



Evaluación de efectos de amplificación topográfica del suelo debidos a la respuesta sísmica en laderas de las urbanizaciones Shancayán y Nueva Esperanza de la ciudad de Huaraz en el año 2018

Evaluation of topographic amplification effects of the soil due to the seismic response on the slopes of the Shancayán and Nueva Esperanza urbanizations of the city of Huaraz in 2018

REYNALDO REYES ROQUE¹, RUBÉN ARANDA LEIVA¹ y RAUL CASTILLEJO MELGAREJO¹

RESUMEN

El objetivo general del estudio fue evaluar los efectos de amplificación topográfica del suelo debidos a la respuesta sísmica en laderas de las urbanizaciones Shancayán y Nueva Esperanza de la ciudad de Huaraz. La presente investigación es del tipo cuantitativo y aplicado, donde se ha realizado la evaluación de la respuesta sísmica del terreno en zonas de laderas que presentan condiciones desfavorables para la cimentación de las edificaciones. Se ha evaluado la respuesta sísmica del suelo para un comportamiento lineal equivalente aplicado a un modelo geológico-geotécnico; realizándose un análisis bidimensional, que modela el perfil estratigráfico del terreno utilizando el método de los elementos finitos. Los resultados de la amplificación topográfica sísmica nos indica que se presentan zonas con grado muy alto en pendientes mayores a 25° y zonas con grado alto en pendientes entre 15° a 25°. La conclusión del estudio indica que los efectos de la amplificación topográfica sísmica son considerables y aumentan a mayor pendiente del terreno, y tiene un efecto directo en el comportamiento sismorresistente de las edificaciones.

Palabras clave: amplificación topográfica; respuesta sísmica; laderas.

¹Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4,0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

ABSTRACT

The general objective of the study was to evaluate the effects of topographic amplification of the soil due to the seismic response on the slopes of the Shancayán and Nueva Esperanza urbanizations of the city of Huaraz. The present investigation is of the quantitative and applied type, where the evaluation of the seismic response of the land in hillside areas that have unfavorable conditions for the foundation of the buildings has been carried out. The seismic response of the soil for an equivalent linear behavior applied to a geological-geotechnical model has been evaluated; performing a two-dimensional analysis, which models the stratigraphic profile of the terrain using the finite element method. The results of the seismic topographic amplification indicate that there are areas with a very high degree on slopes greater than 25° and areas with a high degree on slopes between 15° and 25°. The conclusion of the study indicates that the effects of seismic topographic amplification are considerable and increase at a greater slope of the terrain, and have a direct effect on the earthquake-resistant behavior of buildings.

Keywords: topographic amplification; seismic response; slopes.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de los efectos de la topografía del terreno en zonas de laderas sobre la respuesta sísmica del suelo puede ser significativo y es importante incorporar su análisis al momento de realizar el diseño sismorresistente de las edificaciones ubicadas en estos terrenos. Un alto porcentaje de la población de la ciudad de Huaraz se viene asentando sobre terrenos en zonas de laderas que la conforman y las condiciones topográficas irregulares juegan un papel importante en la modificación de la señal sísmica, lo cual podría ser catastrófico en caso de ocurrencia de un sismo severo por la gran concentración urbana en estas áreas de expansión, donde se vienen construyendo edificaciones unifamiliares y urbanizaciones multifamiliares. Esta problemática se produce debido a la falta de terrenos para la construcción de viviendas en el área urbana de la ciudad con topografía plana y mejores condiciones de terreno; por lo que las nuevas poblaciones vienen ocupando terrenos en zonas de laderas como áreas de expansión urbana.

El impacto de las condiciones topográficas en la modificación de las características de los sismos que excitan las edificaciones localizadas sobre las laderas, ha sido frecuentemente observado y documentado durante los eventos sísmicos, pero las investigaciones realizadas a escala regional

y aun internacional, no han sido concluyentes en la forma de considerar los efectos para el diseño sísmico resistente de las estructuras localizadas en laderas. Como antecedente del efecto catastrófico de las condiciones topográficas se tiene el registro del fuerte sismo de magnitud 6,2 (Mw), ocurrido el de 25 de enero de 1999 que afectó el eje cafetero, y destruyó parte de la ciudad de Armenia en Colombia, donde se evidenciaron daños sectorizados en las laderas ([INGEOMINAS, 1999](#)).

Como se ha observado en algunos sismos a nivel mundial, Chile (1985), Armenia-Colombia (1999), Atenas-Grecia (1999), entre otros, las edificaciones localizadas cerca a las coronas de los taludes en zonas sísmicamente activas, están propensas a presentar daños más severos que las situadas en la base de las laderas. Este fenómeno es conocido como efecto de amplificación topográfica y la cuantificación de estos efectos es una tarea muy compleja que requiere modelos geológico - geotécnicos muy robustos junto a estudios de fuentes de amenaza sísmica muy detallados, sin embargo, las características geomorfológicas y socio-económicas de la zona de estudio, reflejan la necesidad de poder determinar los posibles efectos adversos que tendrían las ondas sísmicas sobre estos taludes ([Silva, 2015](#)).

Los deslizamientos de laderas inducidos por terremotos son fenómenos inherentes al potencial destructor de los mismos, que han causado enormes daños personales, económicos y estructurales, por lo que los estudios de riesgo asociado cobran especial importancia. Es sabido que, en muchos terremotos recientes, los mayores daños no se han producido por el movimiento sísmico en sí, sino por los deslizamientos que éste ha inducido en laderas con cierta inestabilidad. La evaluación del correspondiente riesgo en zonas sísmicamente activas resulta de especial interés, teniendo como objetivo último la prevención de este tipo de desastres ([García, 2008](#)).

El movimiento del suelo durante un terremoto puede ser amplificado por las condiciones geológicas, geotécnicas y topográficas del terreno por el que se propagan las ondas sísmicas que provienen del sustrato rocoso. En muchos terremotos destructores la geología superficial de un área urbana ha influido notablemente en el nivel de la sacudida sísmica, sobretodo en el rango de periodos que coincide con el periodo de vibración de las estructuras ([Figueras y Macau, 2012](#)).

Se destaca de los resultados obtenidos de la interacción dinámica suelo estructura de los edificios construidos en ladera, que la variable respuesta a la cual se le debe prestar mayor atención

corresponde a los desplazamientos relativos entre la base y el techo de las estructuras, ya que esta presenta incrementos muy grandes hasta del orden de 6 veces en la ladera de 30° de inclinación con respecto a los obtenidos considerando condiciones topográficas planas horizontales. Por efecto de la ladera se presentaron aumentos importantes de la aceleración máxima en superficie siendo mayores los incrementos a media ladera y aún mayores hacia la cresta ([Herrera, 2013](#)).

El efecto de la topografía sobre la respuesta ante eventos sísmicos puede ser significativo y es importante incorporar su análisis al momento de realizar los diseños de estructuras ubicadas en la cima de un cerro, laderas, bordes de acantilados, etc. Es ampliamente conocido que el efecto destructivo de los eventos sísmicos puede estar fuertemente condicionado por el "contexto geotécnico local", el cual involucra espesores de estratos, rigidez de los suelos presentes, profundidad de la roca basal y las condiciones topográficas del área en estudio ([Solans, 2014](#)).

La amplificación del movimiento del suelo es la responsable del daño extenso en áreas constituidas por depósitos de gran potencia de sedimentos blandos y poco compactados. Dos mecanismos contribuyen a los efectos de amplificación de la señal en el suelo: la amplitud geométrica y la amplificación dinámica. La amplificación geométrica corresponde a los efectos de amplificación debidos al contraste entre dos medios en contacto ([Rodríguez, 2015](#)).

Los efectos de sitio que incluyen efectos a partir de fuertes discontinuidades geológicas laterales, donde estos efectos están dominados por la presencia de ondas de superficie y ondas de cuerpo, solo pueden ser estudiados utilizando modelos 2D y 3D. Finalmente, los efectos de sitio también incluyen variaciones en las características del movimiento del terreno debido a cambios en la topografía superficial ([Ansal, 2004](#)).

Para la ciudad de Huaraz, se tienen evidencias que lo ubican como una de las zonas sísmicamente más activas del país; sin embargo, no se cuenta con estudios suficientes sobre los efectos que causan estos sismos sobre las edificaciones y la población más vulnerable de la ciudad. Debido a las características topográficas de los terrenos ubicados en zonas de laderas que conforman las urbanizaciones Shancayán y Nueva Esperanza, sumadas a la alta probabilidad de ocurrencia de sismos severos en la ciudad; se hace necesario determinar y evaluar los posibles efectos que tendrían las ondas sísmicas sobre estos taludes, así surgió la necesidad de estudiar los efectos de la topografía del terreno en la respuesta sísmica del suelo, las cuales pueden ayudar al desarrollo de

Reynaldo Reyes Roque, Rubén Aranda Leiva y Raul Castillejo Melgarejo

técnicas y modelamientos que permitan incorporar el efecto de amplificación topográfica sísmica en estudios de análisis dinámico de estabilidad de laderas y la evaluación de la interacción dinámica suelo-estructura en el diseño sismorresistente de edificaciones construidas en laderas. Se justifica la investigación por cuanto se trata de la determinación de los efectos de amplificación topográfica sísmica en laderas, que hacen vulnerable a un sector y grupo humano importante de la ciudad de Huaraz, por lo que se ha planteado como objetivo principal la evaluación de los efectos de amplificación topográfica del suelo debidos a la respuesta sísmica en laderas de las urbanizaciones Shancayán y Nueva Esperanza de la ciudad de Huaraz.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación es de enfoque cuantitativo del tipo aplicado y con un diseño metodológico de investigación cuantitativa experimental y transversal. La población para la investigación, consiste en las urbanizaciones ubicadas en zonas de laderas de la ciudad de Huaraz y la muestra de investigación se definió mediante un muestreo no probabilístico del tipo intencional, determinándose para la investigación las urbanizaciones de Shancayán y Nueva Esperanza, que se muestran en la figura 1.



Figura 1. Vista panorámica del área de estudio

Se realizó la contrastación de los datos recolectados, la verificación de estudios recopilados y la realización de ensayos in situ de geofísica y geotecnia. De la investigación realizada para los fines de nuestro estudio se resume en el siguiente marco lógico de actividades:

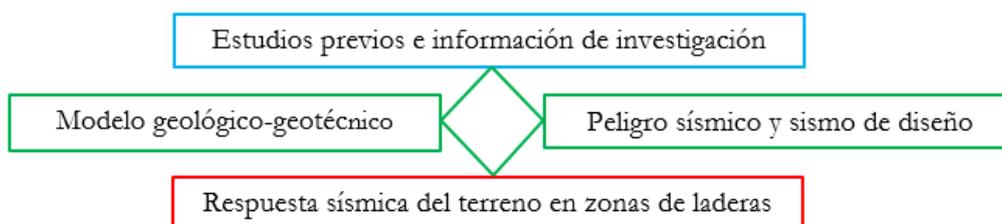


Figura 2. Marco lógico de actividades para la investigación

Con el objetivo de determinar los efectos de la amplificación topográfica en la respuesta sísmica del terreno en zonas de laderas se realizó la caracterización geotécnica de los suelos para conocer el comportamiento dinámico de estos materiales ante cargas cíclicas, luego se realizó modelos de respuesta sísmica bidimensional de propagación de ondas implementado en el programa de elementos finitos Quake/W. Para el análisis de respuesta sísmica del suelo se utilizó el modelo lineal equivalente que se describe a continuación.

Modelo lineal equivalente

Este modelo de comportamiento de suelo ante cargas cíclicas, se desarrolló para aproximar el comportamiento esfuerzo-deformación no lineal del suelo. El módulo de corte G y la relación de amortiguamiento, son determinados debido a que producen la misma pérdida de energía en un solo ciclo como el bucle de histéresis real, tal como se muestra en la figura 3. Ya que el nivel de deformación calculado depende de los valores de las propiedades lineales equivalentes, se requiere un proceso iterativo para asegurar que las propiedades usadas en el análisis son compatibles con el nivel de deformación calculado en todas las capas. La hipótesis fundamental del método lineal equivalente, es que la respuesta no lineal puede ser aproximada de manera satisfactoria por un modelo lineal elástico amortiguado si las propiedades del modelo son escogidas apropiadamente (Kramer, 1996).

Modelo lineal equivalente: análisis bidimensional por elementos finitos (2D)

Un análisis por elementos finitos consiste en dividir un problema (un medio continuo) en una serie de subdominios denominados elementos finitos, donde cada uno de estos elementos está definido a su vez por una serie de puntos llamados nodos. Una vez dividido el problema se realizan ecuaciones de equilibrio, compatibilidad y relaciones constitutivas a cada elemento y se construye un sistema de ecuaciones. Con el sistema de ecuaciones resuelto se tiene el compor-

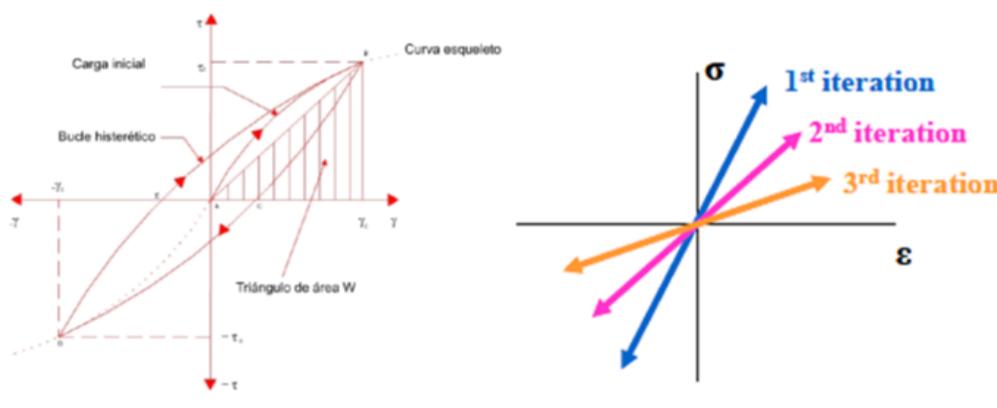


Figura 3. Histéresis esfuerzo-deformación del modelo lineal equivalente

tamiento de cada elemento y se puede reconstruir el comportamiento del problema como un todo (Reyes, 2015).

Análisis de respuesta sísmica con Quake/W

Quake/W es un programa que es parte del software GeoStudio de la compañía Geo-Slope International. Este programa realiza un análisis dinámico o análisis sísmico de estructuras geotécnicas sometidas a terremotos, mediante un análisis bidimensional por el método de elementos finitos (Geo-Slope, 2014). Un análisis de elementos finitos se basa en tres aspectos fundamentales, la discretización de los elementos, la definición de las propiedades de los materiales y la asignación de condiciones de frontera. La discretización se encarga de definir la geometría, áreas y volúmenes, además de construir la malla de elementos finitos. En Quake/W, una vez construido el modelo numérico, se procede a aplicar un registro sísmico de aceleraciones al problema (Reyes, 2015).

Modelo geológico geotécnico

En la figura 4 se muestra el modelo geométrico 2D del modelamiento geológico-geotécnico realizado en el Quake/W. Para el análisis se ha utilizado mallas con elementos triangulares, y el criterio para el dimensionamiento del modelo ha sido el de replicar en el programa la topografía del terreno con las propiedades y parámetros geotécnicos y dinámicos del perfil estratigráfico obtenido en la investigación.

Evaluación de efectos de amplificación topográfica del suelo debidos a la respuesta sísmica en laderas de las urbanizaciones Shancayán y Nueva Esperanza de la ciudad de Huaraz en el año 2018

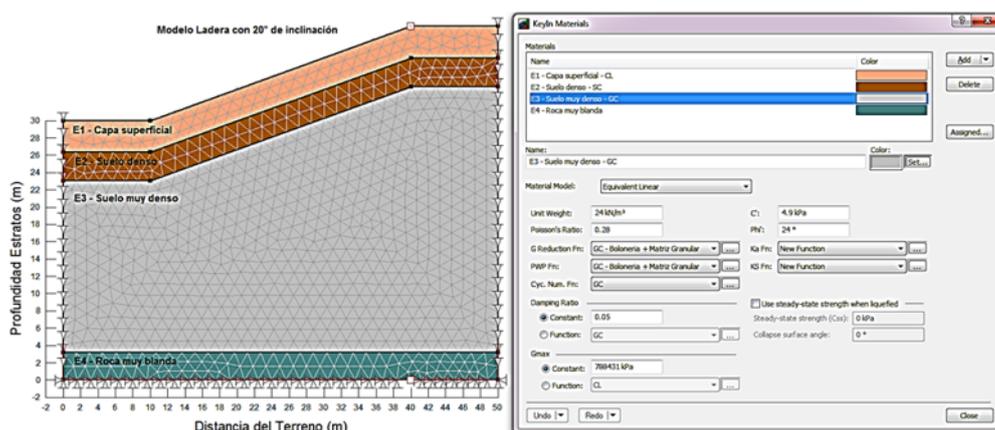


Figura 4. Perfil estratigráfico obtenido para el modelo geológico-geotécnico 2D en laderas
Modelamiento y análisis de respuesta sísmica

En la figura 5 se muestra el modelamiento realizado para cada perfil estratigráfico y el análisis de respuesta sísmica; el análisis se ha realizado para condiciones de terreno de pendiente plana, con 10° de inclinación, con 20° de inclinación y con 30° de inclinación; para luego evaluar y comparar los resultados.

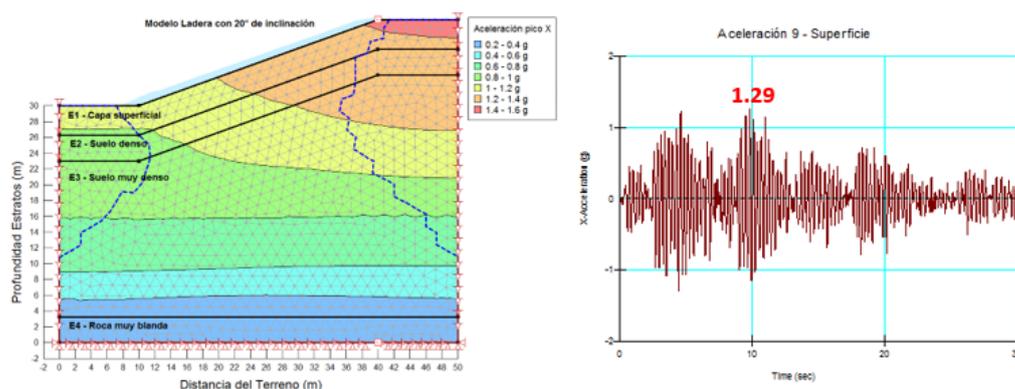


Figura 5. Modelamiento y análisis de respuesta sísmica en laderas

RESULTADOS

En la figura 6, se tienen los resultados del espectro normalizado de aceleraciones, donde se muestra la amplificación topográfica sísmica para cada modelo geológico-geotécnico 2D de perfil es-

tratigráfico propuesto en terreno plano, laderas con 10° de inclinación, laderas con 20° de inclinación y laderas con 30° de inclinación. En los resultados se indican la aceleración en la base del terreno, la aceleración en la superficie, la amplificación de aceleraciones para cada tipo de terreno y la amplificación topográfica sísmica.

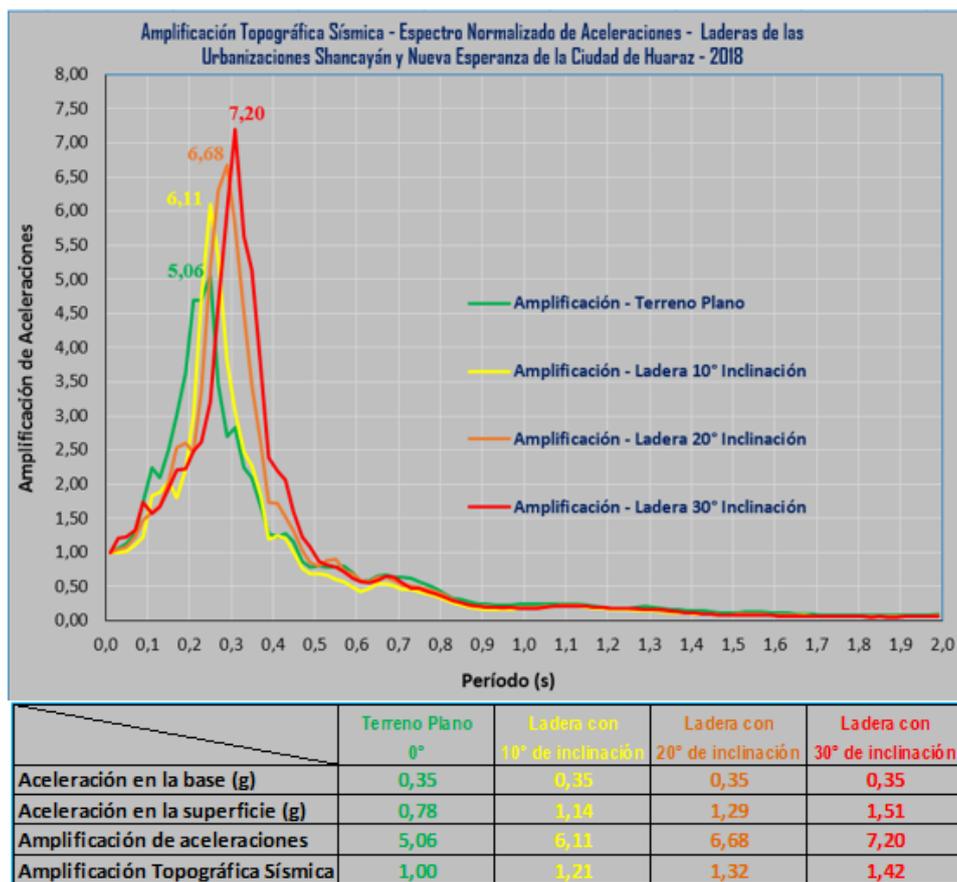


Figura 6. Resultados de espectros de aceleraciones y la amplificación topográfica sísmica. Finalmente, en la figura 7, se presenta el mapa de zonificación de la respuesta sísmica del suelo obtenido debido a la amplificación topográfica sísmica, donde se aprecian los grados de amplificación topografía sísmica de acuerdo a las pendientes de la superficie del terreno en el área de estudio.

Evaluación de efectos de amplificación topográfica del suelo debidos a la respuesta sísmica en laderas de las urbanizaciones Shancayán y Nueva Esperanza de la ciudad de Huaraz en el año 2018

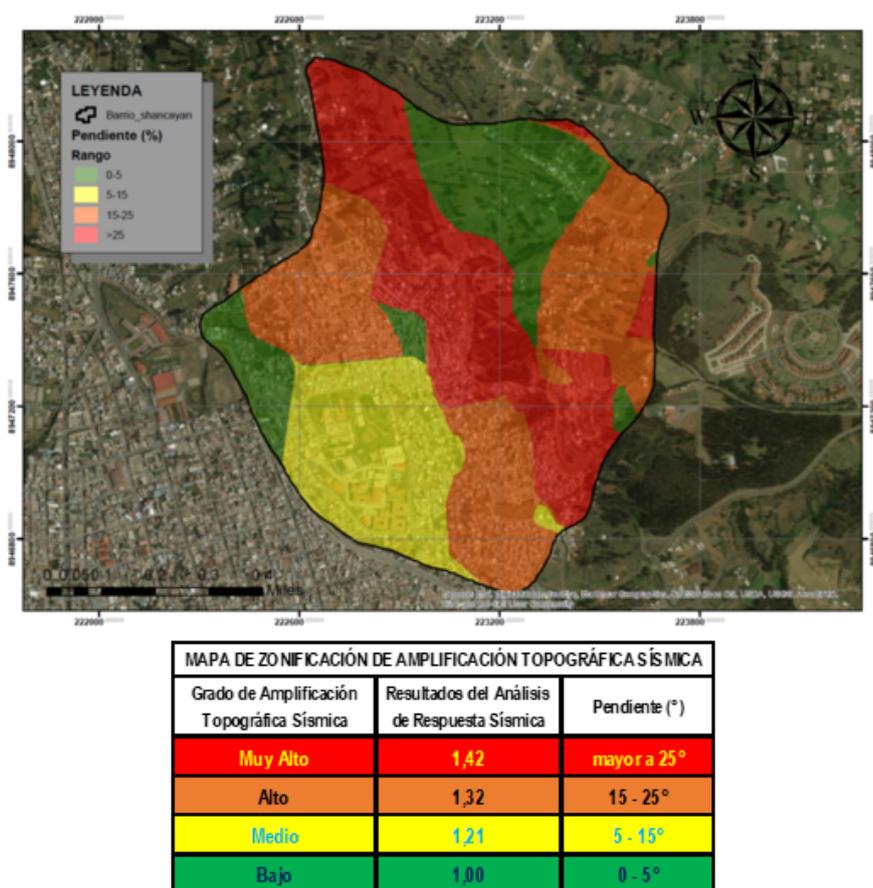


Figura 7. Resultados de zonificación de la amplificación topográfica sísmica

DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos se evidencia que los efectos de la amplificación topográfica sísmica son considerables y aumentan a mayor pendiente del terreno, está amplificación topográfica se produce debido a la respuesta sísmica del terreno en zonas de laderas y tiene un efecto directo en el comportamiento sismorresistente de las edificaciones, los cuales se contrastan con el estudio realizado por (INGEOMINAS, 1999), donde se concluye que se presentó una gran amplificación sísmica por geometría del talud y forma de los valles entre laderas como principales efectos locales del movimiento sísmico; y se correlacionan con el estudio realizado por Rodríguez (2015), donde concluye que el comportamiento dinámico de los estratos del terreno más superficiales es crítico en la amplificación dinámica de la respuesta sísmica, y los principales factores de dicha amplificación están en función del tipo de suelo y la topografía.

Del análisis de la respuesta sísmica para el modelo 2D, nos muestra que los valores de aceleraciones tiempo historia se amplifican en la superficie de 0,35g en la base a 0,78g en terreno plano, a 1,14g en ladera con 10° de inclinación, a 1,29g en ladera con 20° de inclinación y a 1,51g en ladera con 30° de inclinación; además obteniéndose de los resultados que el espectro normalizado de aceleraciones presenta una amplificación sísmica de 5,06 en terreno plano, de 6,11 en laderas con 10° de inclinación, de 6,68 en laderas con 20° de inclinación y de 7,20 en laderas con 30° de inclinación. Esta amplificación sísmica es el resultado del modelo geológico-geotécnico obtenido para los perfiles estratigráficos del área de estudio, y se correlacionan con el estudio presentado por [Herrera \(2013\)](#), donde concluye que los resultados de la evaluación de amplificación sísmica en laderas en campo libre mostraron un claro incremento de la máxima aceleración en superficie al aumentar la inclinación de la ladera.

De los resultados de la amplificación topográfica sísmica para el área de estudio tenemos valores de: 1,00 en terreno plano, 1,21 en laderas con 10° de inclinación, 1,32 en laderas con 20° de inclinación y 1,42 en laderas con 30° de inclinación; estos resultados se correlacionan con el estudio realizado por [Silva \(2015\)](#), donde concluye que en las laderas de los Barrios Miraflores y Buenos Aires los valores de la relación de amplificación varían de 1,1 a 1,5, y que existe una gran variación de las amplificaciones en este sector, debido a los cambios topográficos que presenta esta zona de la comuna 14.

CONCLUSIONES

De la evaluación realizada de la respuesta sísmica en terreno de zonas de laderas en las urbanizaciones Shancayán y Nueva Esperanza de la ciudad de Huaraz, se concluye de los resultados que los efectos de la amplificación topográfica sísmica son considerables y aumentan a mayor pendiente del terreno. La amplificación topográfica se produce debido a la respuesta sísmica del terreno en zonas de laderas y tiene un efecto directo en el comportamiento sismorresistente de las edificaciones.

De los trabajos de campo y laboratorio se han determinado las propiedades geotécnicas y dinámicas del terreno en zonas de laderas y así se determinó el modelo geológico-geotécnico para los perfiles estratigráficos obtenidos, y esta ha sido calibrado adecuadamente mediante el análisis bidimensional (2D), mostrándose que esta afecta directamente la evaluación de la respuesta

sísmica y la obtención de la amplificación topográfica sísmica. El análisis bidimensional (2D) aplicado al modelo geológico-geotécnico obtenido para los perfiles estratigráficos para los terrenos en zonas de laderas, caracteriza adecuadamente el comportamiento sísmico del terreno, y por lo tanto se logra resultados más confiables y reales para la evaluación de la respuesta sísmica del suelo, al aplicarse en este el modelo de análisis lineal equivalente mediante el uso del método de elementos finitos. Se han determinado para las aceleraciones máximas en la superficie, valores de 0,78g en terreno plano, 1,14g en laderas con 10° de inclinación, 1,29g en laderas con 20° de inclinación y 1,51g en laderas con 30° de inclinación; también se ha determinado los espectros de respuesta, obteniéndose 0,41 en terreno plano, 0,72 en laderas con 10° de inclinación, 0,84 en laderas con 20° de inclinación y 0,94 en laderas con 30° de inclinación; estos resultados nos indican que en suelos en terreno de laderas que presentan condiciones geológicas y geotécnicas más desfavorables, se produce una mayor amplificación y se concluye que la amplificación topográfica sísmica producida en terreno de laderas es mayor que en terreno plano y va aumentando a mayor pendiente. De los resultados de la amplificación topográfica sísmica tenemos valores de 1,00 en terreno plano, 1,21 en laderas con 10° de inclinación, 1,32 en laderas con 20° de inclinación y 1,42 en laderas con 30° de inclinación, con los cuales se han determinado las zonas de amplificación topográfica sísmica y se ha elaborado el mapa de zonificación de la amplificación topográfica, lo cual nos muestra las áreas según su grado de amplificación de acuerdo a los resultados obtenidos del análisis de respuesta sísmica del suelo; concluyéndose que en el área de estudio se presentan zonas con grado muy alto en pendientes mayores a 25°, zonas con grado alto en pendientes entre 15° a 25°, zonas con grado medio en pendientes entre 5° a 15° y zonas con grado bajo en pendientes menores a 5°.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ansal, Atila. 2004. Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation. Estambul: Springer Science & Business Media.
- Figueras, Sara y Macau, Albert. 2012. Caracterización de efectos sísmicos locales en la ciudad de Lorca. Barcelona: Instituto Geológico de Catalunya.
- García, María. 2008. Metodología para la evaluación de la peligrosidad de deslizamientos inducidos por terremotos. Tesis de doctorado, Universidad de Alcalá, Madrid, España.

Reynaldo Reyes Roque, Rubén Aranda Leiva y Raul Castillejo Melgarejo

Geo-Slope International Ltd. 2014. Dynamic modeling with QUAKE/W 2012. Calgary: <www.geoslope.com>[Consulta: 08 – 11 – 2019].

Herrera, Leonardo. 2013. Evaluación de la interacción dinámica suelo-estructura de edificaciones construidas en ladera. Tesis de Magister, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

INGEOMINAS. 1999. Estudio de amenaza sísmica en los 26 municipios del Eje Cafetero, afectados por el sismo del 25 de enero de 1999. Armenia: Universidad del Quindío.

Kramer, Steven. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice Hall.

Reyes, Reynaldo. 2015. Evaluación de la respuesta sísmica local de suelos blandos en la ciudad de Huaraz. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Federico Villareal, Lima, Perú.

Rodríguez, David. 2015. Caracterización sísmica de un emplazamiento. Tesis de master, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Silva, Miguel. 2015. Evaluación de efectos de amplificación topográfica debidos a eventos sísmicos en las laderas de la Comuna 14 en la ciudad de Bucaramanga. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Solans, David. 2014. Consideraciones para evaluar la amplificación topográfica en 3 dimensiones. Santiago: ARCADIS Chile.

Fecha de recepción: 12/11/2019

Fecha de aceptación: 19/05/2020

Correspondencia

Reynaldo Reyes Roque

reynaldoreyesr@hotmail.com