral shape-based intensity measure," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2021, Art. No. 2601087, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/2601087

[17] K. W. Campbell, "Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration," *Bull. Seism. Soc. Amer.*, Vol. 71, No. 6, pp. 2039-2070, 1981. https://doi.org/10.1785/BSSA0710062039

[18] O. W. Nuttli, and R. B. Herrmann, "Consequences of Earthquakes in Mississippi Valley," ASCE Preprint 81-519, ASCE National Convention, St. Louis, MO, USA, 1981.

[19] K. W. Campbell and Y. Bozorgnia, "Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration from Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993," *Proc. 5th U.S. National Conf. Earthquake Eng.*, Vol. 3, Chicago, IL, USA, 1994, pp. 283-292.

[20] M. Bufaliza, "Atenuación de intensidades sísmicas con la distancia en sismos mexicanos," Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería UNAM, Ciudad de México, México, 1984.

[21] M, Ordaz, J. M. Jara, y S. K. Singh, "Riesgo sísmico y espectros de diseño en el Estado de Guerrero," *Mem. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco, México, 1989, pp. D40–D56.

[22] N.A. Abrahamson and W.J. Silva, "Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes," *Seismological Research Letters*, vol. 68, No. 1, pp. 94-127, 1997. https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.94

[23] J. M. Jara y A. R. Sánchez. "Estimación de Riesgo Sísmico de Morelia," *Revista de la coordinación científica de UMNSH*. No. 29, 2001.

[24] Q. Rodríguez-Pérez, "Ground-Motion Prediction Equations for Near-Trench Interplate and Normal-Faulting Inslab Subduction Zone Earthquakes in México," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 104, No. 1, pp. 427-438, 2014. https://doi.org/10.1785/0120130032

[25] M. A. Jaimes, A. Ramirez-Gaytán and E. Reinoso, "Ground-Motion Prediction Model From Intermediate-Depth Intraslab Earthquakes at the Hill and Lake-Bed Zones of México City," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 19, No. 8, pp. 1260-1278, 2015. https://doi.org/10.1080/13632469.2015.1025926

[26] M.A. Jaimes, J. Lermo, and A. D. García-Soto, "Ground-motion prediction model from local earthquakes of the México basin at the hill zone of México City," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 106, No.6, pp. 2532-2544, 2016. https://doi.org/10.1785/0120150283

[27] E. Bojórquez, S.E. Ruiz, A. Rodríguez-Castellanos, M. A. Orellana, A. Reyes-Salazar, and J. Bojórquez. "Bayesian analysis-based ground motion prediction equations for earthquake input energy," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 173, Art. No. 108115, 2023. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108115

[28] S. S. Mehanny, "A broad-range power-law form scalar-based seismic intensity measure," *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 7, pp. 1354–1368, 2009. doi: 10.1016/j.engstruct.2007.07.009, 2009. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.003

[29] J.W. Baker and C.A. Cornell, "A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and épsilon," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 34, No. 10, pp. 1193-1217, 2005. https://doi.org/10.1002/eqe.474

[30] P. Tothong and N. Luco, "Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 36, No. 13**,** pp. 1837-1860, 2007. https://doi.org/10.1002/eqe.696

[31] D. M. Boore, W. B. Joyner, and T. E. Fumal, "*Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: an interim report,"* U.S. Geol. Open-file Report, 93-509, 1993. https://doi.org/10.3133/ofr93509

[32] N. R. Draper and H. Smith. Applied Regression Analysis. New York, NY, USA: John Wiley and Sons, 1966, pp. 505-566, 1966.

[33] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI, USA: University of Michigan Press, 1975.

[34] K. Deb and D. Deb, "Analyzing mutation schemes for Real-Parameter Genetic Algorithms," *International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing*, vol. 4, No. 1, pp. 01-28, 2014. https://doi.org/10.1504/IJAISC.2014.059280

ISSN: 2594-1925

[35] K. Deb and S. Agrawal, "A niched-penalty approach for constraint handling in genetic algorithms," *In Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Networks and Gegenetic algorithms*. In Parallel Problem Solving from Nature (PPSN-VI), pages 365–374, 2000.
[36] B. Tavakoli and S. Pezeshk, "Empirical-stochastic ground-motion prediction for eastern north America," *Bull. Seismol. Soc. Amer*., vol. 95, No. 6, pp. 2283-2296, 2005. https://doi.org/10.1785/0120050030
[37] F. Scherbaum, F. Cotton, and H. Staedtke. "The estimation of minimum-misfit stochastic models from empirical ground-motion prediction equations". *Bull. Seismol. Soc. Amer*., vol. 96, No. 2, pp. 427-445, 2006. https://doi.org/10.1785/0120050015
[38] W. Y. Jean, Y. W. Chang, K. L. Wen, and C. H. Loh, "Early Estimation of Seismic Hazard for Strong Earthquakes in Taiwan," *Natural Hazard*, vol. 37, pp. 39-53, 2006. https://doi.org/10.1007/s11069-005-4655-y
[39] G. W. Housner, "Spectrum intensities of strong motion earthquakes," *earthquake Engineering Research*, 1952. Disponible: https://authors.library.caltech.edu/records/x3jjd-y5366
[40] A. Arias, "A measure of earthquake intensity," in *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, R. J. Hansen, Ed. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1970, pp. 438–483.
[41] Y. Park , A. Ang, and Y. Wen, "Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings," J Struct Eng, vol. 111, No. 4, 1985. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(740)
[42] E. Bojórquez, L. Astorga, A. Reyes-Salaz, A. Teran-Gilmore and J. Velazquez, "Prediction of hysteretic energy demands in steel frames using vector-valued IMs," *Steel and Composite Structures*, vol. 19, No. 3, pp. 697-711, 2015. https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.3.697
[43] E. Bojórquez, I. Iervolino, and G. Manfredi, "Evaluating a New Proxy For Spectral Shape To Be Used As An Intensity Measure," *Seismic Engineering Conference. AIP Conference Proceedings*, vol. 1020, No. 1, pp. 1599-1606, 2008. https://doi.org/10.1063/1.2963788
[44] E. Bojórquez, I. lervolino, A. Reyes-Salazar, H. Rodríguez Lozoya, and L. Rivera Salas. "Una medida de intensidad sísmica basada en un parámetro para caracterizar la forma espectral NP," *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 86. pp. 01–26, 2012. https://doi.org/10.18867/ris.86.151

Derechos de Autor (c) 2026 Daniel Alonso Yee Morales, Edén Bojórquez Mora, Juan Bojórquez Mora, Ali Abraham Rodríguez Castellanos, Omar Jhovany Payan Serrano

Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0.

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y adaptar el documento — remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Resumen de licencia - Texto completo de la licencia

ISSN: 2594-1925