



## Zonificación sísmica para determinar la estimación de coeficientes de amplificación de sitio en capital de Managua (Nicaragua), según la legislación vigente.

Seismic zoning to determine the estimation of site amplification coefficients in the capital of Managua (Nicaragua), according to current legislation.

Maycol Rugama Idiáquez<sup>1,2</sup>, Max Miguel Fariñas Pérez<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>ORCID 0009-0005-4617-6268, [maycol.rugama@mti.gob.ni](mailto:maycol.rugama@mti.gob.ni), [maycol.rugama@gaussingenieros.com](mailto:maycol.rugama@gaussingenieros.com)

<sup>3</sup>ORCID 0000-0001-8988-3492, [mfarinas@unan.edu.ni](mailto:mfarinas@unan.edu.ni)

<sup>1</sup>Ministerio de Transporte e Infraestructura, Dirección de Normas de la Construcción, Managua.

<sup>2</sup>GAUSS Ingenieros Consultores S.A.

<sup>3</sup>Docente. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua, Managua, 663.

### Resumen

El presente estudio, aborda la estimación de los coeficientes de sitio y las formas espectrales asociadas a los diferentes tipos de suelos presentes de la Capital de Managua, Nicaragua. Se emplearon tres métodos de análisis del comportamiento del suelo: Lineal Equivalente (EQL), Lineal Equivalente Dependiente de Frecuencia (EQL-FD) y No Lineal Híbrido Hiperbólico (NL-HH). El enfoque principal consistió en modelar las curvas de amplificación RRS con el propósito de estimar los coeficientes de sitio  $F_a$  y  $F_v$ , los cuales están relacionados con la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$ . Los resultados fueron agrupados, y se identificaron correlaciones empíricas específicas para los suelos de clases C y D. Estas correlaciones permiten estimar los factores de amplificación  $F_a$  y  $F_v$  en función de la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$  para la zona de estudio. Este análisis contribuye significativamente a la comprensión de la respuesta sísmica de los suelos en Managua proporcionando herramientas prácticas para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en la región.

**Palabras clave:** Amplificación de sitio, coeficientes de sitio, formas espectrales, respuesta sísmica del suelo, correlaciones empíricas.

### Abstract

The present study addresses the estimation of site coefficients and spectral shapes associated with the different soil types found in the capital city of Managua, Nicaragua. Three methods were employed to analyze soil behavior: Equivalent Linear (EQL), Frequency-Dependent Equivalent Linear (EQL-FD), and Hybrid Hyperbolic Nonlinear (NL-HH). The primary focus was on modeling the RRS amplification curves to estimate the site coefficients  $F_a$  and  $F_v$ , which are related to the shear wave velocity,  $V_{s30}$ . The results were grouped, and specific empirical correlations were identified for soils classified as C and D. These correlations enable the estimation of amplification factors  $F_a$  and  $F_v$  based on the shear wave velocity,  $V_{s30}$ , for the study area. This analysis significantly contributes to understanding the seismic response of soils in Managua, providing practical tools for assessing seismic vulnerability in the region.

**Keywords:** Site amplification, site coefficients, spectral shapes, soil seismic response, empirical correlations.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Managua, capital de Nicaragua, ha experimentado a lo largo de la historia una significativa actividad sísmica, principalmente atribuible a la interacción tectónica entre las placas de Cocos y Caribe. Investigaciones han destacado la importancia de la zonificación para evaluar el fallamiento superficial en la generación de nuevos eventos sísmicos en esta región (Bermúdez, 2014; Carvalho et al., 2016; Schmoll, 1975). El Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2020), frente a la amenaza de costos económicos y sociales potencialmente paralizantes asociados a eventos catastróficos, se destaca la necesidad de adoptar estrategias que reduzcan los riesgos y preparen las finanzas gubernamentales para enfrentar tales contingencias. En este contexto, el estudio de Romero et al., (2011) enfatiza que el ordenamiento territorial se presenta como una herramienta fundamental para abordar la dimensión espacial de los riesgos y catástrofes, permitiendo anticipar, enfrentar y reconstruir en la geografía cotidiana de las comunidades locales. La relación espacial entre amenazas y vulnerabilidades se vuelve evidente, destacando que los desastres ocurren con mayor frecuencia en áreas donde los niveles de amenazas se superponen con debilidades sociales e institucionales más pronunciadas. Este enfoque geográfico propone una reflexión crucial sobre la complejidad holística que deben tener los estudios de desastres naturales (CEPREDENAC, 2006).

Desde esta perspectiva, la amplificación sísmica de los suelos emerge como uno de los parámetros primordiales en la evaluación de la aceleración en superficie, desempeñando un papel fundamental en el diseño

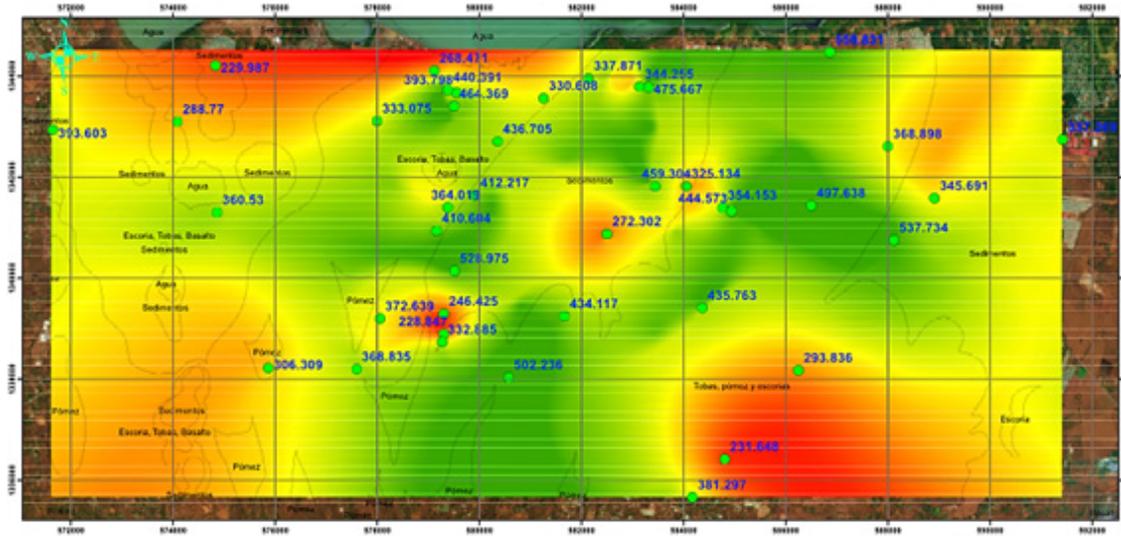
sísmico de estructuras. La presente investigación se propone ofrecer una estimación detallada de los coeficientes de sitio y sus correspondientes formas espectrales asociadas en los suelos de la ciudad de Managua. Para llevar a cabo el análisis de respuesta del suelo, se emplearon métodos variados, tales como el Lineal Equivalente (EQL), el Lineal Equivalente Dependiente de Frecuencia (EQL-FD), y el No Lineal Híbrido Hiperbólico (NL-HH). En particular, se enfocó en el modelamiento de curvas de amplificación o curvas RRS para la determinación de los coeficientes de sitio  $F_a$  (0.1-0.5 s) y  $F_v$  (0.4-2.0 s) según la velocidad de onda de corte  $V_{s30}$ . En última instancia, mediante el análisis y agrupación de los resultados, se derivaron correlaciones empíricas para los valores  $F_a$  y  $F_v$  en suelos de clase C y D, permitiendo estimaciones precisas de ambos factores de amplificación en función de  $V_{s30}$  para el área de estudio.

## 2. METODOLOGÍA

Se empleó una metodología integral para analizar la respuesta sísmica del suelo en la ciudad de Managua, Nicaragua, utilizando varios métodos basado del estudio realizado por Finn, (1991); Sánchez et al., (1988), Schnabel et al., (1972). Incluyen, el Método Lineal Equivalente (EQL), el Método Lineal Equivalente Frecuencia-Dependiente (EQL-FD), el Método No Lineal en Dominio de Tiempo (NL), el Amortiguamiento Histórico, el Modelo Híbrido Hiperbólico (NL-HH), y el Método de Espectro Condicional Objetivo (CTS). En la figura 1, se seleccionaron sitios de interés, distribuidos en el área urbana de Managua.

**Figura 1**

Distribución de velocidad de corte promedio hasta 30 metros de profundidad en Managua.



A continuación, se detallan los procedimientos seguidos en cada uno de los métodos Clough, R. W., & Penzien, J. (1975); Chopra, A. K. (2012); Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2002) y Miranda, E., & Bertero, V. V. (1994). Se enumeran de la siguiente forma:

#### 1. Método Lineal Equivalente (EQL):

**a. Selección de Curvas de Rigidez y Amortiguamiento:** Se eligen curvas de rigidez y amortiguamiento para cada estrato del modelo de suelo, basándose en relaciones previas entre el módulo de rigidez reducido ( $G$ ) y el factor de amortiguamiento ( $\xi$ ) en función del porcentaje de deformación.

**b. Asignación Inicial de Parámetros:** Se asignan valores iniciales de  $G$  y  $\xi$  para cada estrato mediante lecturas iniciales en las curvas correspondientes.

**c. Análisis Lineal Equivalente:** Se lleva a cabo un análisis lineal equivalente para respuesta de sitio, siguiendo los pasos establecidos en la metodología, con el objetivo de determinar la amplificación sísmica en función del tiempo.

#### 2. Método Lineal Equivalente Frecuencia-Dependiente (EQL-FD):

**a. Reformulación de Parámetros:** Se reformulan el módulo de reducción y el amortiguamiento considerando su dependencia de la frecuencia para mejorar la estimación de amplitudes de alta frecuencia.

**b. Representación del Espectro de Deformación:** Se representa el espectro de deformación suavizado en función de la frecuencia, considerando una ecuación que ajusta las amplitudes en diferentes rangos.

#### 3. Método No Lineal en Dominio de Tiempo (NL):

**a. Formulación de la Ecuación Diferencial:** Se parte de la solución de la ecuación diferencial de segundo orden no homogénea, describiendo la respuesta no lineal del suelo.

**b. Discretización del Suelo:** Se discretiza la columna de suelo en estratos individuales usando un sistema de múltiples grados de libertad.

**c. Resolución Numérica:** La ecuación diferencial se resuelve de forma numérica mediante el método beta de Newmark, considerando un modelo hiperbólico para la respuesta esquelética.

#### 4. Amortiguamiento Histórico:

**a. Definición del Modelo Hiperbólico:** Se define el modelo hiperbólico para la relación esfuerzo-deformación durante la carga y carga-recarga, considerando la dependencia del módulo de la presión de confinamiento.

**b. Parámetros del Modelo:** Se determinan los parámetros del modelo hiperbólico, como el módulo de rigidez máximo ( $G_{\max}$ ), el factor adimensional ( $\beta$ ), el término exponencial adimensional ( $s$ ), y otros parámetros según la formulación propuesta.

#### 5. Modelo Híbrido Hiperbólico (NL-HH):

**a. Formulación del Modelo Híbrido:** Se implementa el modelo híbrido hiperbólico (NL-HH), que combina la formulación existente para pequeñas deformaciones.

**b. Representación de Esfuerzos para Pequeñas Deformaciones:** Se utiliza la ecuación que define la relación esfuerzo-deformación para pequeñas deformaciones en el modelo híbrido.

**c. Combinación Ponderada de Modelos:** Se introduce una combinación ponderada de modelos hiperbólicos para representar la respuesta no lineal en un amplio rango de frecuencias.

#### 6. Método de Espectro Condicional Objetivo (CTS) para Selección de Registros de Entrada:

**a. Definición del Espectro Objetivo:** Se establece un espectro objetivo condicional que represente las condiciones sísmo-tectónicas del área de estudio.

**b. Cálculo de Errores al Cuadrado:** Se calcula la suma de errores al cuadrado a partir de los logaritmos naturales de las amplitudes espectrales para cada periodo estructural considerado.

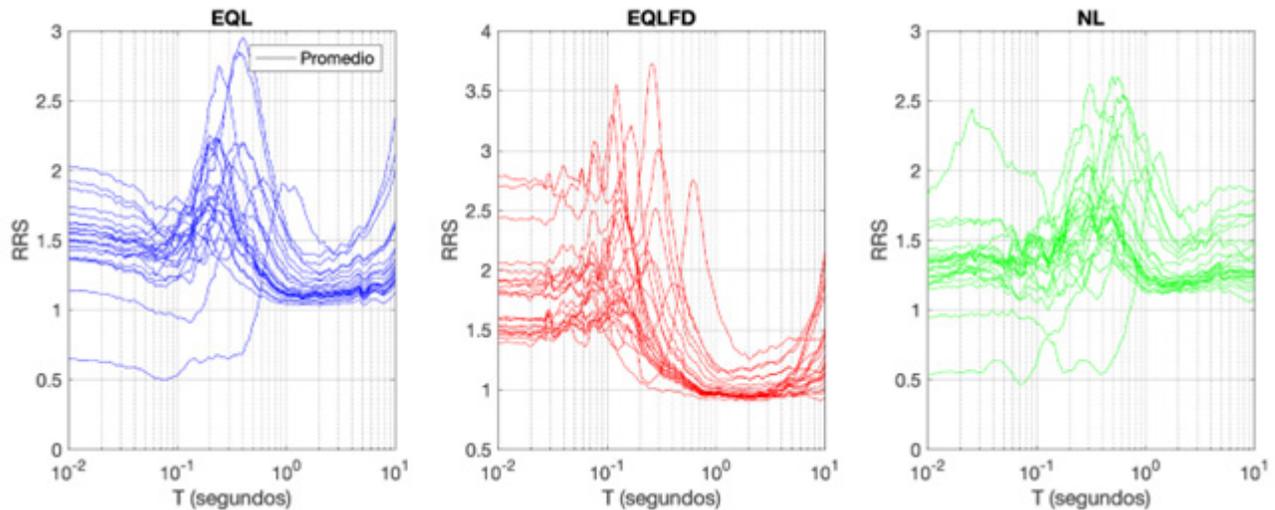
**c. Ajuste de Registros de Entrada:** Se utiliza el método para seleccionar registros de entrada cuya forma espectral promedio se ajuste al espectro objetivo, permitiendo una representación fiel de las condiciones sísmicas en la zona de estudio.

La implementación de estos métodos se lleva a cabo mediante herramientas de programación, considerando algoritmos específicos para cada fase del análisis. La validez y robustez de la metodología se evalúan mediante comparaciones con registros sísmicos reales y análisis de sensibilidad.

### 3. RESULTADOS

A través de la evaluación de 20 registros acelerográficos y la consideración de 4 combinaciones de curvas dinámicas, se han obtenido Respuestas de Transferencia Espectral Promedio (RRS) que ofrecen una visión detallada de la respuesta del suelo ante eventos sísmicos. En la Figura 2, se presenta la agrupación de los RRS promedios derivados de los distintos métodos y combinaciones analizadas. Para el Método EQL, se destaca que las máximas amplificaciones se manifiestan en el rango de 0.2 a 0.4 segundos, con amplitudes variando entre 1.7 y 2.9. En contraste, el Método EQL-FD exhibe mayores amplitudes concentradas en periodos más cortos, específicamente entre 0.1 y 0.2 segundos, alcanzando valores superiores a 3.5 veces la aceleración de la base. Este desplazamiento en los periodos de máxima amplificación sugiere una sensibilidad a frecuencias más altas mediante el enfoque frecuencia-dependiente. Por otro lado, el Método No Lineal revela que las máximas amplitudes tienden a ser más moderadas que en los métodos anteriores. Estas se ubican entre 0.4 y 0.7 segundos, asociadas a la respuesta no lineal del

**Figura 2**  
Curvas RRS para 23 sitios modelados con 3 métodos de análisis.



suelo, influida por altas aceleraciones espectrales cercanas a 0.5 g. Este hallazgo indica que la no-linealidad juega un papel crucial en la respuesta sísmica de Managua, influenciando la distribución de amplitudes en intervalos de periodo específicos.

Al examinar los factores de amplificación (Fa y Fv) determinados a partir de los Ratios de Respuesta Espectral (RRS), se observa una notable variación en los resultados. La Figura 3 presenta la agrupación de los valores estimados, y a partir de estos datos se ha llevado a cabo un análisis detallado.

Los modelos de regresión Fa y Fv se han derivado en función de la velocidad de corte Vs30, proporcionando una perspectiva valiosa sobre la relación entre las características del suelo y la amplificación sísmica. Los resultados revelan una estabilidad destacada en los factores Fv, con coeficientes de ajuste R2 que oscilan entre 0.35 y 0.63 para los tres métodos analizados. Esta consistencia sugiere una respuesta más uniforme a lo largo de diferentes periodos sísmicos, indicando una mayor previsibilidad

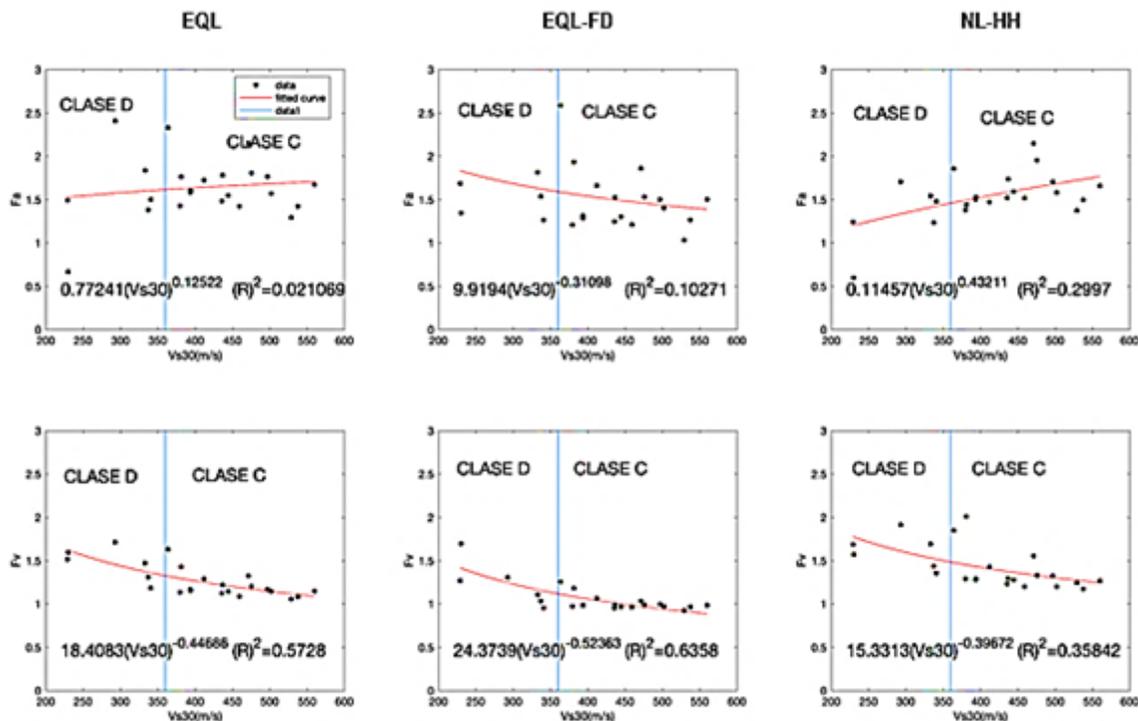
en la amplificación de ondas para periodos largos en la ciudad.

En contraste, los factores Fa exhiben una dispersión más significativa, subrayando la influencia de los periodos cortos (entre 0.1 y 0.5 segundos) en la generación de amplificaciones considerables. Este comportamiento disímil resalta la importancia crítica de las condiciones específicas del suelo en Managua, donde las propiedades del subsuelo tienen un impacto significativo en la respuesta sísmica, especialmente en periodos más cortos.

Las Figuras 4, 5 y 6, se exhiben detalladamente los espectros de diseño generados mediante tres normativas distintas: la normativa americana ASCE07, el reglamento nacional de la construcción para Nicaragua RNC-07, y una propuesta innovadora basada en la reciente normativa sismo-resistente NSR2020. Este análisis se ha llevado a cabo específicamente para suelos clasificados como clase C y D, considerando dos valores representativos de velocidad de onda de corte (Vs30): 550 m/s y 220 m/s, respectivamente.

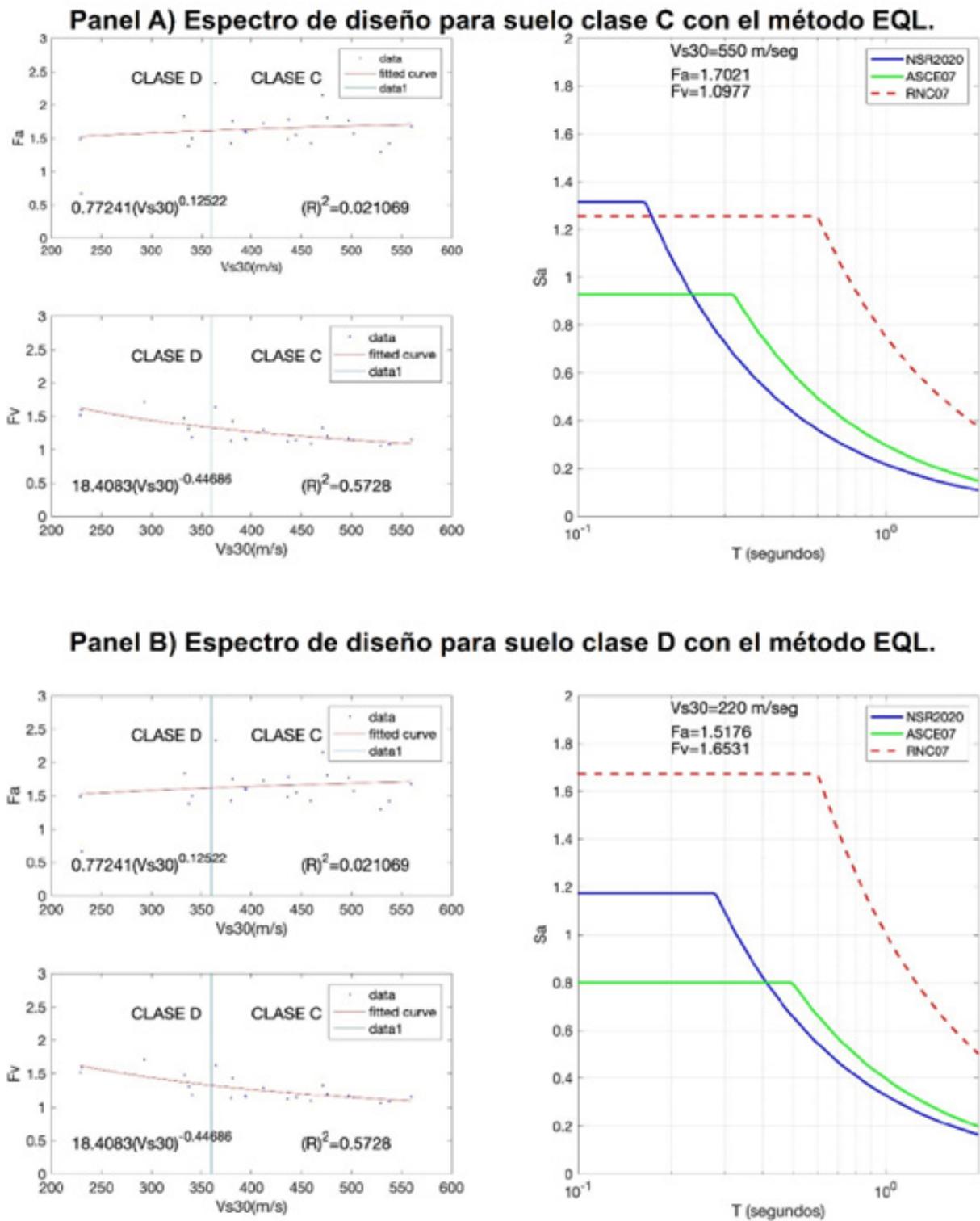
**Figura 3**

Análisis de regresión para estimación de función Fa y Fv para suelos clases C y D. Se aprecia claramente que el método no lineal híbrido hiperbólico muestra una reducción en los niveles de amplificación lo cual se explica por su capacidad de reproducir mejor la disipación de energía de deformación del suelo especialmente en grandes deformaciones, dado el caso evaluado para valores de PGA en el orden de 0.5 g.



**Figura 4**

Se presentan los espectros de diseño correspondientes al Método Lineal Equivalente (EQL), las amplitudes varían en 1.7 y 2.9 veces la aceleración de entrada. Este rango corresponde a las frecuencias fundamentales de suelos intermedios, donde la amplificación es considerable pero limitada por las asunciones lineales equivalentes del modelo. Estas frecuencias suelen estar asociadas con edificios de baja a mediana altura.



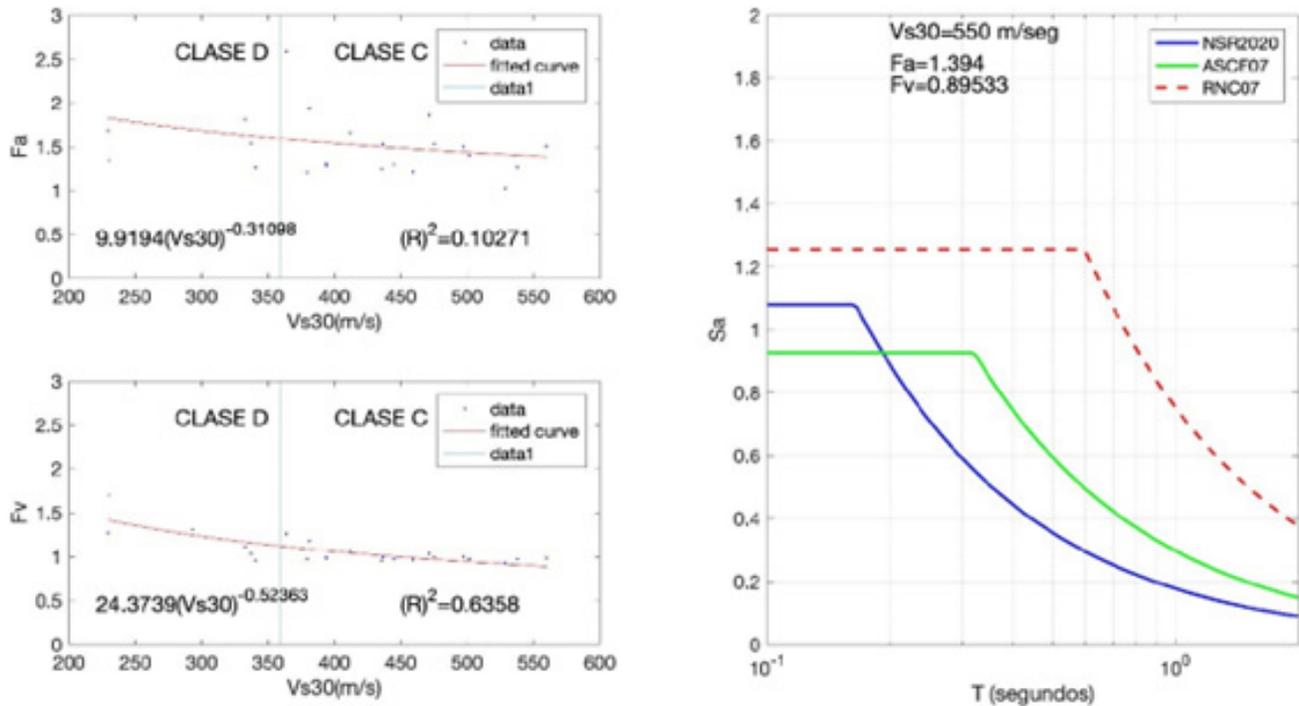
Al observar detalladamente las figuras, se evidencian las variaciones significativas en los espectros de diseño generados por cada normativa y método de análisis. Este análisis comparativo ofrece una perspectiva valiosa sobre cómo las diferentes aproximaciones y normativas influyen en la estimación de los niveles de amenaza sísmica para suelos de dife-

rentes características. Dichos resultados contribuyen significativamente al entendimiento y la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en la región estudiada, proporcionando información crucial para el diseño y la planificación de estructuras resilientes frente a eventos sísmicos.

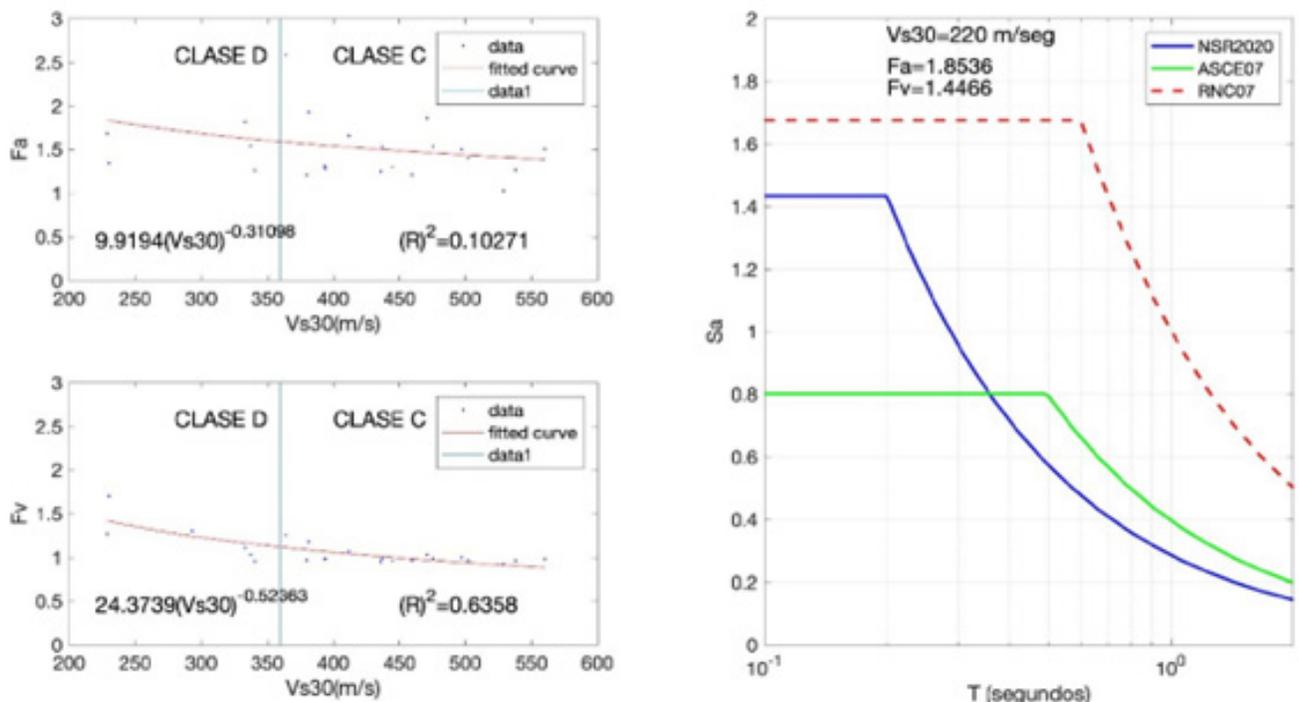
**Figura 5**

Se presentan los espectros de diseño correspondientes al Método Lineal Equivalente frecuencia dependiente (EQL-FD), las amplitudes superiores es 3.5 veces la aceleración de entrada. Este método introduce una dependencia de la frecuencia que refleja un comportamiento más ajustado al espectro real del suelo. Las altas amplificaciones en periodos cortos (frecuencias altas) podrían estar asociadas a estructuras rígidas o cortas. Este desplazamiento hacia periodos más bajos podría indicar una mayor influencia del material superficial y su respuesta dinámica.

**Panel A) Espectro de diseño para suelo clase C con el método EQL-FD.**



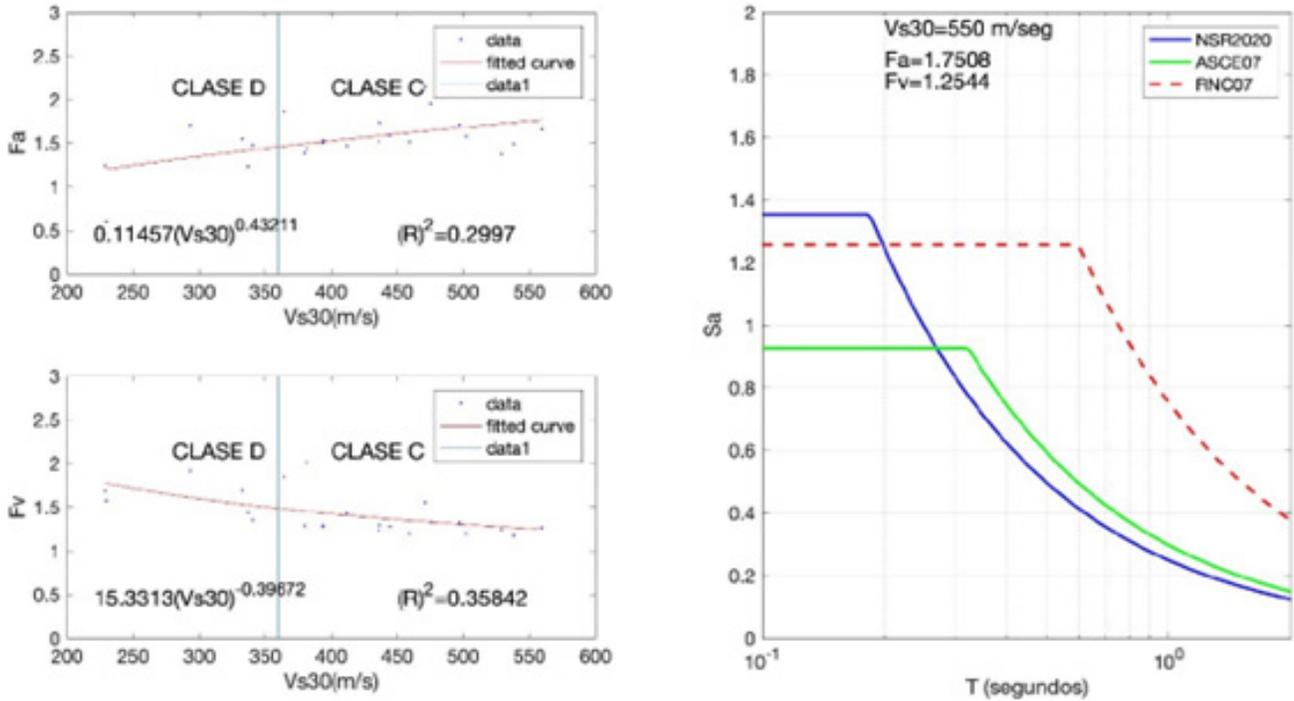
**Panel B) Espectro de diseño para suelo clase D con el método EQL-FD.**



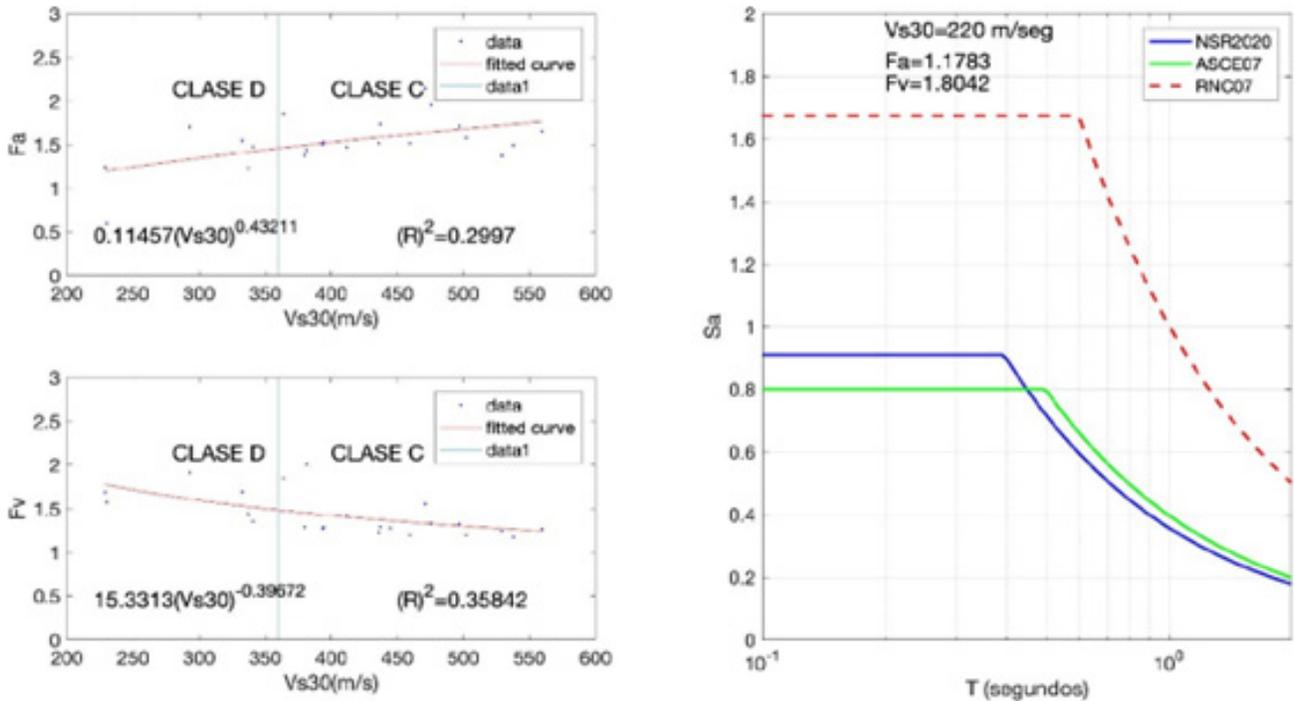
**Figura 6**

Se presentan los espectros de diseño correspondientes al Método no lineal en el dominio del tiempo (NL-HH), con amplitudes moderadas que los métodos anteriores. Este método refleja mejor la no-linealidad del suelo en presencia de altas aceleraciones, lo que reduce las amplificaciones extremas, pero desplaza el rango de máxima respuesta hacia periodos más largos. Esto sugiere un amortiguamiento significativo en las capas más blandas y un control dinámico más realista de la interacción suelo-estructura.

**Panel A) Espectro de diseño para suelo clase C con el método NL-HH.**



**Panel B) Espectro de diseño para suelo clase D con el método NL-HH.**



#### 4. CONCLUSIONES

En conclusión, este estudio resalta la significativa variabilidad en los resultados del análisis de respuesta sísmica de sitio, influenciada por diversos factores, como el método de análisis empleado. Es evidente que el enfoque numérico de los métodos desempeña un papel crucial en la captura del comportamiento del amortiguamiento, y las formulaciones matemáticas que modelan las propiedades no lineales del suelo también contribuyen a la variabilidad observada. En particular, el método no lineal híbrido hiperbólico demuestra ser eficaz para capturar grandes deformaciones en los suelos bajo altas aceleraciones sísmicas. Se destaca que los coeficientes de amplificación se ven directamente afectados por estas deformaciones, y la amplificación disminuye debido a la disipación energética asociada. Se recomienda la consideración de diversos escenarios de valores de PGA para evaluar de manera exhaustiva el comportamiento de los suelos y sus correspondientes coeficientes de amplificación. En perspectiva de la formulación de normativas, se subraya la necesidad de realizar estudios adicionales de caracterización del suelo mediante métodos geofísicos, especialmente para validar las velocidades de ondas de corte a los 30 metros. Esta información permitirá una mejor discretización del suelo, mejorando la aproximación a su comportamiento y contribuyendo así a la formulación de normativas más precisas y adaptadas a las condiciones específicas del sitio.

#### 5. REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo. (2010). Indicadores de Riesgo de Desastres. Recuperado de <http://www.iadb.org/es/noticias/articulos/2010-09-30/desastres-naturales-en-america-latina-y-el-caribe-bid,8017.htm>
- Bermúdez, G. L. (2014). Fallas geológicas y amenaza sísmica. Managua: MSC Ingenieros. Recuperado de <http://www.mscestructurales.com/index.php>
- CEPREDENAC. (2006). Coordinating Centre for the Prevention of Natural Disasters in Central America. Recuperado de <http://www.ceprede-nac.org>
- Chopra, A. K. & Goel, R. K. (2001). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 561-582. <https://doi.org/10.1002/eqe.144>
- Chopra, A. K. (2012). Earthquake analysis of arch dams: Factors to be considered. *Journal of Structural Engineering-asce*, 138(2), 205-214. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000431](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000431)
- Clough, R. W. & Penzien, J. (1975). *Dinámica de estructuras*. McGraw-Hill.
- Faccioli, E., Santoyo, E. & Leon, J. L. (1973). Microzonation criteria and seismic response studies for the city of Managua. En *Conference Proceedings, Earthquake Engineering Research Institute*. Managua, Nicaragua, Earthquake of December 23, 1, 271-291.
- Finn, W. D. L. & Lee, M. K. W. (1991). DESRA-2C: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential. Universidad de British Columbia, Facultad de Ciencias Aplicadas.
- Miranda, E. & Bertero, V. V. (1994). Evaluation of strength reduction factors for Earthquake-Resistant design. *Earthquake Spectra*, 10(2), 357-379. <https://doi.org/10.1193/1.1585778>
- Romero, H. Fuentes, C., y Smith, P. (2011). La Geografía de los Riesgos "Naturales" y el Terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010. En G. Bocco, P. Urquilla, y A. Vieyra (Coords.), *Geografía y Ambiente en América Latina* (pp. 251-282). Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sánchez, F. J., Chávez-García, F. J. & Bravo, M. A. (1988). Seismic response of a class of alluvial valleys for incident SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(1), 83-95.
- Schmoll, H. R., Krushensky, R. D. & Dobrovolsky, E. (1975). *Geologic considerations for redevelopment planning of Managua, Nicaragua, following the 1972 earthquake*. United States Government Printing Office, Washington.
- Schnabel, B., Lysmer, J. & Seed, H. B. (1972). *Shake: A Computer Program for the Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*. University of California, Berkeley, EERC Report 72-12-1972.