

Importancia de la velocidad de onda de corte y del período predominante para la evaluación de la respuesta de sitio en Santiago

The importance of the shear wave velocity and the predominant period for the evaluation of the site response in Santiago

Fecha de entrega: 16 de diciembre 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril 2015

Cristian Godoy¹, Lenart González² y Esteban Sáez³

¹ SRK Consulting, Vitacura 2939, piso 5, Las Condes, Santiago, Chile, cgodoy@srk.cl

² IDIEM, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 883, Santiago, Chile, lenart.gonzalez@idiem.cl

³ Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, P. Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile, esaez@ing.puc.cl

Este artículo presenta los resultados del estudio de respuesta sísmica en diferentes sitios de Santiago realizado con el método lineal-equivalente. Para lo anterior, se desarrolló una metodología que permite establecer perfiles “equivalentes” de V_s hasta el contraste de impedancia predominante de profundidad mayor a 100 m, utilizando mediciones superficiales de V_s y de período predominante mediante la técnica de Nakamura o HVR. Una vez obtenidos los perfiles a analizar, se comparó la respuesta modelada con la real, obtenida a partir de registros sísmicos de eventos de M_w variable entre 4.0 y 8.8, obteniéndose una representación adecuada. Finalmente, se realizó un estudio paramétrico de respuesta de sitio considerando la variación de la profundidad y la estratigrafía de la cuenca de Santiago. Los resultados evidencian la importancia de utilizar el período predominante en conjunto con el V_s para una caracterización dinámica adecuada de los sitios estudiados.

Palabras clave: velocidad de onda de corte, período predominante, respuesta de sitio, método lineal-equivalente

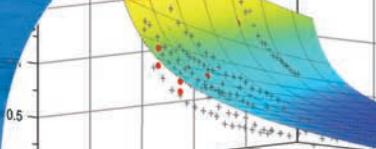
This article presents the results of a seismic response study of different sites in Santiago conducted with the equivalent linear method. A methodology was developed to determine “equivalent” profiles of V_s up to the predominant impedance contrast (more than 100 m of depth), using shallow measurements of V_s and the predominant period through the Nakamura’s technique or HVR. Once the profiles to be analyzed were obtained, the real and the modelled responses were compared for seismic events with M_w ranging from 4.0 to 8.8, yielding to an adequate representation. Finally, a parametric analysis of site response was performed considering the variation of the depth and stratigraphy across the Santiago basin. The trends of the seismic response evidence the importance of using the predominant period alongside the V_s for an adequate dynamic characterization of the studied sites.

Keywords: shear wave velocity, predominant period, site response, equivalent-linear method

Introducción

El terremoto del 27 de febrero del año 2010 es considerado uno de los más grandes eventos sísmicos de la historia. Su efecto ocasionó grandes daños que se extendieron desde la región de la Araucanía hasta la de Valparaíso. Esto trajo consigo la necesidad de reevaluar ciertos aspectos de la práctica nacional para mejorar y optimizar los diseños de

ingeniería. En este ámbito se generó una discusión sobre la normativa vigente de diseño sísmico de estructuras y en particular sobre el sistema de clasificación sísmica de suelos (Norma NCh 433 of. 1996 mod. 2009). Lo expresado anteriormente motivó la realización de una investigación tendiente a mejorar el conocimiento de la respuesta de sitio, en este caso, en la cuenca de Santiago.



Importancia de la velocidad de onda de corte y del período predominante para la evaluación de la respuesta de sitio en Santiago

The importance of the shear wave velocity and the predominant period for the evaluation of the site response in Santiago

Fecha de entrega: 16 de diciembre 2014

Fecha de aceptación: 6 de abril 2015

Cristian Godoy¹, Lenart González² y Esteban Sáez³

¹ SRK Consulting, Vitacura 2939, piso 5, Las Condes, Santiago, Chile, cgodoy@srk.cl

² IDIEM, Universidad de Chile, Plaza Ercilla 883, Santiago, Chile, lenart.gonzalez@idiem.cl

³ Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, P. Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile, esaez@ing.puc.cl

Este artículo presenta los resultados del estudio de respuesta sísmica en diferentes sitios de Santiago realizado con el método lineal-equivalente. Para lo anterior, se desarrolló una metodología que permite establecer perfiles “equivalentes” de V_s hasta el contraste de impedancia predominante de profundidad mayor a 100 m, utilizando mediciones superficiales de V_s y de período predominante mediante la técnica de Nakamura o HVR. Una vez obtenidos los perfiles a analizar, se comparó la respuesta modelada con la real, obtenida a partir de registros sísmicos de eventos de M_w variable entre 4.0 y 8.8, obteniéndose una representación adecuada. Finalmente, se realizó un estudio paramétrico de respuesta de sitio considerando la variación de la profundidad y la estratigrafía de la cuenca de Santiago. Los resultados evidencian la importancia de utilizar el período predominante en conjunto con el V_s para una caracterización dinámica adecuada de los sitios estudiados.

Palabras clave: velocidad de onda de corte, período predominante, respuesta de sitio, método lineal-equivalente

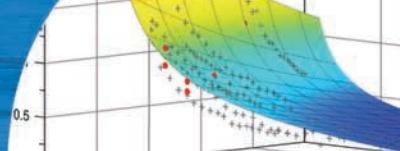
This article presents the results of a seismic response study of different sites in Santiago conducted with the equivalent linear method. A methodology was developed to determine “equivalent” profiles of V_s up to the predominant impedance contrast (more than 100 m of depth), using shallow measurements of V_s and the predominant period through the Nakamura’s technique or HVR. Once the profiles to be analyzed were obtained, the real and the modelled responses were compared for seismic events with M_w ranging from 4.0 to 8.8, yielding to an adequate representation. Finally, a parametric analysis of site response was performed considering the variation of the depth and stratigraphy across the Santiago basin. The trends of the seismic response evidence the importance of using the predominant period alongside the V_s for an adequate dynamic characterization of the studied sites.

Keywords: shear wave velocity, predominant period, site response, equivalent-linear method

Introducción

El terremoto del 27 de febrero del año 2010 es considerado uno de los más grandes eventos sísmicos de la historia. Su efecto ocasionó grandes daños que se extendieron desde la región de la Araucanía hasta la de Valparaíso. Esto trajo consigo la necesidad de reevaluar ciertos aspectos de la práctica nacional para mejorar y optimizar los diseños de

ingeniería. En este ámbito se generó una discusión sobre la normativa vigente de diseño sísmico de estructuras y en particular sobre el sistema de clasificación sísmica de suelos (Norma NCh 433 of. 1996 mod. 2009). Lo expresado anteriormente motivó la realización de una investigación tendiente a mejorar el conocimiento de la respuesta de sitio, en este caso, en la cuenca de Santiago.



Especificamente, se analizaron los parámetros que pueden influir en la respuesta de sitio y que podrían ser utilizados para mejorar el sistema de clasificación actual. Para lo anterior, se analizó el comportamiento de distintos sitios ubicados en la cuenca de Santiago utilizando el método lineal-equivalente, para determinar si el parámetro de clasificación actual (velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 m o V_{s30}) es adecuado y suficiente para modelar la respuesta en superficie, y de lo contrario complementarlo con, por ejemplo, el período predominante T_0 del sitio para mejorar las predicciones.

Metodología

La metodología seguida consistió en la selección de los sitios a estudiar, registros sísmicos a utilizar, determinación de perfiles unidimensionales de velocidad de onda de corte V_s para los sitios escogidos, verificación de la capacidad de predicción del método lineal-equivalente y el análisis de respuesta sísmica para distintos sitios en la cuenca de Santiago, identificando tendencias para los parámetros de clasificación de sitio estudiados.

Selección de sitios

El criterio para la selección de sitios dentro de la cuenca de Santiago corresponde a la presencia de una estación de monitoreo acelerográfico y contar con, al menos, una medición de V_s cercana. Si bien disponer de mediciones de período predominante y descripciones estratigráficas era deseable, estos factores no fueron considerados como determinantes para la elección. Con este criterio en vista, los sitios seleccionados correspondieron a las estaciones de Santiago Centro, Maipú y Puente Alto, pertenecientes a RENADIC; Quilicura, Pudahuel y La Reina, pertenecientes a la red SMASCH de la PUC; y finalmente la estación Antumapu, correspondiente al Servicio Sismológico Nacional SSN. La ubicación de las estaciones se presenta en la Figura 1. Estas estaciones se distribuyen a través de toda la zona urbana de la cuenca de Santiago y se sitúan sobre las distintas unidades geológicas presentes en ella. El detalle de la información utilizada se puede encontrar en Godoy (2013).

Los registros en la estaciones en roca y en los sitios de estudio fueron aportados por Universidad de Chile

(RENADIC), P. Universidad Católica (red SMASCH), Servicio Sismológico Nacional y SOCHIGE.

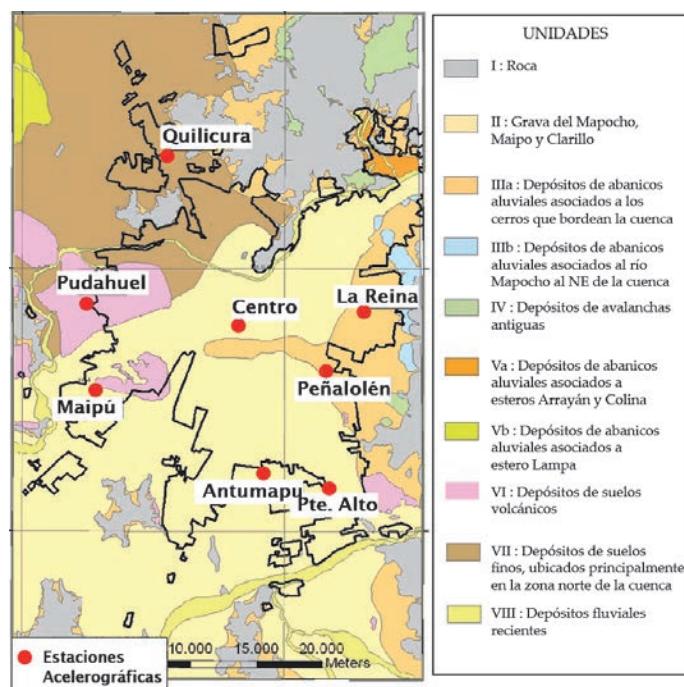


Figura 1: Estaciones acelerográficas seleccionadas y mapa de depósitos de suelos de Santiago (Leyton *et al.*, 2011)

Selección de registros sísmicos

Los registros sísmicos seleccionados para el estudio se pueden agrupar en dos casos:

Caso I: corresponde a distintos registros del terremoto del 27 de febrero del 2010 ($M_w = 8.8$), obtenidos en distintas estaciones acelerográficas ubicadas en roca. La respuesta en suelo, en este caso, es medida por las estaciones Antumapu, Maipú, Puente Alto, Peñalolén y Santiago Centro.

Caso II: corresponde a distintos eventos de baja a mediana magnitud (variable entre 4.5 y 6.9) registrados en la estación Cerro Santa Lucía (del SSN) ubicada en roca. La respuesta en suelo, para este caso, fue medida en las estaciones Quilicura, La Reina, Pudahuel y Antumapu.

Las Figuras 2 y 3 muestran la distribución espacial de las estaciones donde fueron registrados los eventos en cada caso, así como los gráficos tiempo-historia de cada uno de los registros.

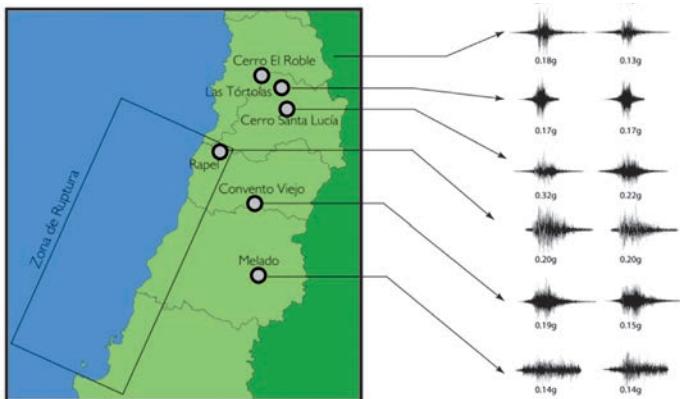


Figura 2: Registros y ubicación de estaciones acelerográficas en roca para el caso I

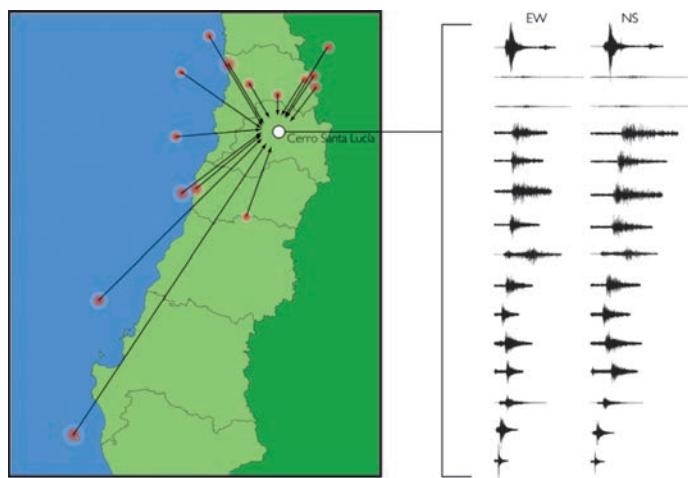


Figura 3: Registros y ubicación de la estación acelerográfica en roca para caso II

Determinación de perfiles unidimensionales

Si bien el requisito de selección de sitios consistió en disponer de mediciones *in situ* de V_s , estos datos no son suficientes para caracterizar el perfil completo de suelo hasta la roca. Por lo anterior, se debió recurrir a una metodología alternativa que permitiera extender los perfiles de V_s hasta el contraste de impedancia predominante o roca “aparente”. La metodología consiste en determinar un perfil “equivalente” a través de una calibración con el período predominante del suelo, la profundidad al basamento y la estratigrafía predominante de la zona, según se presenta en la Figura 4. En los sitios que no se disponía de información del período T_o y/o de estratigrafías, estos parámetros fueron interpolados de puntos de mediciones cercanos (Godoy, 2013).

Los datos de profundidad del basamento rocoso fueron obtenidos a partir de mediciones gravimétricas de Araneda *et al.* (2000). Lo anterior es utilizado bajo la hipótesis de que el período predominante corresponde para estos casos al fundamental, de forma que el contraste de impedancia que define el período de vibrar predominante del sitio coincide con el período hasta la roca. Bajo esta hipótesis, es adecuado utilizar para la calibración la combinación del período predominante con la profundidad gravimétrica. Como se mencionó anteriormente, el perfil “equivalente” corresponde a aquél que mejor interpreta el período predominante, es decir, el período de vibración del sitio a bajas deformaciones. Por lo tanto, es correcto determinar esta respuesta a través de un análisis lineal-elástico del suelo. Estos análisis se realizaron sobre perfiles de prueba, los cuales son obtenidos completando el perfil de V_s para las profundidades donde no se conoce, asumiendo un crecimiento de V_s con la profundidad, según la siguiente expresión:

$$V_s(z) = kz^\alpha \quad (1)$$

donde k es una constante de ajuste, z es la profundidad y α varía entre 0 y 0.25 dependiendo del tipo de material. V_s del basamento rocoso ha sido asumido constante e igual a 2000 m/s. De esta forma, se generan diferentes perfiles que entregan diferentes respuestas en bajas deformaciones y, por ende diferentes períodos predominantes. El perfil equivalente para el sitio en estudio corresponde a aquél con el T_o más cercano al medido o estimado para éste. Lo anterior se muestra gráficamente en la Figura 5.

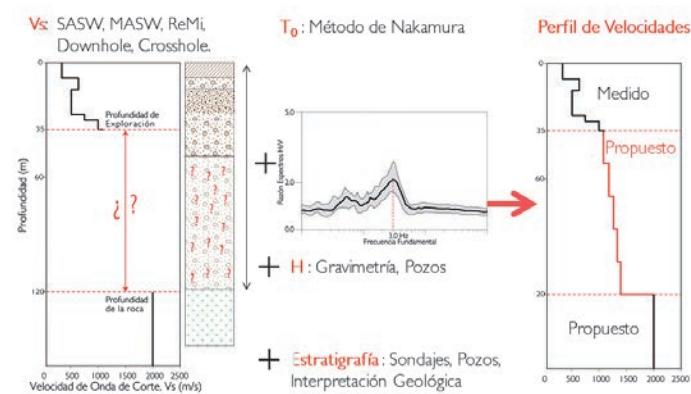


Figura 4: Metodología para la elaboración de perfiles de V_s equivalentes

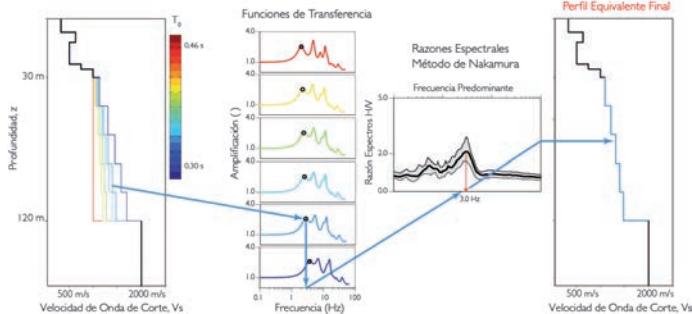


Figura 5: Ejemplo de elaboración de perfiles de prueba y selección del perfil equivalente final

En los sitios Peñalolén y Santiago Centro, el espectro de Nakamura se presentó con forma plana, no pudiéndose identificar claramente un período predominante. Para estos casos, y para no desperdiciar la información proveniente de estos perfiles, se asumieron tres períodos predominantes para cada uno, los cuales serán evaluados si corresponden o no más adelante. La Tabla 1 resume la información relevante de cada uno de los casos considerados.

Tabla 1: Resumen de propiedades de los perfiles analizados

| Perfil | T_0 , s | V_s , m/s | V_{s30} , m/s | H , m |
|-----------------|-----------|-------------|-----------------|---------|
| Peñalolén | 0.8* | 663* | 415 | 170 |
| | 1.0* | 590* | | 170 |
| | 1.3* | 605* | 220** | |
| Antumapu | 1.0 | 744* | 428 | 220 |
| Puente Alto | 1.0 | 847* | 480 | 145 |
| Santiago Centro | 0.1* | 1112* | 641 | 100 |
| | 0.3* | 981* | | 100 |
| | 0.5* | 905* | 130** | |
| Maipú | 0.4 | 890* | 478 | 120 |
| Quilicura | 1.0 | 445* | 360 | 125 |
| La Reina | 1.8 | 776* | 446 | 400 |
| Pudahuel | 2.1 | 714* | 523 | 400 |

* Dato estimado, el resto proviene de mediciones reales o interpolación de mediciones reales. V_s y V_{s30} corresponden a los V_s promediados (media armónica) en todo el depósito de suelo y hasta los primeros 30 m, respectivamente. H corresponde a la profundidad aproximada del basamento, obtenida de interpolación de las curvas de gravimetrías de Araneda *et al.* (2000).

** Estas profundidades fueron ajustadas para que el perfil entregara el T_0 correspondiente.

Finalmente, con base en la información estratigráfica asociada a cada sitio, se asigna a cada tipo de material su correspondiente curva de degradación de módulo de corte, curva de amortiguamiento en función de la deformación angular y densidad. Lo anterior se realiza con valores

obtenidos de la literatura (Aghaei Araei *et al.*, 2010; Seed e Idriss, 1970; Vucetic y Dobry, 1991).

Verificación del método lineal-equivalente

Una vez que se elaboraron los perfiles unidimensionales, se determinó la respuesta a través del método lineal-equivalente, utilizando los sismos de entrada mencionados anteriormente. La respuesta obtenida de esta forma fue comparada con la respuesta real medida en cada sitio a través del coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970), tanto de forma individual para cada sismo, así como la eficiencia promedio del grupo de sismos utilizados. Para las comparaciones antes descritas, se utilizó el espectro de respuesta, debido a que incorpora información de amplitud, duración y contenido de frecuencias del sismo en una sola curva. La Tabla 2 muestra los valores máximos, mínimos y promedio (mediana) de las eficiencias de cada grupo para el Caso I. El coeficiente de eficiencia puede variar entre $-\infty$ y 100%, en general, eficiencias sobre 0% se consideran aceptables (Moriasi *et al.*, 2007). La Figura 6 muestra los espectros de respuesta obtenidos. Es posible observar un muy buen ajuste en la mayoría de los casos, a excepción del sitio de Santiago Centro, donde si bien existe un espectro de respuesta muy similar al real, el comportamiento del grupo se aleja bastante de las mediciones para los tres períodos seleccionados.

Tabla 2: Coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Caso I.

| Estación | Mínima, % | Máxima, % | Mediana, % |
|-----------------|-----------|-----------|------------|
| Peñalolén | -26 | 79 | 24 |
| Antumapu | -53 | 79 | 45 |
| Puente Alto | 23 | 82 | 57 |
| Maipú | 2 | 87 | 50 |
| Santiago Centro | -441 | 68 | 10 |

Para el caso de Peñalolén, el perfil estimado que entregó mejor ajuste fue aquél con un período predominante de 0.8 s, por otra parte para la estación Santiago Centro fue el de 0.3 s. Sin embargo, como se comentó anteriormente, el segundo caso presenta grandes deficiencias en cuanto al ajuste para el grupo de sismos seleccionados, lo cual puede deberse al bajo contraste de impedancias del sitio, dificultando su caracterización a través de un período predominante.

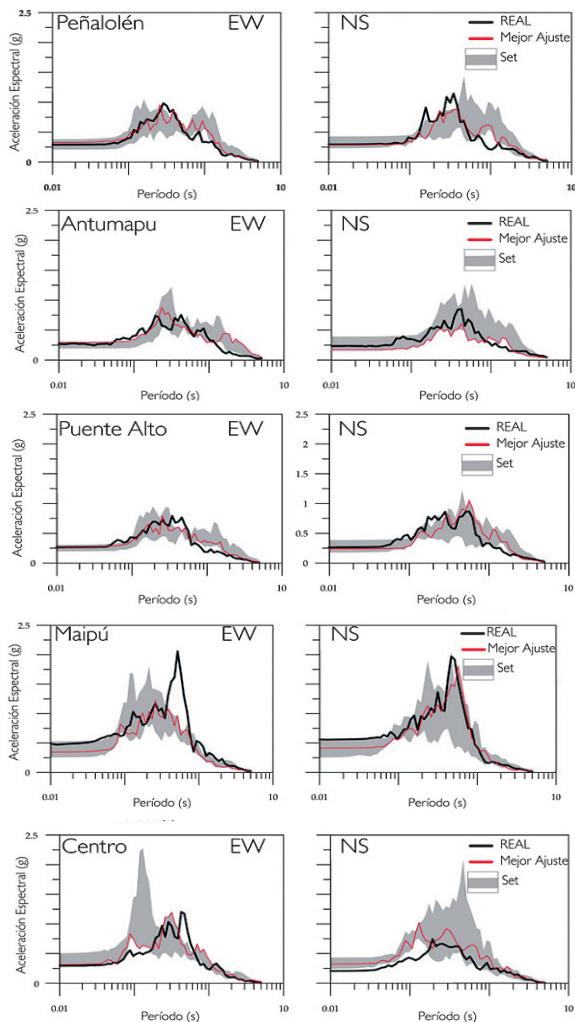


Figura 6: Espectros de respuesta modelados y reales para las estaciones estudiadas. Caso I

La Figura 7 presenta los resultados de las eficiencias para las distintas estaciones en suelo del Caso II. Es posible apreciar que los resultados arrojan muy buenos ajustes entre la modelación lineal-equivalente y la respuesta real, obteniéndose un 40% de los casos evaluados con eficiencias sobre 50%, y 70% de los casos sobre 0%.

Con respecto a estos resultados, es posible comentar que considerando las incertidumbres asociadas, tanto a los perfiles como a los sismos de entrada, los cuales están relacionados a estaciones distantes de los sitios estudiados, y que además, no existió calibración de las propiedades del suelo; el método lineal-equivalente es capaz de interpretar, en gran parte de los casos, de manera adecuada la respuesta en superficie. Sin embargo, es muy importante contar con una buena caracterización del sitio de estudio, principalmente en cuanto a la determinación del V_s y T_0 .

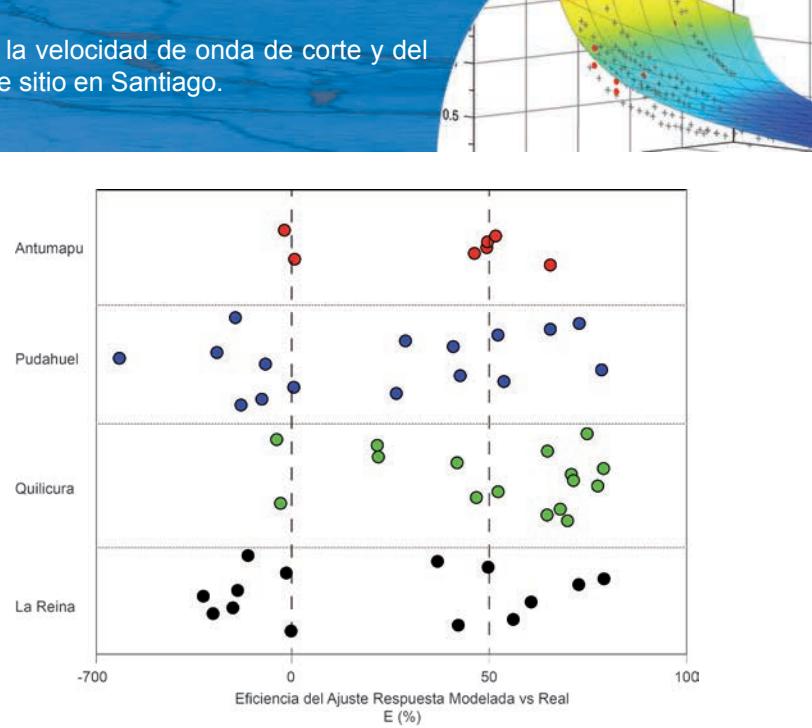


Figura 7: Eficiencia del ajuste caso II

Análisis paramétrico para la cuenca de Santiago

Finalmente, se realizó un análisis de respuesta de sitio paramétrico, sobre la base de los perfiles seleccionados y asumiéndolos representativos del sector en el que se ubican. La metodología consistió en mantener los primeros 50 m de cada perfil constante y a partir de eso, generar diferentes perfiles, de profundidad hasta el basamento variable entre 50 m y 500 m, obteniéndose así perfiles con distinto V_s promedio (idéntico V_{s0}) y distinto T_0 . La Figura 8 esquematiza lo mencionado anteriormente.

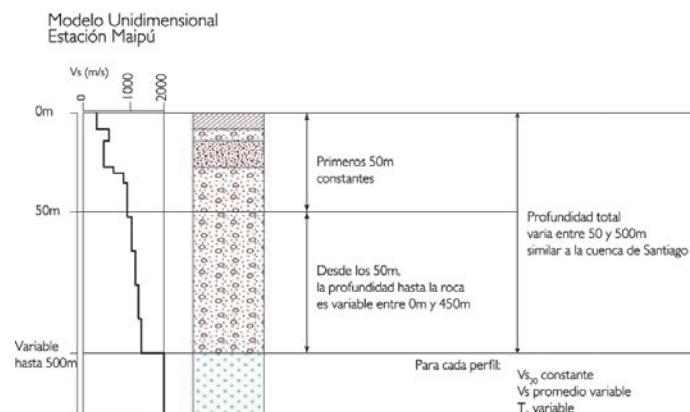


Figura 8: Esquema de la metodología de generación de perfiles generalizados para Santiago

Posteriormente, se procedió a realizar un análisis de respuesta de sitio a través del método lineal-equivalente para cada uno de estos perfiles y se identificaron las tendencias con distintos indicadores de la severidad de

la respuesta (aceleración espectral máxima, intensidad de Arias, factor de amplificación promedio); de esta forma se obtuvo una correlación clara entre el V_{s30} en conjunto con el período predominante y estos indicadores. Esta correlación no pudo ser conseguida utilizando sólo V_{s30} o T_0 por separado, tal como se muestra en la Figura 9. Los resultados encontrados en esta etapa indican la importancia para la clasificación sísmica de sitio de la incorporación de un parámetro que dé cuenta de las características dinámicas de todo el perfil como el período predominante y no tan solo de los 30 m superiores. La Figura 10 esquematiza un ejemplo de cómo esto podría ser incorporado en las normativas, a partir de la tendencia observada en la Figura 9.

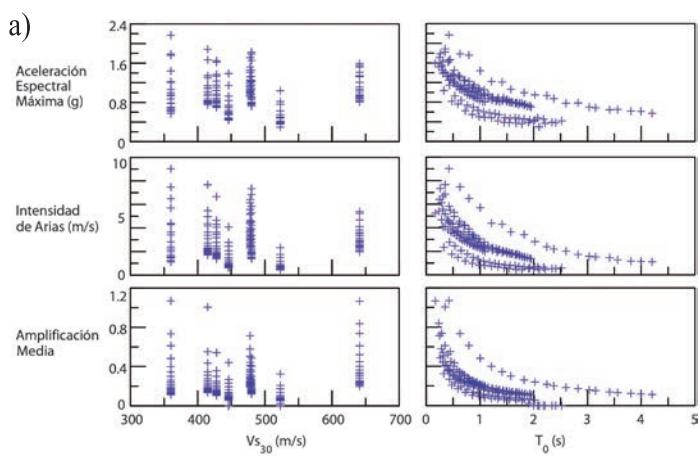


Figura 9: Tendencia de la respuesta de sitio utilizando V_{s30} y T_0 a) por separado y b) juntos

Conclusiones

El presente trabajo demuestra la correlación que existe entre la respuesta sísmica de un sitio y el conjunto de parámetros formado por el V_{s30} y el período predominante. A partir de lo anterior, se destaca la importancia que tiene incluir el

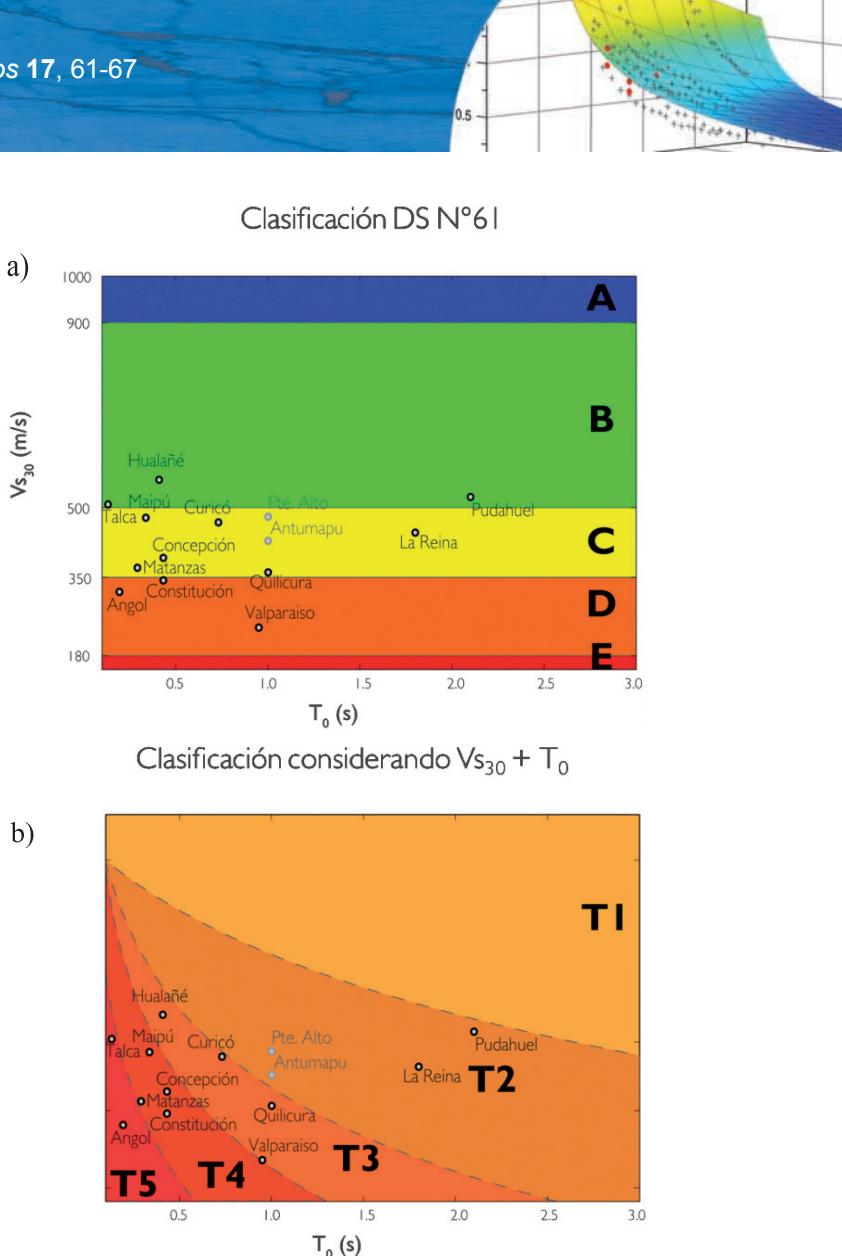
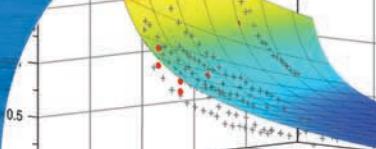


Figura 10: a) Sistema de clasificación actual (DS N°61, 2011) y b) ejemplo de clasificación utilizando V_{s30} y T_0

período en futuros sistemas de clasificación sísmica de suelos. También fue posible analizar adecuadamente la respuesta sísmica en la cuenca de Santiago a través del método lineal-equivalente. Esto podría ser generalizado a otras cuencas de similares características, es decir, formadas por suelos relativamente rígidos y con nivel freático profundo (o bien, con generación de presiones de poros despreciable).

Adicionalmente, se entregó una metodología para estimar un perfil “equivalente” de V_s para depósitos más profundos donde no sea posible estimar la velocidad de ondas de corte hasta la roca basal. Se destaca la importancia de una buena caracterización de sitio para la realización de este tipo de estudios, en particular, definir el período predominante de manera adecuada. Todo lo anterior puede ser implementado

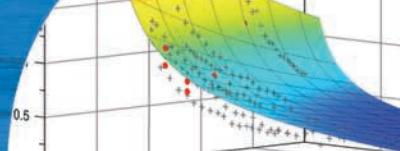


como herramienta para estudios de microzonificación sísmica y estudios de riesgo sísmico locales.

Finalmente, cabe destacar, que en el proceso de calibración de los perfiles equivalentes, se asumió que el período predominante coincide con el período fundamental, aceptando que es posible utilizar la gravimetría para definir la profundidad al basamento. Sin embargo, y a pesar de que la mayoría de los perfiles calibrados entregaron resultados satisfactorios, pueden existir casos en que esta hipótesis entregue resultados inadecuados. Del mismo modo, la velocidad de onda de corte de la roca, que en este trabajo fue asumida constante e igual a 2000 m/s, puede tener influencia en los resultados de la calibración y posteriores análisis de respuesta de sitio.

Referencias

- Aghaei Araei, A., Razeghi, H.R. and Tabatabaei, S.H. (2010). Dynamic properties of gravelly materials. *Sciencia Iranica, Transaction A: Civil Engineering* 17(4), 245–261
- Araneda, M., Avendaño, M. y Merlo, C. (2000). Modelo gravimétrico de la cuenca de Santiago, etapa III final. *IX Congreso Geológico de Chile*, Puerto Varas, 2, 404-408
- DS 61 (2011). Decreto Supremo N°61. Diario Oficial de la República. Cuerpo I-8. Martes 13 de Diciembre de 2011. MINVU
- Godoy, C. (2013). *Estudio de la respuesta de sitio en Santiago mediante el método lineal equivalente*. Tesis MSc, Universidad de Chile
- Leyton, F., Sepúlveda, S., Astroza, M., Acevedo, P., Ruiz, S., González, L. and Foncea, C. (2011). Seismic zonation of the Santiago Basin, Chile. *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Santiago, Chile
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the Asabe* 50, 885-900
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models; Part I, a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290
- NCh 433 of. 1996 (2009). Diseño sísmico de edificios. Instituto Nacional de Normalización
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. EERC, University of Berkeley
- Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89–107



Especificamente, se analizaron los parámetros que pueden influir en la respuesta de sitio y que podrían ser utilizados para mejorar el sistema de clasificación actual. Para lo anterior, se analizó el comportamiento de distintos sitios ubicados en la cuenca de Santiago utilizando el método lineal-equivalente, para determinar si el parámetro de clasificación actual (velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 m o V_{s30}) es adecuado y suficiente para modelar la respuesta en superficie, y de lo contrario complementarlo con, por ejemplo, el período predominante T_0 del sitio para mejorar las predicciones.

Metodología

La metodología seguida consistió en la selección de los sitios a estudiar, registros sísmicos a utilizar, determinación de perfiles unidimensionales de velocidad de onda de corte V_s para los sitios escogidos, verificación de la capacidad de predicción del método lineal-equivalente y el análisis de respuesta sísmica para distintos sitios en la cuenca de Santiago, identificando tendencias para los parámetros de clasificación de sitio estudiados.

Selección de sitios

El criterio para la selección de sitios dentro de la cuenca de Santiago corresponde a la presencia de una estación de monitoreo acelerográfico y contar con, al menos, una medición de V_s cercana. Si bien disponer de mediciones de período predominante y descripciones estratigráficas era deseable, estos factores no fueron considerados como determinantes para la elección. Con este criterio en vista, los sitios seleccionados correspondieron a las estaciones de Santiago Centro, Maipú y Puente Alto, pertenecientes a RENADIC; Quilicura, Pudahuel y La Reina, pertenecientes a la red SMASCH de la PUC; y finalmente la estación Antumapu, correspondiente al Servicio Sismológico Nacional SSN. La ubicación de las estaciones se presenta en la Figura 1. Estas estaciones se distribuyen a través de toda la zona urbana de la cuenca de Santiago y se sitúan sobre las distintas unidades geológicas presentes en ella. El detalle de la información utilizada se puede encontrar en Godoy (2013).

Los registros en la estaciones en roca y en los sitios de estudio fueron aportados por Universidad de Chile

(RENADIC), P. Universidad Católica (red SMASCH), Servicio Sismológico Nacional y SOCHIGE.

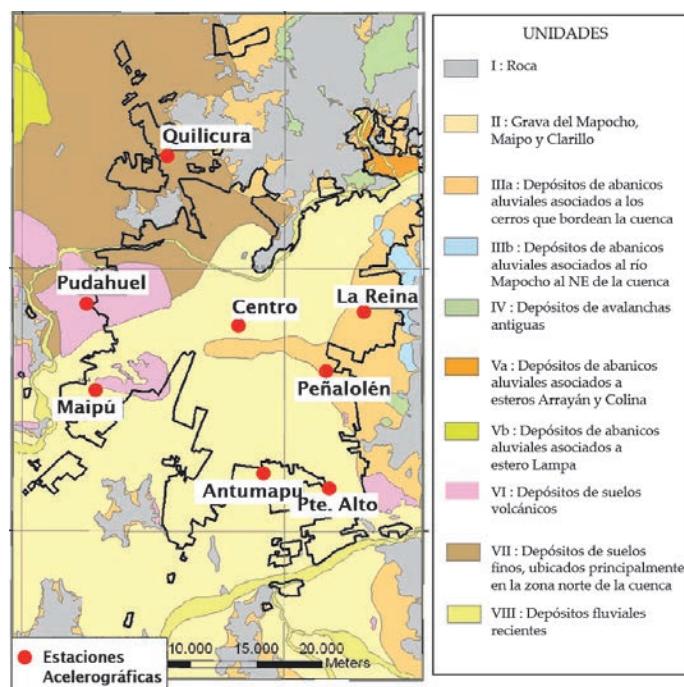


Figura 1: Estaciones acelerográficas seleccionadas y mapa de depósitos de suelos de Santiago (Leyton *et al.*, 2011)

Selección de registros sísmicos

Los registros sísmicos seleccionados para el estudio se pueden agrupar en dos casos:

Caso I: corresponde a distintos registros del terremoto del 27 de febrero del 2010 ($M_w = 8.8$), obtenidos en distintas estaciones acelerográficas ubicadas en roca. La respuesta en suelo, en este caso, es medida por las estaciones Antumapu, Maipú, Puente Alto, Peñalolén y Santiago Centro.

Caso II: corresponde a distintos eventos de baja a mediana magnitud (variable entre 4.5 y 6.9) registrados en la estación Cerro Santa Lucía (del SSN) ubicada en roca. La respuesta en suelo, para este caso, fue medida en las estaciones Quilicura, La Reina, Pudahuel y Antumapu.

Las Figuras 2 y 3 muestran la distribución espacial de las estaciones donde fueron registrados los eventos en cada caso, así como los gráficos tiempo-historia de cada uno de los registros.

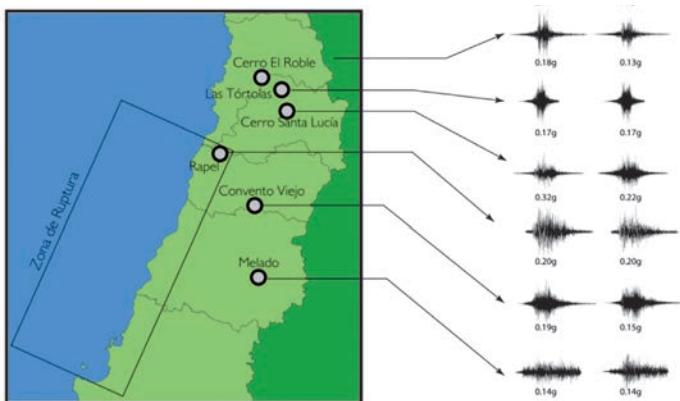


Figura 2: Registros y ubicación de estaciones acelerográficas en roca para el caso I

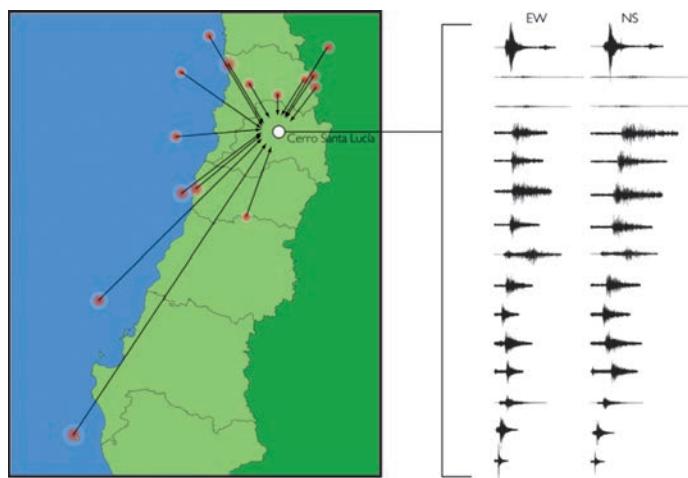


Figura 3: Registros y ubicación de la estación acelerográfica en roca para caso II

Determinación de perfiles unidimensionales

Si bien el requisito de selección de sitios consistió en disponer de mediciones *in situ* de V_s , estos datos no son suficientes para caracterizar el perfil completo de suelo hasta la roca. Por lo anterior, se debió recurrir a una metodología alternativa que permitiera extender los perfiles de V_s hasta el contraste de impedancia predominante o roca “aparente”. La metodología consiste en determinar un perfil “equivalente” a través de una calibración con el período predominante del suelo, la profundidad al basamento y la estratigrafía predominante de la zona, según se presenta en la Figura 4. En los sitios que no se disponía de información del período T_o y/o de estratigrafías, estos parámetros fueron interpolados de puntos de mediciones cercanos (Godoy, 2013).

Los datos de profundidad del basamento rocoso fueron obtenidos a partir de mediciones gravimétricas de Araneda *et al.* (2000). Lo anterior es utilizado bajo la hipótesis de que el período predominante corresponde para estos casos al fundamental, de forma que el contraste de impedancia que define el período de vibrar predominante del sitio coincide con el período hasta la roca. Bajo esta hipótesis, es adecuado utilizar para la calibración la combinación del período predominante con la profundidad gravimétrica. Como se mencionó anteriormente, el perfil “equivalente” corresponde a aquél que mejor interpreta el período predominante, es decir, el período de vibración del sitio a bajas deformaciones. Por lo tanto, es correcto determinar esta respuesta a través de un análisis lineal-elástico del suelo. Estos análisis se realizaron sobre perfiles de prueba, los cuales son obtenidos completando el perfil de V_s para las profundidades donde no se conoce, asumiendo un crecimiento de V_s con la profundidad, según la siguiente expresión:

$$V_s(z) = kz^\alpha \quad (1)$$

donde k es una constante de ajuste, z es la profundidad y α varía entre 0 y 0.25 dependiendo del tipo de material. V_s del basamento rocoso ha sido asumido constante e igual a 2000 m/s. De esta forma, se generan diferentes perfiles que entregan diferentes respuestas en bajas deformaciones y, por ende diferentes períodos predominantes. El perfil equivalente para el sitio en estudio corresponde a aquél con el T_o más cercano al medido o estimado para éste. Lo anterior se muestra gráficamente en la Figura 5.

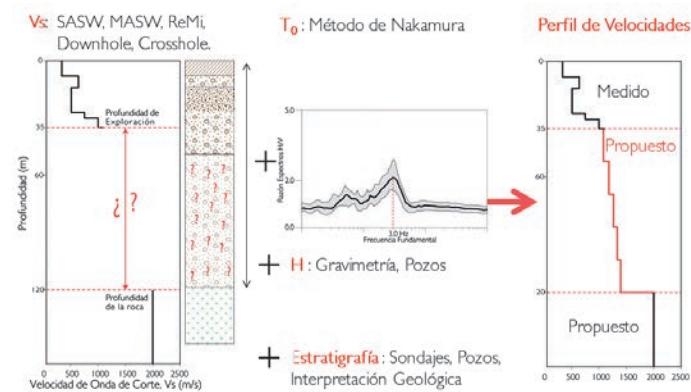


Figura 4: Metodología para la elaboración de perfiles de V_s equivalentes

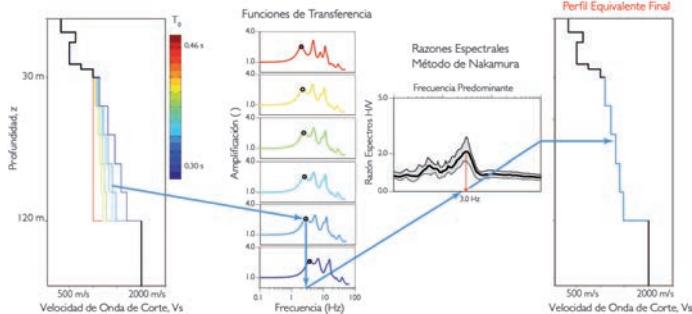


Figura 5: Ejemplo de elaboración de perfiles de prueba y selección del perfil equivalente final

En los sitios Peñalolén y Santiago Centro, el espectro de Nakamura se presentó con forma plana, no pudiéndose identificar claramente un período predominante. Para estos casos, y para no desperdiciar la información proveniente de estos perfiles, se asumieron tres períodos predominantes para cada uno, los cuales serán evaluados si corresponden o no más adelante. La Tabla 1 resume la información relevante de cada uno de los casos considerados.

Tabla 1: Resumen de propiedades de los perfiles analizados

| Perfil | T_0 , s | V_s , m/s | V_{s30} , m/s | H , m |
|-----------------|-----------|-------------|-----------------|---------|
| Peñalolén | 0.8* | 663* | 415 | 170 |
| | 1.0* | 590* | | 170 |
| | 1.3* | 605* | 220** | |
| Antumapu | 1.0 | 744* | 428 | 220 |
| Puente Alto | 1.0 | 847* | 480 | 145 |
| Santiago Centro | 0.1* | 1112* | 641 | 100 |
| | 0.3* | 981* | | 100 |
| | 0.5* | 905* | 130** | |
| Maipú | 0.4 | 890* | 478 | 120 |
| Quilicura | 1.0 | 445* | 360 | 125 |
| La Reina | 1.8 | 776* | 446 | 400 |
| Pudahuel | 2.1 | 714* | 523 | 400 |

* Dato estimado, el resto proviene de mediciones reales o interpolación de mediciones reales. V_s y V_{s30} corresponden a los V_s promediados (media armónica) en todo el depósito de suelo y hasta los primeros 30 m, respectivamente. H corresponde a la profundidad aproximada del basamento, obtenida de interpolación de las curvas de gravimetrías de Araneda *et al.* (2000).

** Estas profundidades fueron ajustadas para que el perfil entregara el T_0 correspondiente.

Finalmente, con base en la información estratigráfica asociada a cada sitio, se asigna a cada tipo de material su correspondiente curva de degradación de módulo de corte, curva de amortiguamiento en función de la deformación angular y densidad. Lo anterior se realiza con valores

obtenidos de la literatura (Aghaei Araei *et al.*, 2010; Seed e Idriss, 1970; Vucetic y Dobry, 1991).

Verificación del método lineal-equivalente

Una vez que se elaboraron los perfiles unidimensionales, se determinó la respuesta a través del método lineal-equivalente, utilizando los sismos de entrada mencionados anteriormente. La respuesta obtenida de esta forma fue comparada con la respuesta real medida en cada sitio a través del coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970), tanto de forma individual para cada sismo, así como la eficiencia promedio del grupo de sismos utilizados. Para las comparaciones antes descritas, se utilizó el espectro de respuesta, debido a que incorpora información de amplitud, duración y contenido de frecuencias del sismo en una sola curva. La Tabla 2 muestra los valores máximos, mínimos y promedio (mediana) de las eficiencias de cada grupo para el Caso I. El coeficiente de eficiencia puede variar entre $-\infty$ y 100%, en general, eficiencias sobre 0% se consideran aceptables (Moriasi *et al.*, 2007). La Figura 6 muestra los espectros de respuesta obtenidos. Es posible observar un muy buen ajuste en la mayoría de los casos, a excepción del sitio de Santiago Centro, donde si bien existe un espectro de respuesta muy similar al real, el comportamiento del grupo se aleja bastante de las mediciones para los tres períodos seleccionados.

Tabla 2: Coeficientes de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Caso I.

| Estación | Mínima, % | Máxima, % | Mediana, % |
|-----------------|-----------|-----------|------------|
| Peñalolén | -26 | 79 | 24 |
| Antumapu | -53 | 79 | 45 |
| Puente Alto | 23 | 82 | 57 |
| Maipú | 2 | 87 | 50 |
| Santiago Centro | -441 | 68 | 10 |

Para el caso de Peñalolén, el perfil estimado que entregó mejor ajuste fue aquél con un período predominante de 0.8 s, por otra parte para la estación Santiago Centro fue el de 0.3 s. Sin embargo, como se comentó anteriormente, el segundo caso presenta grandes deficiencias en cuanto al ajuste para el grupo de sismos seleccionados, lo cual puede deberse al bajo contraste de impedancias del sitio, dificultando su caracterización a través de un período predominante.

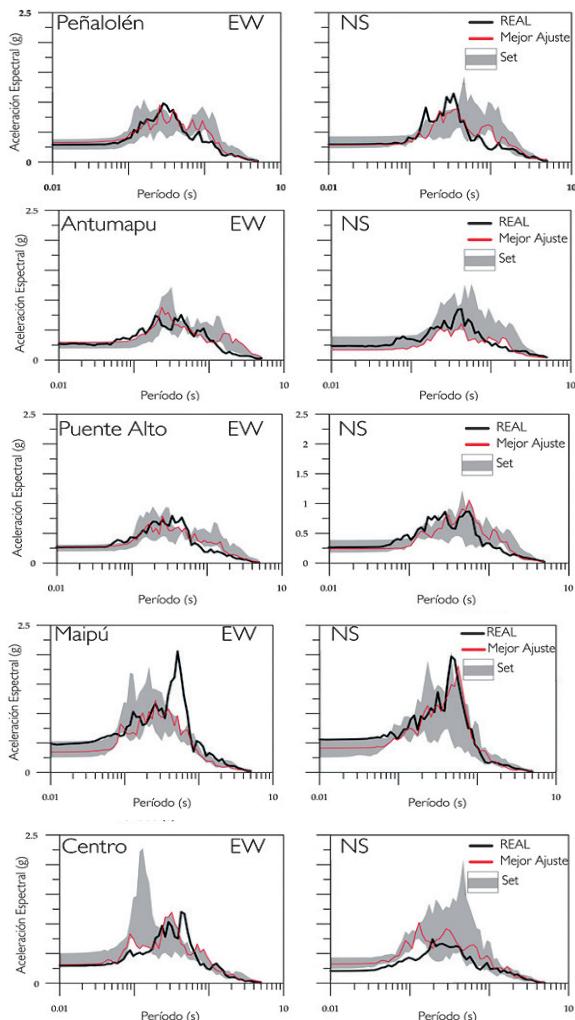


Figura 6: Espectros de respuesta modelados y reales para las estaciones estudiadas. Caso I

La Figura 7 presenta los resultados de las eficiencias para las distintas estaciones en suelo del Caso II. Es posible apreciar que los resultados arrojan muy buenos ajustes entre la modelación lineal-equivalente y la respuesta real, obteniéndose un 40% de los casos evaluados con eficiencias sobre 50%, y 70% de los casos sobre 0%.

Con respecto a estos resultados, es posible comentar que considerando las incertidumbres asociadas, tanto a los perfiles como a los sismos de entrada, los cuales están relacionados a estaciones distantes de los sitios estudiados, y que además, no existió calibración de las propiedades del suelo; el método lineal-equivalente es capaz de interpretar, en gran parte de los casos, de manera adecuada la respuesta en superficie. Sin embargo, es muy importante contar con una buena caracterización del sitio de estudio, principalmente en cuanto a la determinación del V_s y T_0 .

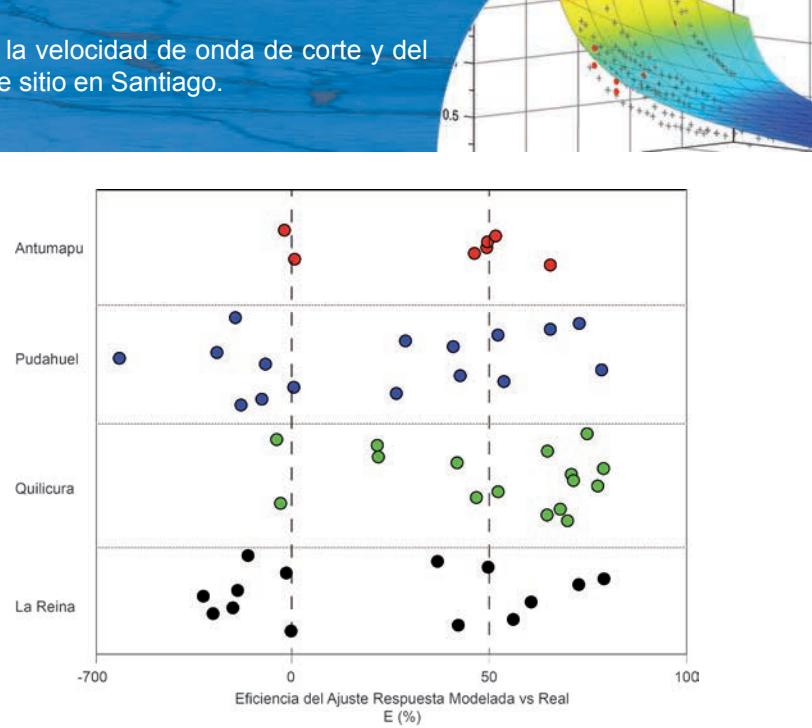


Figura 7: Eficiencia del ajuste caso II

Análisis paramétrico para la cuenca de Santiago

Finalmente, se realizó un análisis de respuesta de sitio paramétrico, sobre la base de los perfiles seleccionados y asumiéndolos representativos del sector en el que se ubican. La metodología consistió en mantener los primeros 50 m de cada perfil constante y a partir de eso, generar diferentes perfiles, de profundidad hasta el basamento variable entre 50 m y 500 m, obteniéndose así perfiles con distinto V_s promedio (idéntico V_{s0}) y distinto T_0 . La Figura 8 esquematiza lo mencionado anteriormente.

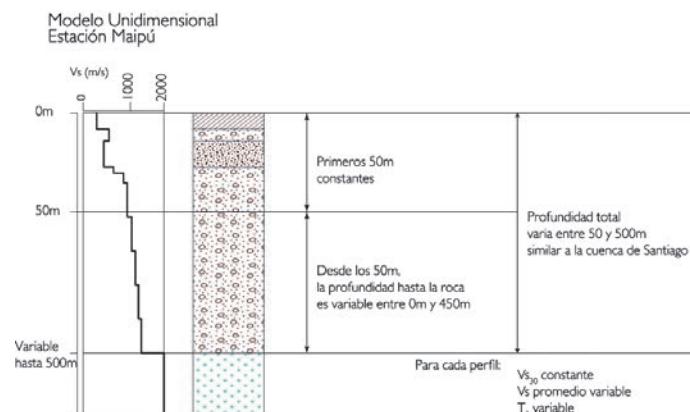


Figura 8: Esquema de la metodología de generación de perfiles generalizados para Santiago

Posteriormente, se procedió a realizar un análisis de respuesta de sitio a través del método lineal-equivalente para cada uno de estos perfiles y se identificaron las tendencias con distintos indicadores de la severidad de

la respuesta (aceleración espectral máxima, intensidad de Arias, factor de amplificación promedio); de esta forma se obtuvo una correlación clara entre el V_{s30} en conjunto con el período predominante y estos indicadores. Esta correlación no pudo ser conseguida utilizando sólo V_{s30} o T_0 por separado, tal como se muestra en la Figura 9. Los resultados encontrados en esta etapa indican la importancia para la clasificación sísmica de sitio de la incorporación de un parámetro que dé cuenta de las características dinámicas de todo el perfil como el período predominante y no tan solo de los 30 m superiores. La Figura 10 esquematiza un ejemplo de cómo esto podría ser incorporado en las normativas, a partir de la tendencia observada en la Figura 9.

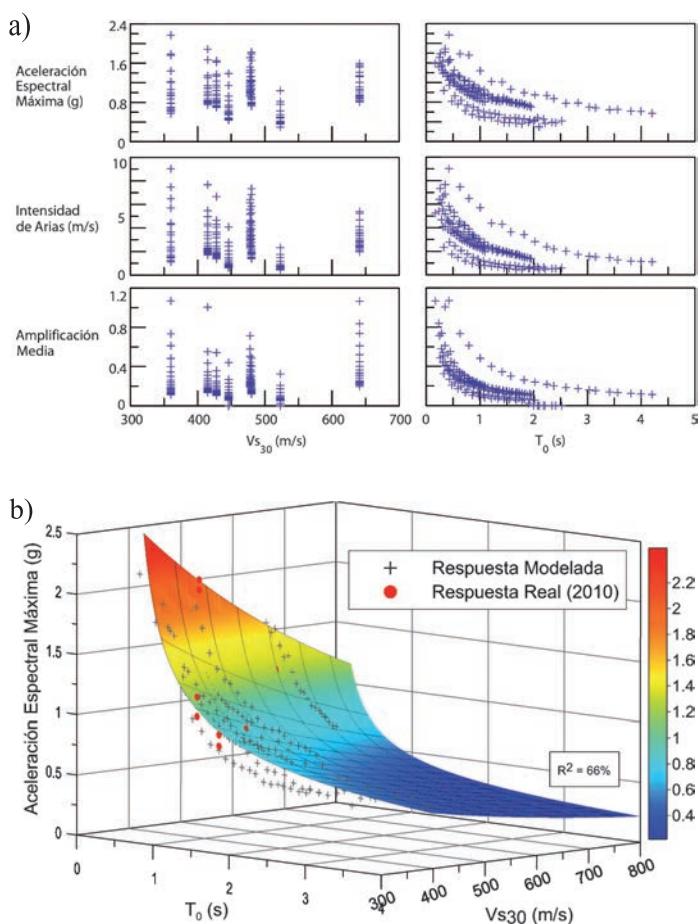


Figura 9: Tendencia de la respuesta de sitio utilizando V_{s30} y T_0 a) por separado y b) juntos

Conclusiones

El presente trabajo demuestra la correlación que existe entre la respuesta sísmica de un sitio y el conjunto de parámetros formado por el V_{s30} y el período predominante. A partir de lo anterior, se destaca la importancia que tiene incluir el

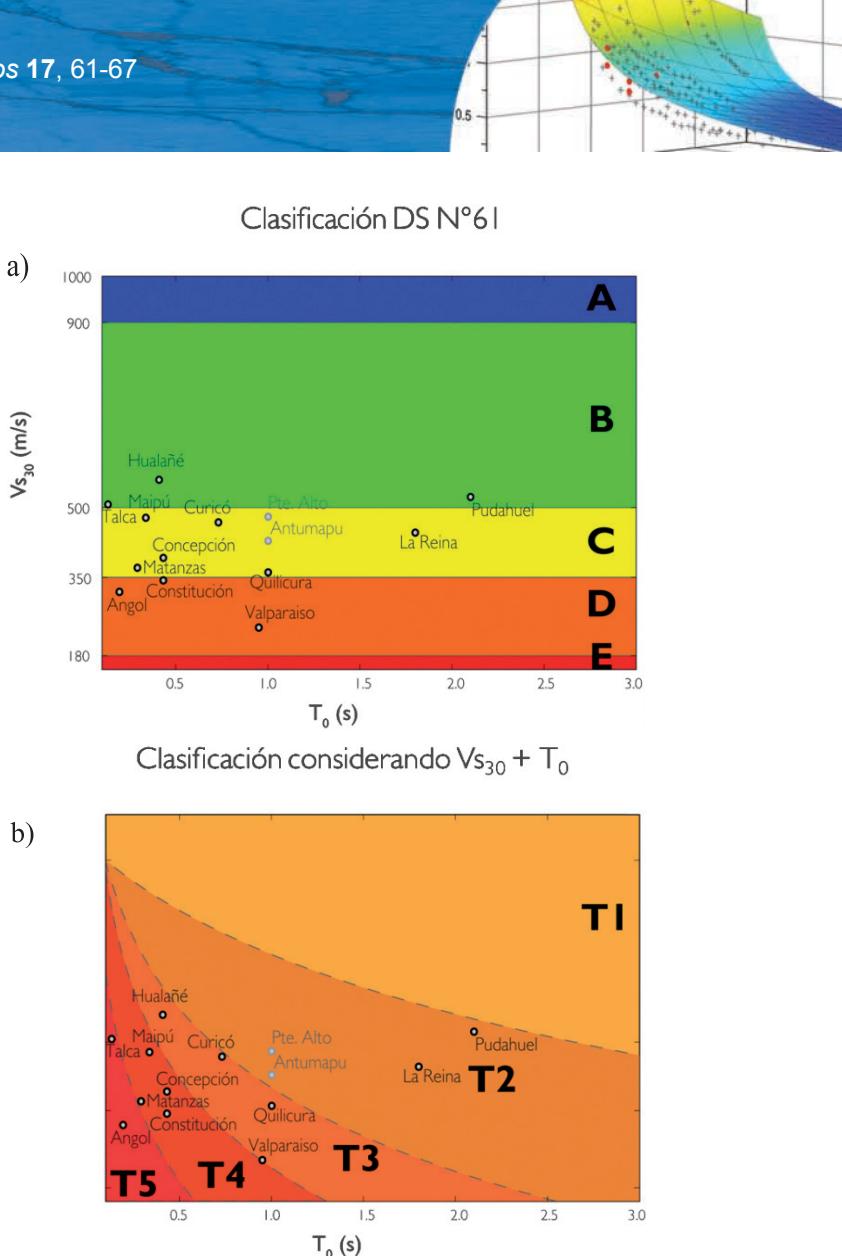
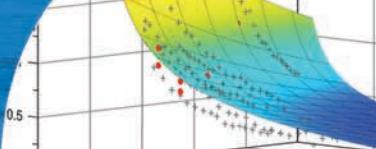


Figura 10: a) Sistema de clasificación actual (DS N°61, 2011) y b) ejemplo de clasificación utilizando V_{s30} y T_0

período en futuros sistemas de clasificación sísmica de suelos. También fue posible analizar adecuadamente la respuesta sísmica en la cuenca de Santiago a través del método lineal-equivalente. Esto podría ser generalizado a otras cuencas de similares características, es decir, formadas por suelos relativamente rígidos y con nivel freático profundo (o bien, con generación de presiones de poros despreciable).

Adicionalmente, se entregó una metodología para estimar un perfil “equivalente” de V_s para depósitos más profundos donde no sea posible estimar la velocidad de ondas de corte hasta la roca basal. Se destaca la importancia de una buena caracterización de sitio para la realización de este tipo de estudios, en particular, definir el período predominante de manera adecuada. Todo lo anterior puede ser implementado



como herramienta para estudios de microzonificación sísmica y estudios de riesgo sísmico locales.

Finalmente, cabe destacar, que en el proceso de calibración de los perfiles equivalentes, se asumió que el período predominante coincide con el período fundamental, aceptando que es posible utilizar la gravimetría para definir la profundidad al basamento. Sin embargo, y a pesar de que la mayoría de los perfiles calibrados entregaron resultados satisfactorios, pueden existir casos en que esta hipótesis entregue resultados inadecuados. Del mismo modo, la velocidad de onda de corte de la roca, que en este trabajo fue asumida constante e igual a 2000 m/s, puede tener influencia en los resultados de la calibración y posteriores análisis de respuesta de sitio.

Referencias

- Aghaei Araei, A., Razeghi, H.R. and Tabatabaei, S.H. (2010). Dynamic properties of gravelly materials. *Sciencia Iranica, Transaction A: Civil Engineering* 17(4), 245–261
- Araneda, M., Avendaño, M. y Merlo, C. (2000). Modelo gravimétrico de la cuenca de Santiago, etapa III final. *IX Congreso Geológico de Chile*, Puerto Varas, 2, 404-408
- DS 61 (2011). Decreto Supremo N°61. Diario Oficial de la República. Cuerpo I-8. Martes 13 de Diciembre de 2011. MINVU
- Godoy, C. (2013). *Estudio de la respuesta de sitio en Santiago mediante el método lineal equivalente*. Tesis MSc, Universidad de Chile
- Leyton, F., Sepúlveda, S., Astroza, M., Acevedo, P., Ruiz, S., González, L. and Foncea, C. (2011). Seismic zonation of the Santiago Basin, Chile. *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Santiago, Chile
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the Asabe* 50, 885-900
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models; Part I, a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290
- NCh 433 of. 1996 (2009). Diseño sísmico de edificios. Instituto Nacional de Normalización
- Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. EERC, University of Berkeley
- Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89–107