

Limitaciones del parámetro V_{s30} para la predicción del movimiento fuerte

Limitations of the V_{s30} parameter for the prediction of strong motion

Fecha de entrega: 24 de octubre 2023

Fecha de aceptación: 25 de enero 2024

Felipe Leyton

Universidad de Chile, Centro Sismológico Nacional, Beauchef 850, Santiago, Chile, leyton@csn.uchile.cl (orcid: 0000-0002-6438-4045)

El parámetro V_{s30} , esto es, el promedio armónico de las ondas S en los 30 primeros metros de la superficie se ha usado extensivamente para modelar las condiciones locales de un sitio. Pero, diversos estudios han mostrado las deficiencias que este parámetro posee para predecir efectivamente el movimiento fuerte. En el presente estudio se comparan estimaciones de peligro sísmico no ergódicas con las mismas hechas considerando V_{s30} para mostrar sus limitaciones. Se observa que, en general, para suelos duros, las estimaciones son parecidas, pero para suelos blandos, se observan grandes diferencias. Ello se acentúa para suelos con periodos sobre 1 s, considerando periodos de respuesta largos. Estos resultados reflejan que el parámetro V_{s30} no logra capturar de buena manera el comportamiento de suelos con periodos largos.

Palabras clave: peligro sísmico probabilístico, efecto de sitio, limitaciones de V_{s30}

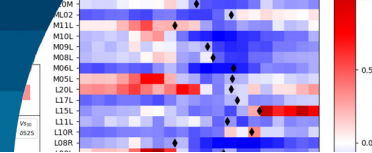
The V_{s30} parameter, that is, the harmonic average of the S waves in the first 30 meters of the surface, has been extensively used to model the local conditions of a site. However, several studies have shown the deficiencies that this parameter has to effectively predict the strong movement. In the present study, non-ergodic seismic hazard estimates are compared with the same ones made considering V_{s30} to show their limitations. It is observed that, in general, for hard soils, the estimates are similar, but for soft soils, great differences are observed. This is accentuated for soils with periods over 1 s, considering long response periods. These results reflect that the parameter V_{s30} does not manage to capture in a good way the behavior of soils with long periods.

Keywords: probabilistic seismic hazard, site effects, V_{s30} limitations

Introducción

Actualmente, la normativa sísmica y diversas relaciones de movimiento fuerte consideran el efecto de las condiciones locales del sitio en el movimiento fuerte (Parker y Stewart, 2022), donde su influencia es incorporada en la respuesta que tendrá el suelo durante un terremoto. Uno de los parámetros usuales corresponde al promedio armónico de la onda S en los 30 primeros metros, V_{s30} , parámetro introducido por Borchardt y Glassmoyer (1992) y Borchardt (1994) para la clasificación sísmica de sitios en normativa sísmica. Sin embargo, diversos estudios han descrito las limitaciones de este parámetro para predecir el comportamiento dinámico del suelo frente a un terremoto (Castellaro *et al.*, 2008; Kokusho y Sato, 2008; Lee y Trifunac, 2010; Héloïse *et al.*, 2012).

En el presente estudio se explora esta discrepancia mediante la estimación del peligro sísmico. Para ello, se estima el peligro sísmico probabilístico utilizando recientes relaciones de movimiento fuerte, con datos exclusivamente chilenos (Montalva *et al.*, 2017; Idini *et al.*, 2017), japoneses (Zhao *et al.*, 2016) y mundiales (Parker *et al.*, 2022; Kuehn *et al.*, 2020); las cuales consideran el parámetro V_{s30} para evaluar el efecto de sitio. Estas estimaciones son denominadas *ergódicas*. Por otro lado, siguiendo a Kotha *et al.* (2017), estimamos el peligro sísmico probabilístico, pero utilizando el factor de amplificación $\delta S2S$, desviación promedio de la amplificación de sitio a partir de una relación de movimiento fuerte de Kotha *et al.* (2018). Esta relación es denominada como parcialmente no ergódica,



pues considera la amplificación del sitio en cuestión. Para estimar el factor $\delta S2S$, es necesario evaluar los residuales (Atik *et al.*, 2010) de registros reales en el sitio. Es por ello que esta estimación se realizará en las estaciones de movimiento fuerte del Centro Sismológico Nacional (Leyton y García, 2024) que posean el número mínimo de registros, al igual que la caracterización del parámetro V_{s30} . La caracterización geofísica se basa en el Métodos de Ondas Superficiales (Leyton *et al.*, 2018).

La comparación de ambos resultados permitirá cuantificar la precisión con que V_{s30} es capaz de representar las amplificaciones producto del efecto de sitio, pues las diferencias en los resultados serán producto de las limitaciones del parámetro V_{s30} para las amplificaciones del sitio (Kotha *et al.*, 2017). Se espera que estos resultados aporten al conocimiento de las técnicas de estimación del peligro sísmico, al igual que al modelamiento de las amplificaciones producto a las condiciones de sitio. Por otro lado, cabe resaltar la importancia de este tipo de estudios, utilizando datos exclusivamente chilenos, por lo que reflejan el comportamiento real de los suelos de ciudades chilenas.

Datos

Para la realización de este estudio, se consideran las estaciones de movimiento fuerte del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (CSN). Ellas se encuentran distribuidas a lo largo del todo el país, con una concentración particular en ciudades particulares (Barrientos y CSN, 2018). De ellas, más de 150 han sido caracterizadas geofísicamente, entregando importantes parámetros dinámicos del suelo (Leyton *et al.*, 2018). En particular, se estimó V_{s30} , valor usualmente empleado para la evaluación de las relaciones de movimiento fuerte

Tabla 1: Clasificación de los sitios de emplazamiento de las estaciones de movimiento fuerte basada exclusivamente en el parámetro V_{s30}

Clase	Rango de V_{s30} , m/s
A	$900 \leq V_{s30}$
B	$500 \leq V_{s30} < 350$
C	$350 \leq V_{s30} < 180$
D	$V_{s30} \leq 180$

del suelo (Parker y Stewart, 2022). En base a V_{s30} , se han clasificado las estaciones siguiendo la Tabla 1; esta clasificación se muestra en la Figura 1. En la Figura 1(a), un mapa muestra la localización de las estaciones dentro del territorio nacional y en la Figura 1(b) se muestran las ciudades que presentan un número importante de estaciones (ver texto de la Figura 1).

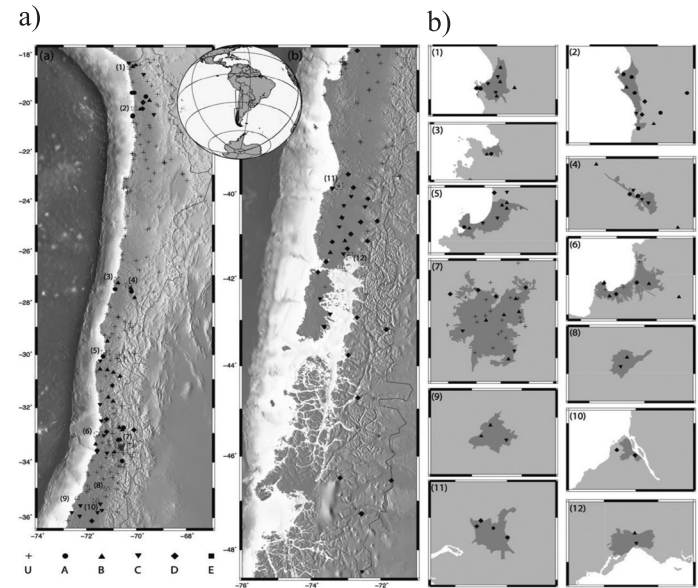
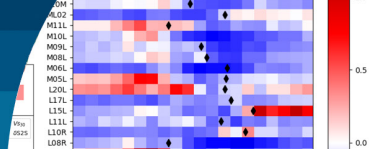


Figura 1: a) Localización de las estaciones de movimiento fuerte utilizadas en este estudio, los símbolos representan la clasificación de cada sitio siguiendo la nomenclatura del borde inferior y Tabla 1 y b) ciudades con un número importante de estaciones: (1) Arica, (2) Iquique, (3) Caldera, (4) Copiapó, (5) La Serena y Coquimbo, (6) Valparaíso y Viña del Mar, (7) Santiago, (8) Curicó, (9) Talca, (10) Constitución, (11) Valdivia y (12) Puerto Montt

Considerando los datos de la Base de Datos de Movimiento Fuerte (Leyton y García, 2024), se estima el factor $\delta S2S$, siguiendo la metodología descrita por Kotha *et al.* (2017). Este factor representa la desviación sistemática de la amplificación en el sitio con respecto a la media de las relaciones de movimiento fuerte, la cual considera estimadores sencillos como V_{s30} (Kotha *et al.*, 2017, 2018; Atik *et al.*, 2010).

Posteriormente, se seleccionan 5 relaciones de movimiento fuerte, por ser las más recientes y que consideran datos que son pertinentes para la subducción chilena. Ellas son las definidas por Montalva *et al.* (2017), Idini *et al.* (2017), las que consideran datos exclusivamente chilenos; Zhao *et al.* (2016) que considera datos exclusivamente japoneses (el cual presenta un ambiente tectónico similar al chileno) y



Parker *et al.* (2022) y Kuhen *et al.* (2020) que consideran datos de todo el mundo en ambiente de subducción. Cada una de ellas es evaluada para ver el ajuste a datos chilenos, siguiendo las metodologías descritas por Scherbaum *et al.* (2004, 2009), para los sismos interplaca tipo thrust e intraplaca de profundidad intermedia. Ejemplos de estos análisis se presentan en la Figura 2. Estos valores de ajustes son utilizados como pesos en el análisis con árbol lógico, tal como se muestran en la Figura 3.

Otros parámetros considerados en el árbol lógico son: relaciones de Gutenberg-Richter (Martin, 1990; Leyton *et al.*, 2009; Poulos *et al.*, 2019) y la magnitud máxima de los terremotos interplaca tipo thrust ($M_w 8.8 \pm 0.2$) e intraplaca

de profundidad intermedia ($M_w 7.9 \pm 0.1$). Siguiendo a Bommer (2012), se construye y evalúa el árbol lógico, siguiendo las ramas antes mencionadas.

Esta herramienta es evaluada 2 veces en cada sitio: la primera de ellas considerando el parámetro V_{s30} como indicador del efecto de sitio, siendo una estimación ergódica. Por otro lado, se repite el procedimiento, evaluando las relaciones de movimiento fuerte en condiciones de referencia (condiciones de roca) y agregando como efecto de sitio el estimado por $\delta S2S$, correspondiendo a una evaluación parcialmente no ergódica. En los resultados se presenta la comparación de estas dos estimaciones.

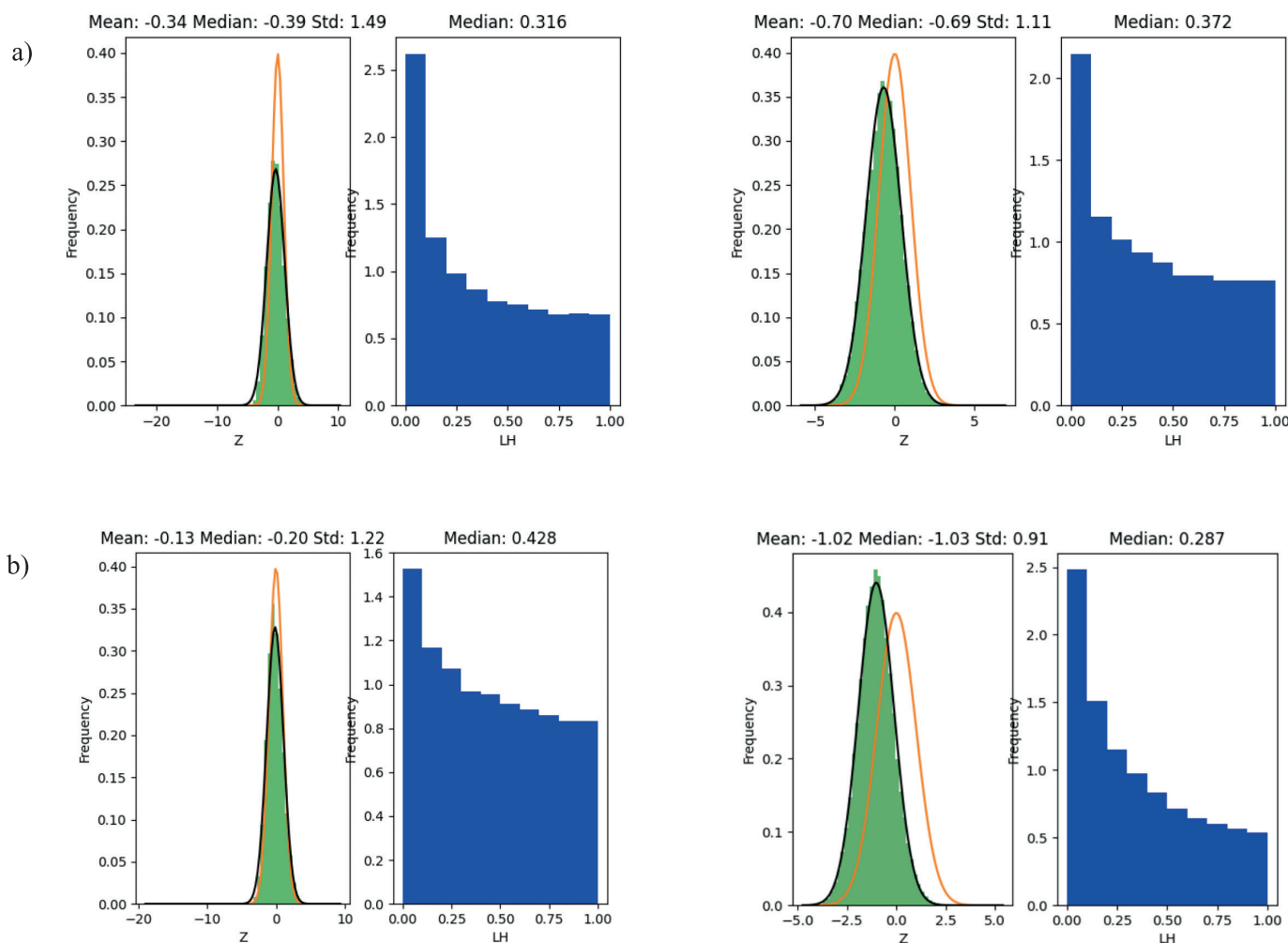


Figura 2: Ejemplo de ajuste de relaciones de movimiento fuerte a los datos chilenos, siguiendo Barrientos y CSN (2018) y Scherbaum *et al.* (2004), se presentan los resultados para las relaciones definidas por: a) Idini *et al.* (2017) y b) Montalva *et al.* (2017) para las fuentes interplaca tipo thrust (izquierda) e intraplaca de profundidad intermedia (derecha)

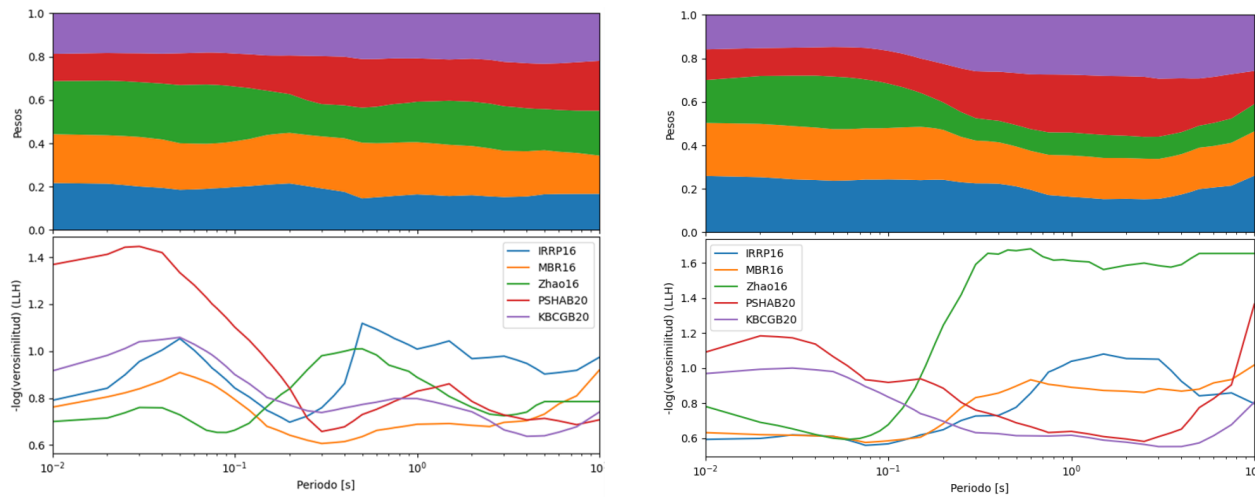
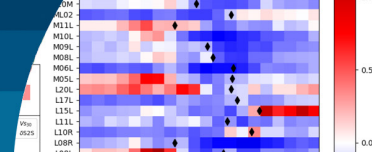


Figura 3: Paneles superiores: pesos de cada una de las relaciones de movimiento fuerte consideradas. Paneles inferiores: ajuste de las relaciones de movimiento fuerte a los datos Chilenos. Las relaciones consideradas son: Montalva *et al.* (MBR16), Idini *et al.* (IRRP16), Zhao *et al.* (Zhao16), Parker *et al.* (PSHAB20) y Kuehn *et al.* (KBCGB20). En lado izquierdo se presentan para la fuente interplaca tipo thrust y en el lado derecho, para la fuente interplaca de profundidad intermedia.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las estimaciones del peligro sísmico probabilístico; para facilitar su análisis, se presenta la diferencia entre los resultados como la siguiente razón r :

$$r = \frac{\delta S2S - V_{s30}}{V_{s30}} \quad (1)$$

donde $\delta S2S$ representa el resultado parcialmente no ergódico (PNE, es decir, considerando el factor de sitio estimado según Kotha *et al.* (2017) y V_{s30} corresponde al resultado ergódico (E, esto es, considerando V_{s30} en las relaciones de movimiento fuerte como parámetro del efecto de sitio). Ello permite comparar los resultados en términos relativos y no absolutos. Notar que, en caso de que $r < 0$, el resultado PNE es mayor que el ergódico, lo que resulta en un valor conservador: al usar V_{s30} como efecto de sitio, el peligro sísmico estimado es mayor que el obtenido en el caso parcialmente no ergódico. En caso contrario, valores de $r > 0$ representan casos no conservadores donde el peligro sísmico obtenido de V_{s30} como parámetro es menor que el caso más realista, entregado por la estimación ergódica. Además, tal como se mencionó anteriormente, las estaciones se han agrupado según la clasificación sísmica de la propuesta de norma prNCh433 (2023), pero considerando sólo el valor de V_{s30} ; esta clasificación se muestra en la Tabla 1.

En la Figura 4(a) se muestran algunos ejemplos de resultados para las estaciones A09P, PB11 y VA03. Estos paneles muestran los resultados del peligro sísmico parcialmente no ergódico, PNE, (en naranja, marcado con $\delta S2S$) y el ergódico, E, (en azul, V_{s30}), donde las barras verticales representan el error. De igual manera, para cada periodo (representada en el eje horizontal), se muestra la razón r entre los resultados. Por ejemplo, en el caso de A09P, entre 0.3 y 0.8 s, el resultado PNE (en naranja, $\delta S2S$) supera el valor ergódico (en azul, V_{s30}), tomando valores positivos (en tonos rojos). Lo mismo puede observarse en la Figura 4(b), donde se ha graficado sólo el valor de r en función del periodo. La Figura 4(b) muestra la razón r entre los resultados para todas las estaciones que se encuentran en suelo Clase A, según la Tabla 1.

De la Figura 4(b) es posible ver que, en general, las estimaciones de peligro sísmico ergódicas son conservadoras, salvo en contados casos. En dichos casos, tales como VA03, T15A, PSGCX y A09P se tiene que el peligro sísmico parcialmente no ergódico supera la versión ergódica, siendo más bien excepciones.

Por otro lado, en las Figuras 5(a) y 5(b) se presentan la misma clase de resultados, pero para suelos Clase B (ver Tabla 1). Nuevamente, se seleccionan casos excepcionales en el que el peligro sísmico parcialmente no ergódico supera a las estimaciones ergódicas, tales como V02A, T20A, C08A y A11P. En estos casos, el peligro sísmico no ergódico supera a los resultados ergódicos en periodos

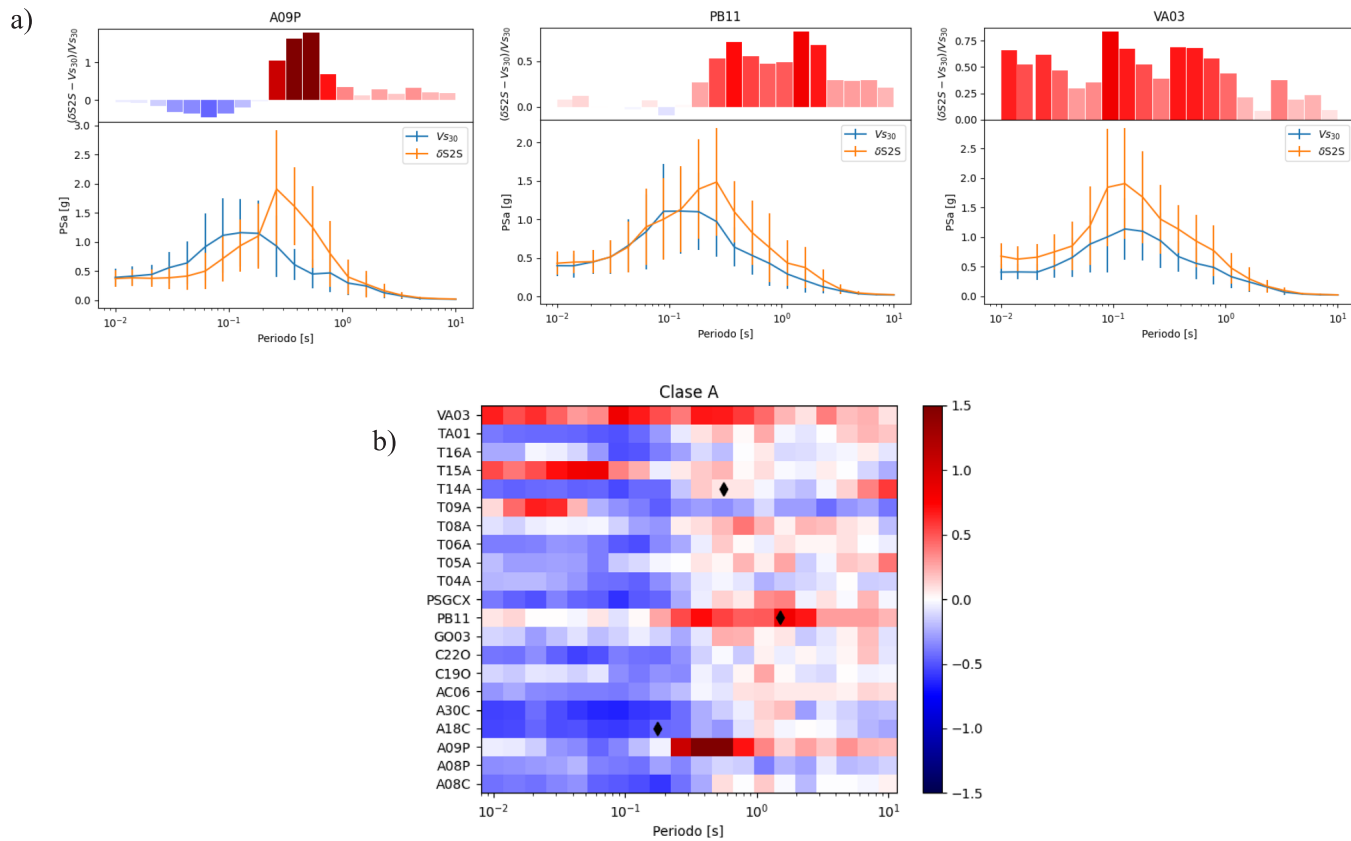
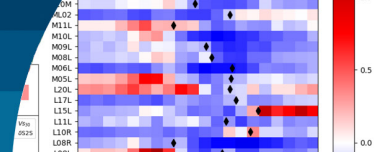


Figura 4: a) Resultados para las estaciones A09P, PB11 y VA03, donde se muestra el peligro sísmico parcialmente no ergódico (en naranja, $\delta S2S$) y ergódico (azul, V_{s30}), las barras verticales representan el error y b) la razón r entre los resultados para todas las estaciones en suelo Clase A (ver Tabla 1)

cercanos al periodo predominante, marcado con un rombo negro en la Figura 5(b). Es así como, las estimaciones ergódicas no son capaces de representar de buena forma la amplificación que produce el suelo en su periodo predominante. Si bien esto no explica la totalidad de los casos, en muchos de ellos se produce la coincidencia entre el periodo predominante del suelo y los resultados no conservadores.

En las Figuras 6(a) y 6(b) se presentan los mismos resultados, pero para aquellas estaciones emplazadas en suelos Clase C (ver Tabla 1). En este caso, se vuelve a observar algunos ejemplos de resultados no conservadores $r > 0$ (marcados en tonos rojos en el panel de la derecha); esto es, sitios en que el resultado del peligro sísmico parcialmente no ergódico supera a los obtenidos por la estimación ergódica, en rangos cercanos al periodo predominante. Ejemplos de ellos son V18A, TA02, M11L, L15L, C04O y A07C. El resto de las situaciones no conservadoras ($r > 0$) se presenta para periodos bajos: los sitios presentan una mayor amplificación para periodos

bajos que la que muestra el parámetro V_{s30} .

Finalmente, las Figuras 7(a) y 7(b) muestran los resultados para los sitios que pertenecen a la Clase D, siguiendo la Tabla 1. En este caso, la mayor parte de las situaciones en que se tienen resultados no conservadores ($r > 0$, marcados en tonos rojos) se presenta para periodos bajos. Excepciones a ellos son V17A, V08A y R21M donde se repite que los resultados son no conservadores para periodos cercanos al periodo predominante.

Comentarios finales

En el presente estudio se busca explorar las limitaciones del promedio armónico de los 30 primeros metros de la onda S, V_{s30} , para representar las amplificaciones de sitio. Para ello, se comparan los resultados de estudios de peligro sísmico probabilístico ergódico y parcialmente no ergódico. El primero de ellos, se realiza mediante la evaluación de relaciones de movimiento fuerte que usan V_{s30} para estimar el efecto de sitio; mientras que el

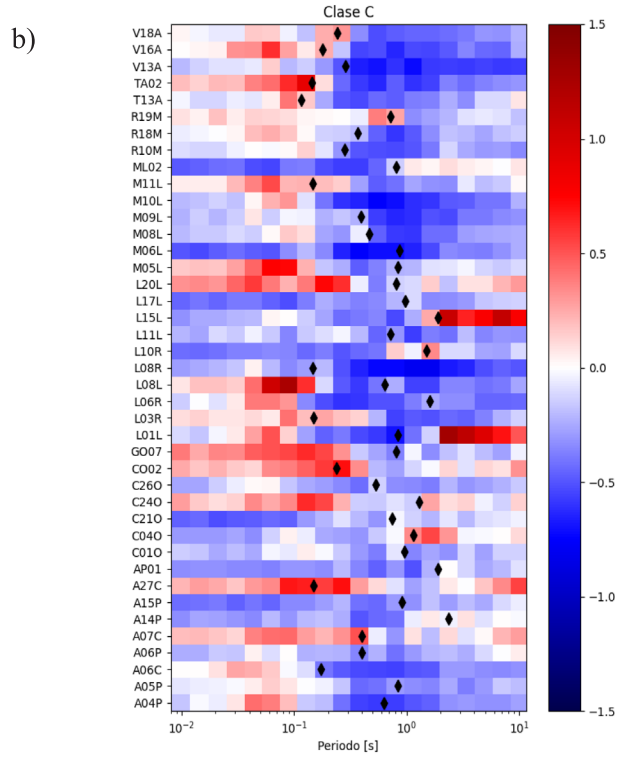
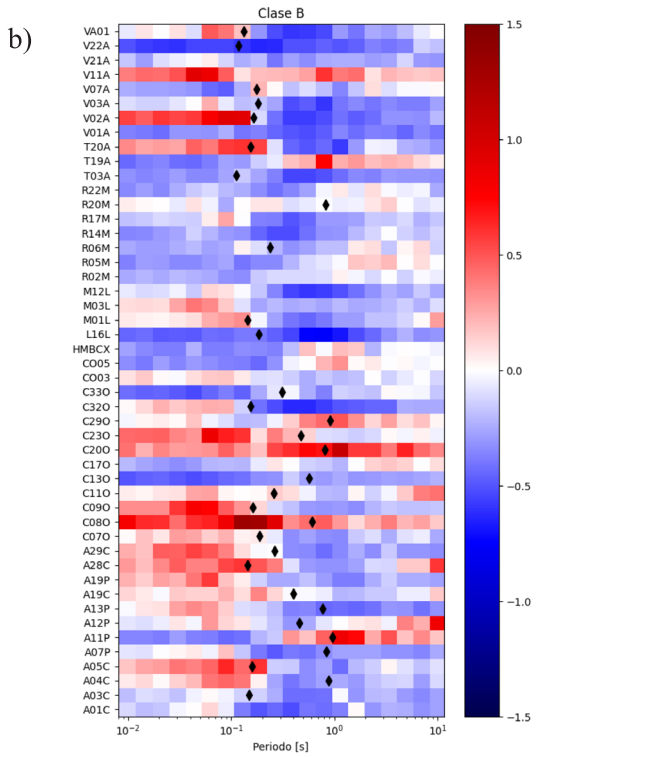
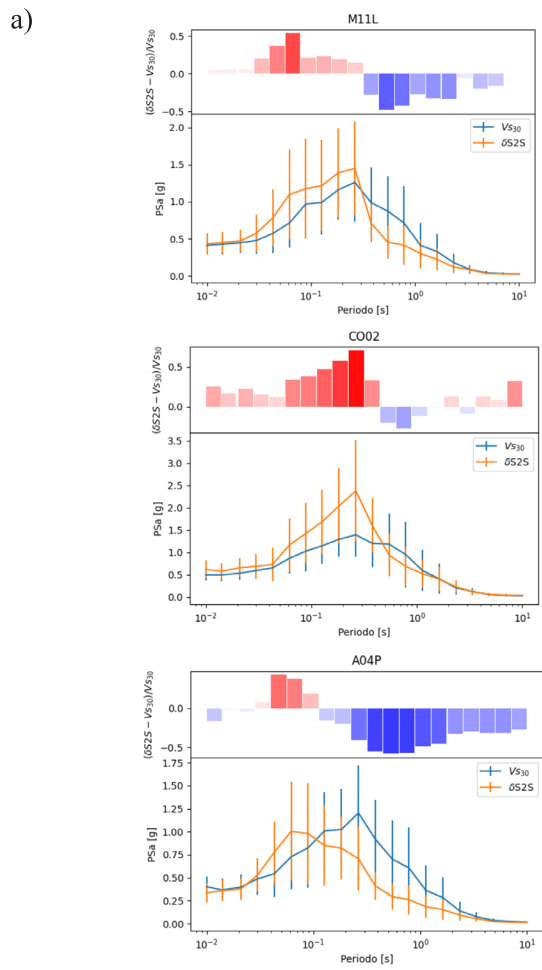
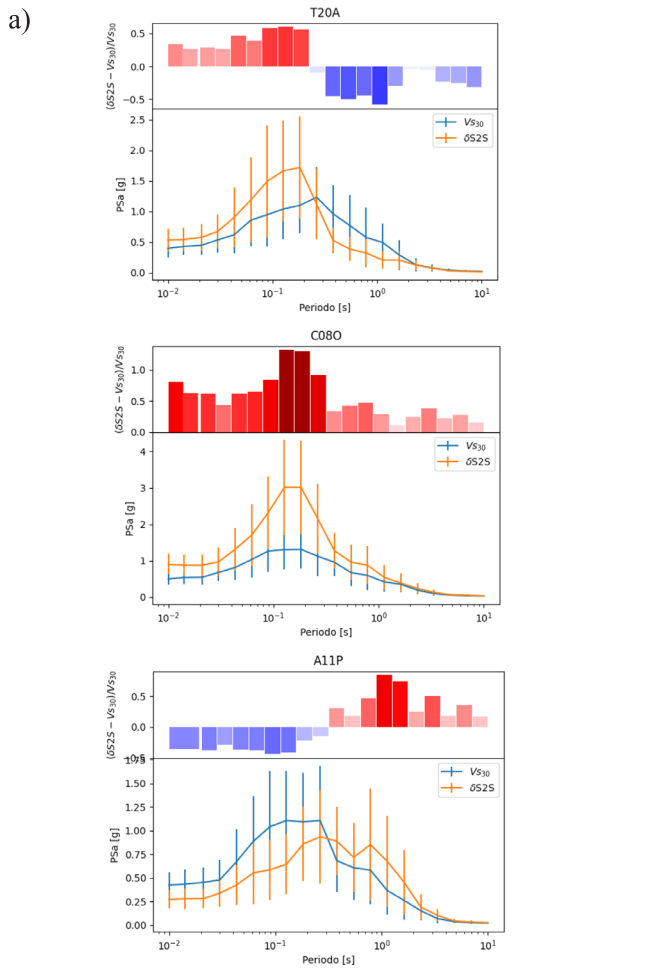
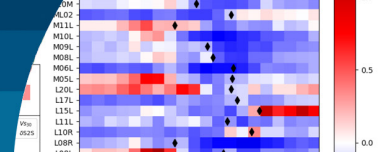


Figura 5: Resultados para estaciones en suelos Clase B: a) peligro sísmico y b) razón r (ver detalles en texto de la Figura 4)

Figura 6: Resultados para estaciones en suelos Clase C: a) peligro sísmico y b) razón r (ver detalles en texto de la Figura 4)

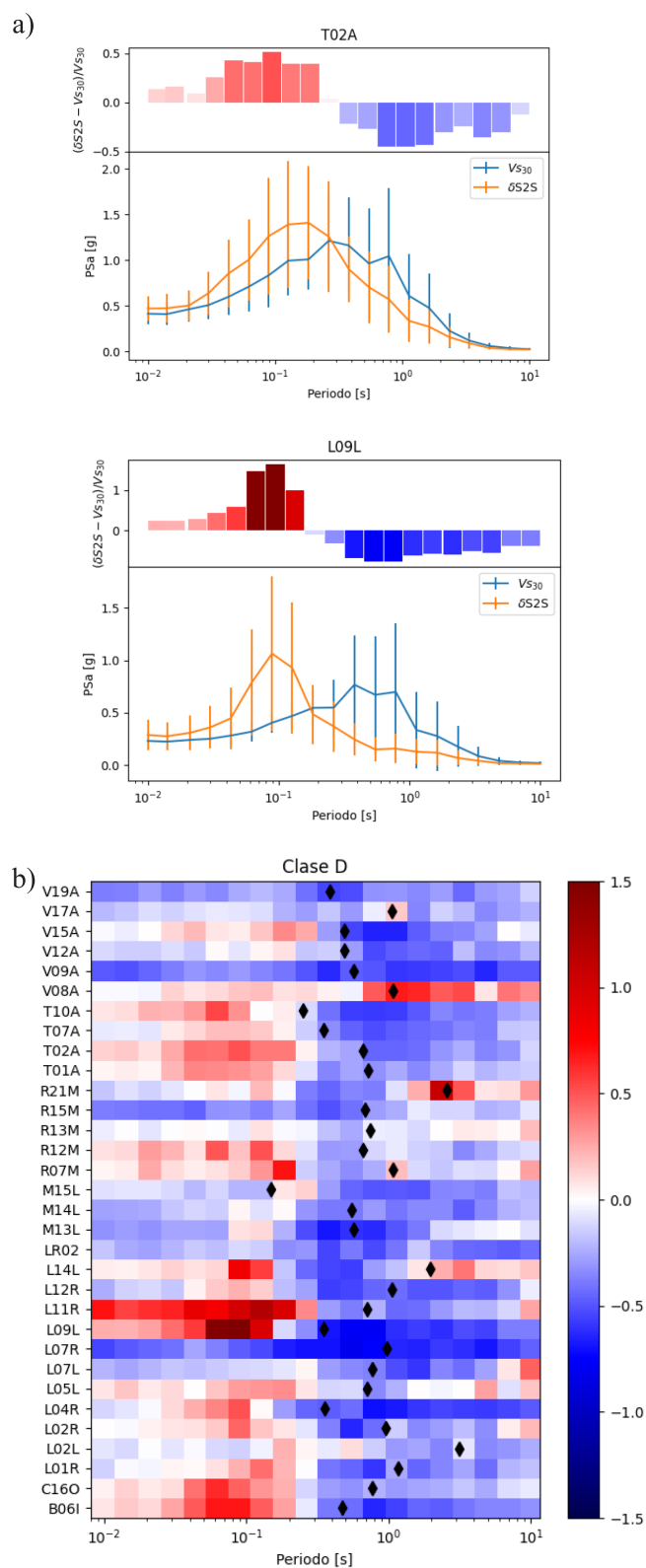
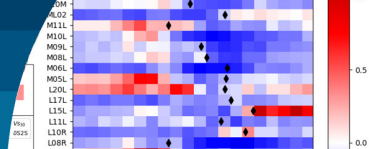


Figura 7: Resultados para estaciones en suelos Clase D: a) peligro sísmico y b) razón r (ver detalles en texto de la Figura 4)

segundo de ellos modela el efecto de sitio mediante el análisis de residuales estimando el parámetro $\delta S2S$. Las diferencias entre los dos resultados permiten establecer las limitaciones que V_{s30} posee para representar la respuesta de un sitio frente a los terremotos.

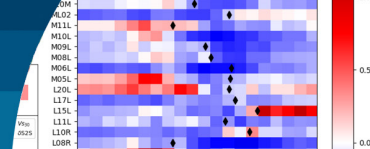
En primer lugar, se observa que los sitios en suelo clase A ($V_{s30} > 900$ m/s), los resultados suelen ser conservadores: la estimación ergódica (E) supera el resultado parcialmente no ergódico (PNE), salvo en contadas excepciones. Para suelos en sitios clase B ($500 \leq V_{s30} < 350$ m/s), se repite el mismo patrón antes observado, salvo que existe un mayor número de casos no conservadores, donde E está por debajo de la PNE. Ello se suele observar en rangos de periodos cercanos al predominante, marcado con un rombo en las Figuras 4(b) a 7(b), esta situación se repite en varios casos de suelos con claro periodo predominante. Por otro lado, en los suelos de clase C ($350 \leq V_{s30} < 180$ m/s), se observan resultados no conservadores (PNE > E) en periodos bajos (menores a 0.4 s), repitiéndose la ocurrencia de resultados no conservadores para casos específicos con claro periodo predominante. Finalmente, en los sitios clase D ($180 \geq V_{s30}$ m/s) donde, nuevamente, los resultados no conservadores se presentan en periodos bajos (menores a 0.4 s) y ciertos casos con periodos predominantes definidos.

Se concluye que, en general, para suelos rígidos (clases A y B), la estimación ergódica es conservadora; mientras que en casos de suelos blandos (C y D), se observan resultados no conservadores en periodos bajos (menores a 0.4 s). Por otro lado, en ciertos casos de claro periodo predominante, los resultados pueden ser no conservadores (PNE > E), lo cual debe ser explorado en más detalle en trabajos futuros.

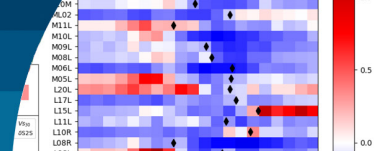
Se espera que estos resultados sirvan para establecer las limitaciones del uso del parámetro V_{s30} para determinar el efecto de sitio, al igual que su impacto en estudios de peligro sísmico probabilístico.

Referencias

Atik, L.A., Abrahamson, N., Bommer, J.J., Scherbaum, F., Cotton, F. and Kuehn, N. (2010). The variability of ground-motion prediction models and its components. *Seismological Research Letters* 81(5), 794-801



- Barrientos, S. and National Seismological Center (CSN) Team (2018). The seismic network of Chile. *Seismological Research Letters* **89**(2A), 467-474
- Bommer, J.J. (2012). Challenges of building logic trees for probabilistic seismic hazard analysis, *Earthquake Spectra* **28**(4), 1723–1735
- Borcherdt, R.D. (1994). Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification). *Earthquake Spectra* **10**(4), 617–653
- Borcherdt, R.D. and Glassmoyer, G. (1992). On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California. *Bulletin of the Seismological Society of America* **82**(2), 603-641
- Castellaro, S., Mulargia, F. and Rossi, P.L. (2008). V_{S30} : proxy for seismic amplification?. *Seismological Research Letters* **79**(4), 540-543
- Héloise, C., Bard, P.Y., Duval, A.M. and Bertrand, E. (2012). Site effect assessment using KiK-net data: part 2—site amplification prediction equation based on f_0 and V_{sz} . *Bulletin of Earthquake Engineering* **10**, 451-489
- Idini, B., Rojas, F., Ruiz, S. and Pastén, C. (2017). Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone. *Bulletin of Earthquake Engineering* **15**(5), 1853-1880
- Kokusho, T. and Sato, K. (2008). Surface-to-base amplification evaluated from KiK-net vertical array strong motion records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **28**(9), 707-716
- Kotha, S.R., Cotton, F. and Bindi, D. (2018). A new approach to site classification: Mixed-effects Ground Motion Prediction Equation with spectral clustering of site amplification functions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **110**, 318-329
- Kotha, S.R., Bindi, D. and Cotton, F. (2017). From ergodic to region-and site-specific probabilistic seismic hazard assessment: method development and application at European and Middle Eastern sites. *Earthquake Spectra* **33**(4), 1433-1453
- Kuehn, N., Bozorgnia, Y., Campbell, K.W. and Gregor, N. (2020). Partially nonergodic ground-motion model for subduction regions using NGA-Subduction database. PEER Report No. 2020/04. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley CA, USA
- Lee, V.W. and Trifunac, M.D. (2010). Should average shear-wave velocity in the top 30 m of soil be used to describe seismic amplification?. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **30**(11), 1250-1258
- Leyton, F. y García, B. (2023). La base de datos de movimiento fuerte del Centro Sismológico Nacional. *Obras y Proyectos* **35**, 15-21
- Leyton, F., Leopold, A., Hurtado, G., Pastén, C., Ruiz, S., Montalva, G. and Sáez, E. (2018). Geophysical characterization of the Chilean seismological stations: First results. *Seismological Research Letters* **89**(2A), 519-525
- Leyton, F., Ruiz, S. and Sepúlveda, S.A. (2009). Preliminary re-evaluation of probabilistic seismic hazard assessment in Chile: From Arica to Taitao Peninsula. *Advances in Geosciencias* **22**, 147–153
- Martin, A. (1990). *Hacia una nueva regionalización y cálculo del peligro sísmico en Chile*. Tesis de Magister, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Montalva, G.A., Bastías, N. and Rodríguez-Marek, A. (2017). Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America* **107**(2), 901-911
- prNCh433 (2023). Diseño sísmico de edificios. INN, Santiago, Chile
- Parker, G.A. and Stewart, J.P. (2022). Ergodic site response model for subduction zone regions. *Earthquake Spectra* **38**(2), 841-864
- Parker, G.A., Stewart, J.P., Boore, D.M., Atkinson, G.M. and Hassani, B. (2022). NGA-subduction global ground motion models with regional adjustment factors. *Earthquake Spectra* **38**(1), 456-493
- Poulos, A., Monsalve, M., Zamora, N. and de la Llera, J.C. (2019). An updated recurrence model for Chilean subduction seismicity and statistical validation of its Poisson nature. *Bulletin of the Seismological Society of America* **109**(1), 66-74
- Scherbaum, F., Cotton, F. and Smit, P. (2004). On the use of response spectral-reference data for the selection and ranking of ground-motion models for seismic-hazard analysis in regions of moderate seismicity: The case of rock motion. *Bulletin of the Seismological Society of America* **94**(6), 2164-2185



Scherbaum, F., Delavaud, E. and Riggelsen, C. (2009). Model selection in seismic hazard analysis: An information-theoretic perspective. *Bulletin of the Seismological Society of America* **99**(6), 3234-3247

Zhao, J.X., Jiang, F., Shi, P., Xing, H., Huang, H., Hou, R., Zhang, Y., Yu, P., Lan, X., Rhoades, D.A. and Somerville, P.G. (2016). Ground-motion prediction equations for subduction slab earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America* **106**(4), 1535-1551