



HAL
open science

EVALUACIÓN DE DESLIZAMIENTOS SÍSMICOS MEDIANTE EL CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS PERMANENTES CONSIDERANDO LOS EFECTOS TOPOGRÁFICOS EN LA PROPAGACIÓN DE ONDA

Exneyder Montoya-Araque, Fernando Lopez-caballero, Silvana
Montoya-Noguera

► **To cite this version:**

Exneyder Montoya-Araque, Fernando Lopez-caballero, Silvana Montoya-Noguera. EVALUACIÓN DE DESLIZAMIENTOS SÍSMICOS MEDIANTE EL CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS PERMANENTES CONSIDERANDO LOS EFECTOS TOPOGRÁFICOS EN LA PROPAGACIÓN DE ONDA. III Conferencia Interamericana de Gestión del Riesgo de Desastres y Adaptación al Cambio Climático, May 2024, Manizales, Colombia. hal-04587171

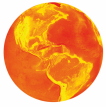
HAL Id: hal-04587171

<https://hal.science/hal-04587171>

Submitted on 24 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



EVALUACIÓN DE DESLIZAMIENTOS SÍSMICOS MEDIANTE EL CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTOS PERMANENTES CONSIDERANDO LOS EFECTOS TOPOGRÁFICOS EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS

Exneyder A. Montoya-Araque^{1,2,*}, Fernando Lopez-Caballero¹, Silvana Montoya-Noguera²

¹Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, 8-10 rue Joliot Curie, 91190 Gif-Sur-Yvette, France

²Universidad EAFIT. Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería – Área de Territorios y Ciudades, Medellín, Colombia.

*eamontoyaa@eafit.edu.co – eamontoyaa@gmail.com

Resumen: *Los deslizamientos sísmicos son movimientos en masa detonados cuando la acción de las vibraciones cerca de la superficie del terreno es suficientemente fuerte como para superar la resistencia de los materiales, produciendo así el fenómeno de inestabilidad. Los análisis de deslizamientos sísmicos resultan relevantes especialmente en zonas montañosas y sísmicamente activas; al ser un fenómeno amenazante, estos deben ser estudiados y zonificados para su eventual inclusión en la evaluación del riesgo de desastres. Entre los métodos físicos para la evaluación de deslizamientos detonados por sismo se encuentra uno basado en el desempeño del talud ante la carga dinámica del sismo; este se conoce como el método del bloque deslizante de Newmark, y consiste en la estimación de los desplazamientos permanentes de la masa inestable al modelarla equivalentemente como un bloque sobre una superficie inclinada el cual se desplaza cuando se excede la resistencia en la base debido a picos de aceleración por encima de un cierto valor crítico. Normalmente los desplazamientos permanentes se evalúan a partir de registros de aceleración medidos puntualmente en un instrumento, y dichas aceleraciones se aplican de la misma manera sobre toda una zona de estudio despreciando efectos locales en la propagación de ondas como los topográficos. En el presente estudio se realizaron simulaciones 3D a gran escala de propagación de ondas sísmicas en modelos con y sin topografía usando un solucionador numérico (SEM3D) basado en el Método de los Elementos Espectrales con el fin de evaluar el efecto topográfico en las amplitudes de la onda; además, se utilizó un reciente desarrollo (pyNewmarkDisp) en el cual se implementó el método directo de Newmark para el cálculo de desplazamientos permanentes en dominios espaciales. La integración de ambos desarrollos permitió adaptar un marco de análisis SEM-Newmark para evaluar el efecto topográfico en las aceleraciones y la consecuencia de esto en el cálculo de los desplazamientos permanentes para dos geoformas canónicas: un cerro y una cuenca. Lo anterior evidenció la necesidad de incluir los efectos topográficos en la evaluación de la estabilidad de laderas durante eventos sísmicos al encontrar diferencias notables de los desplazamientos permanentes al considerar o no a la topografía durante las simulaciones; esto traería como consecuencia una mejora en la forma en la que se zonifica la amenaza sísmica de deslizamientos.*

1 Introducción

Los deslizamientos sísmicos son uno de los posibles eventos en amenazantes que ocurren como fenómenos en cascada dentro de zonas tectónicamente activas cuando ocurre un sismo (Fan *et al.*, 2019; Dahal *et al.*, 2023). Al igual que cualquier otro fenómeno amenazante, los deslizamientos detonados por sismos pueden potencialmente acarrear consecuencias negativas en términos de fatalidades y pérdidas económicas, por lo tanto, la reducción de dichas consecuencias motiva el avance en el estudio y entendimiento de estos fenómenos amenazantes (Wasowski, Keefer and Lee, 2011).

El análisis de estabilidad sísmica de taludes y laderas se realiza tradicionalmente mediante uno de tres aproximaciones (Matasovic, 1991; Jibson, 2011; Wasowski, Keefer and Lee, 2011). El clásico análisis seudo estático (I), el cual es probablemente el más simplificado entre los tres; este se basa en el método de equilibrio límite, en el cual se representa la carga sísmica mediante una fuerza equivalente permanente la cual es estimada a partir de una de las medidas de intensidad sísmica esperadas, usualmente la aceleración máxima en superficie (PGA, del inglés *peak ground acceleration*). El análisis esfuerzo-deformación (II), el cual es probablemente el más robusto en términos de la física del fenómeno, pero a su vez es el más demandante en términos computacionales y de calidad de la información requerida; en este se resuelve la relación constitutiva entre esfuerzos y deformaciones para la aplicación de la carga dinámica del sismo mediante métodos numéricos como el de los elementos finitos. Finalmente, el análisis de desplazamientos permanentes, u_p , (III) basado en el bloque deslizante de Newmark (1965), el cual es un método que yace en medio de los dos anteriormente descritos al representar la potencial masa inestable como un bloque apoyado en una superficie inclinada, el cual se desplaza cada vez que se excede un valor de aceleración crítica (a_y) a la cual se supera la resistencia en la base del bloque; el desplazamiento acumulado por el bloque representaría por lo tanto el de la masa inestable en el talud o ladera bajo efecto sísmico.

El método seudo estático se limita al resolver únicamente el factor de seguridad bajo consideraciones de la estática, incluso reduciendo la carga dinámica a una fuerza permanente y constante, como consecuencia, no provee ninguna solución para deformaciones ni desplazamientos; por el contrario, el método de esfuerzo-deformación puede ser impráctico a escala regional debido a la demanda computacional para su solución, potenciada incluso si se piensa en análisis probabilistas necesarios para la evaluación de la amenaza sísmica de deslizamientos. Es por eso por lo que la estimación de u_p resulta pertinente como criterio de desempeño de las laderas para la evaluación espacial de deslizamientos detonados por sismos.

El cálculo de u_p se puede realizar bien sea mediante el método directo que consiste en la doble integral de los picos de aceleración en exceso, es decir, las aceleraciones del sismo que exceden a_y , o mediante el uso de modelos simplificados basados en correlaciones empíricas que son función de medidas de intensidad sísmicas (IM, del inglés *Intensity Measure*) como, por ejemplo, el valor de PGA, velocidad pico en superficie (PGV), la Intensidad de Arias (I_A), entre otras (Rathje and Antonakos, 2011). Por su simplicidad, los modelos empíricos son normalmente implementados en la evaluación regional de deslizamientos sísmicos (Chen and Wang, 2023), sin embargo, el método directo requiere un esfuerzo computacional mayor o el uso de software optimizado para este fin.

Independiente del método para obtener la distribución espacial de u_p en un terreno de interés, se necesita conocer las aceleraciones en la superficie del terreno (método directo) o las medidas de intensidad que las represente (métodos simplificados). No obstante, dentro de los varios efectos topográficos en la propagación de ondas sísmicas se espera en general una amplificación de las aceleraciones y las IMs cerca de las crestas de las elevaciones topográficas, lo cual parece estar relacionado con una mayor ocurrencia de deslizamientos sísmicos cerca de las crestas en terrenos montañosos tal y como ha sido reportado por varios estudios (Peng *et al.*, 2009). Partiendo de lo anterior como hipótesis, se esperaría que en zonas topográficas con amplificación de las IMs se tenga una mayor cuantificación de u_p que termine de relacionar los efectos topográficos en las ondas sísmicas con la ocurrencia de deslizamientos en zonas de amplificación.

Una limitación más para estudiar la hipótesis planteada es conocer las aceleraciones en toda la superficie del terreno de interés; normalmente se tienen unos pocos registros instrumentales que pueden estar separados entre sí incluso decenas de kilómetros. Para solventar esto, existen dos posibles alternativas estudiadas y comparadas por Chen y Wang (2023). La primera y más simplificada consiste en la estimación de IMs mediante ecuaciones de predicción empíricas o mediante interpolación local de registros instrumentales. La segunda y más robusta consiste en la modelación física del problema de propagación de ondas desde la fuente hasta el registro de aceleraciones en superficie. El primer método podría no capturar los efectos topográficos que pretenden ser evaluados en el análisis de deslizamientos detonados por sismos, por lo que el segundo método resulta ideal en este caso, no obstante, se requiere hacer un esfuerzo en términos de recursos computacionales, ya que estos modelos normalmente consisten en simulaciones a gran escala en las que se resuelve la ecuación de propagación de onda mediante métodos numéricos.

El presente estudio busca evaluar el efecto topográfico de dos geoformas canónicas (geometrías simplificadas idealizadas que pueden ser evaluadas analíticamente) en la estimación de desplazamientos permanentes para la evaluación de deslizamientos sísmicos mediante la integración de simulaciones tridimensionales de propagación de ondas a gran escala y el cálculo de la distribución espacial de u_p con el método directo de Newmark. El documento ha sido estructurado de la siguiente manera: inicialmente se desarrolla la metodología en la que describen brevemente los modelos utilizados tanto para las simulaciones de propagación de onda como para el cálculo espacial de u_p ; posteriormente se verifican los resultados numéricos del simulador con especial énfasis en las amplificaciones topográficas comparándolo con resultados de soluciones analíticas. Luego de esto se presentan los resultados de desplazamientos permanentes para escenarios geotécnicos hipotéticos de las geoformas validadas en la sección anterior y se cuantifica el efecto de la amplificación topográfica en dichos resultados. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones sobre caminos por donde orientar investigaciones futuras.

2 Metodología

El presente trabajo sigue en gran medida los marcos de análisis SEM-Newmark propuestos por Huang *et al.* (2020) y por Chen, Huang, y Wang (2023), y que siguen la tendencia otros estudios donde se integran las simulaciones a gran escala con el cálculo de desplazamientos permanentes para la evaluación de deslizamientos sísmicos (Peng *et al.*, 2009; Chen, Wang and Huang, 2020; Guerra Ospino, 2020; Dahal *et al.*, 2023). Particularmente, la metodología utilizada se representa en la Figura 1; esta consiste en cuatro componentes que interactúan entre sí. A continuación, se describen de manera general cada una de ellas.

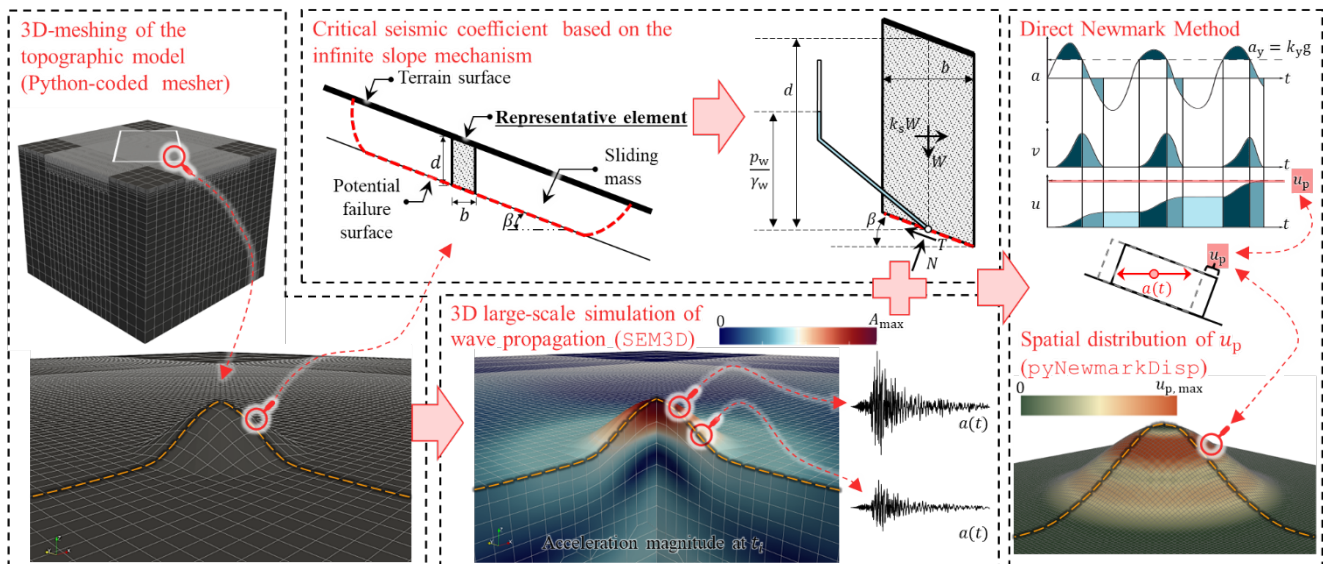


Figura 1. Metodología de trabajo. Adaptación del marco de análisis SEM-Newmark.

2.1 Modelación de propagación de ondas

La simulación a gran escala se realiza en un dominio tridimensional en el cual se resuelve el problema de propagación de onda haciendo uso del solucionador de código abierto `SEM3D` presentado por Touhami et al. (2022), el cual implementa el Método de los Elementos Espectrales (SEM, del inglés *Spectral Element Method*) basado en el trabajo original de Komatitsch (1997), Komatitsch y Vilotte (1998) y Komatitsch, Tromp, y Vilotte (1998).

2.2 Condiciones de contorno

Normalmente, las caras laterales e inferior del dominio son modeladas como bordes absorbentes tipo PML (del inglés *Perfectly Matched Layer*) para imponer un decaimiento a las ondas y evitar reflexiones hacia el medio elástico (Festa and Vilotte, 2005). Por el contrario, la cara superior del dominio se modela como una superficie libre, ya que es de interés, por ejemplo, la interacción de las ondas con superficies irregulares como podría ser la topografía de un terreno montañoso.

2.3 Mallado

El solucionador requiere que el dominio sea representado por una malla de elementos hexahedrales, la cual se genera localmente en código Python, haciendo uso de múltiples librerías de computación científica y de visualización requiriendo únicamente del Modelo de Elevación Digital (DEM, del inglés *Digital Elevation Model*). Para reducir el tiempo de ejecución, la malla tiene un agrandamiento del tamaño de elementos en profundidad mediante una técnica conocida como *doubling*, en la cual un elemento de mayor tamaño subyace 4 o 9 elementos de menor tamaño con aristas o vértices coincidentes, reduciendo considerablemente el número de elementos y, por ende, de grados de libertad. Lo anterior, aprovechando que el solucionador funciona para mallas estructuradas como no estructuradas.

2.4 Cálculo espacial de desplazamientos permanentes

El solucionador provee las trazas de aceleraciones sintéticas en puntos especificados sobre la superficie del terreno, no obstante, para que estas sean usadas para el cálculo espacial de u_p se necesita conocer la distribución espacial del coeficiente de aceleración crítica ($k_y = a_y/g$), a partir de los cuales se determinan los picos de aceleración en exceso que se integran dos veces para determinar u_p . El cálculo de k_y es función del mecanismo de falla considerado y del criterio de rotura. Considerando que la mayoría de los deslizamientos detonados por sismos son relativamente superficiales (Keefer 2002; Jibson 2011, 2013), el mecanismo del talud infinito es una alternativa viable para determinar k_y . El procedimiento consta de evaluar pseudo estáticamente el elemento representativo de la masa inestable y determinar el valor de $k_s = k_y$ que hace que el factor de seguridad alcance el valor límite de estabilidad ($FS = 1.0$); dicho cálculo tiene solución analítica si se trabaja con un criterio de falla lineal Mohr-Coulomb, o iterativo si se opta por un criterio de falla no lineal más realista, como por ejemplo uno exponencial (Lade, 2010); este último podría ser más conveniente para mecanismos de falla superficiales que son altamente sensibles al valor del intercepto de la envolvente de falla lineal (Montoya-Araque and Montoya-Noguera, 2023).

Una vez se tiene la distribución tanto de las aceleraciones en superficie como del coeficiente de aceleración crítico, solo se requiere aplicar el método directo de Newmark para calcular la distribución espacial en superficie de u_p . Anteriormente, en lugar del método directo de Newmark, se optaba por modelos simplificados debido a que el primero se consideraba laborioso, impráctico, e inapropiado para análisis regionales (Ji et al. 2022; Jibson, Harp, y Michael 2000). Sin embargo, en el presente estudio se hace uso de `pyNewemarkDisp`, un programa de código abierto en Python optimizado para aplicar el método directo de Newmark en dominios espaciales a escalas regionales con tiempos de ejecución razonables incluso en computadores de uso cotidiano (Montoya-Araque, Montoya-Noguera and Lopez-Caballero, 2024).

3 Validaciones numéricas

En la sección anterior se describió el marco de análisis SEM-Newmark adaptado para el presente estudio. No obstante, al ser `SEM3D` una implementación de un método numérico, es necesario validar los resultados que este

produce. A continuación, se presentan las validaciones numéricas de los resultados obtenidos por SEM3D para el problema de propagación de onda, las cuales son de dos tipos, la primera corresponde a la exactitud de la solución de desplazamientos como función del tiempo, y la segunda a la amplitud de los espectros de desplazamiento en superficie los cuales amplifican o reducen aquellos de la onda incidente por la interacción con la topografía.

3.1 Desplazamientos como función del tiempo

Para validar la exactitud de los resultados de SEM3D se obtuvo solución para los desplazamientos en las tres direcciones y se comparó contra los resultados de SPECFEM3D, uno de los solucionadores insignia igualmente basado en SEM, desarrollado a partir del trabajo de Komatitsch y Vilotte (1998) y colaboradores posteriores. Adicionalmente, ambas soluciones numéricas se comparan contra la solución analítica para una fuente sísmica puntual tipo *double-couple* presentada por Aki y Richards (2002) para un medio isótropo, elástico e infinito.

La fuente puntual corresponde a una dislocación de corte τ_{zx} en un sistema cartesiano en \mathbb{R}^3 donde los versores \mathbf{i} , \mathbf{j} , y \mathbf{k} , coinciden con el Este, Norte y zenit geográficos respectivamente, es decir que la dislocación ocurre en el plano horizontal. La función temporal de la fuente es de tipo Quasi-Heaviside presentada en la Eq. 1.

$$f(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t}{t_{\text{hdur}}} \right) \right) \tag{1}$$

donde $\operatorname{erf}z$ es la función error con argumento $z = t/t_{\text{hdur}}$, donde $t_{\text{hdur}} = 1.2285$ es la duración media. Se realizaron simulaciones de 10 s de duración, en un dominio cúbico de 32 km de lado centrado en el origen, con un mallado estructurado definido por elementos cúbicos de 2 km de lado y 5 puntos de integración en cada dirección; además, se definieron capas PML de un elemento en las seis caras para simular un medio infinito. El material fue modelado como un medio homogéneo y elástico con densidad $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, velocidades de onda compresional y de corte $V_p = 2000 \text{ m/s}$ y $V_s = 1500 \text{ m/s}$ respectivamente y ubicando la fuente puntual en el origen.

Se definieron varios puntos dentro del dominio, de los cuales se muestran resultados para tres de ellos en cada columna de la Figura 2. Nótese en línea continua la solución analítica y en marcadores las numéricas. En todos los casos y para las tres direcciones se obtuvieron resultados satisfactorios para un nivel práctico de ingeniería, validando de esta manera los resultados del solucionador SEM3D en función del tiempo.

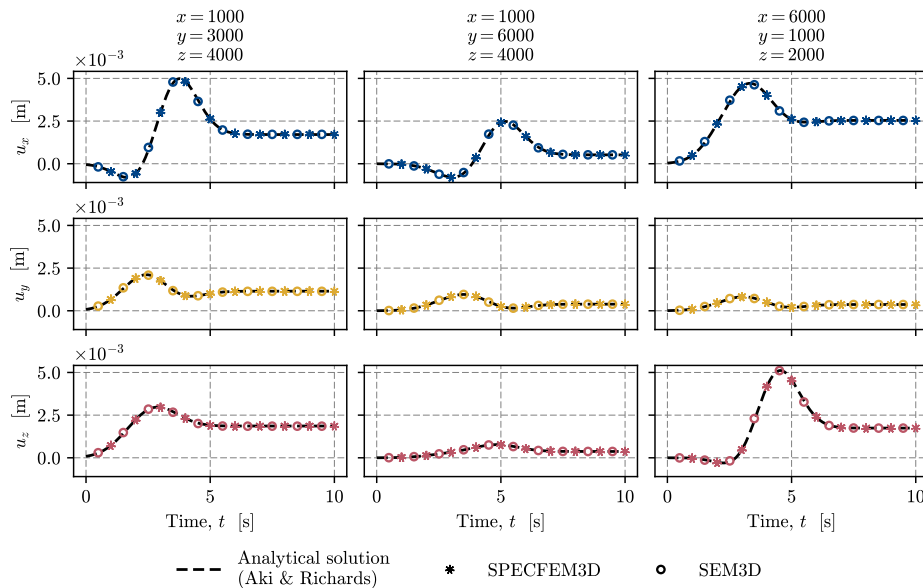


Figura 2. Validación de resultados de SEM3D para la solución de desplazamientos en el dominio del tiempo contra otro solucionador numérico y una solución analítica.

3.2 Amplitud de los espectros de desplazamiento en superficie

Para evaluar los efectos de la topografía en la amplitud de los espectros de desplazamiento en superficie haciendo uso de SEM3D, se reprodujeron dos casos de topografías canónicas con solución (semi-)analítica, los cuales han servido como referentes para otras implementaciones numéricas del problema de propagación de onda. El primer caso corresponde a una elevación topográfica que representaría de manera simplificada una colina o cerro rodeado por un terreno plano; sus elevaciones, z , están definidas matemáticamente por la Eq. 2.

$$z = \begin{cases} h(1 - 3\xi^2 + 2\xi^3), & 0 \leq \xi \leq 1 \\ 0 & \xi > 1 \end{cases} \quad (2)$$

donde $\xi = r^{-1}\sqrt{(x^2 + y^2)}$, siendo $h = 0.5r$ la altura del cerro y r el radio de su base circular. El segundo caso corresponde a una depresión topográfica semiesférica que representaría de manera simplificada un valle o cuenca en medio de un terreno plano; sus elevaciones, z , están definidas matemáticamente por la Eq. 3.

$$z = \begin{cases} -\sqrt{r^2 - x^2 - y^2}, & \sqrt{(x^2 + y^2)} \leq r \\ 0 & \sqrt{(x^2 + y^2)} > r \end{cases} \quad (3)$$

donde r es el radio la semiesfera, y, por ende, $-r$ sería la mínima elevación de la depresión topográfica. En ambos casos, r es la dimensión representativa de ambas geoformas y fue establecida como $r = 100$ m para las dos. La representación gráfica de estas dos topografías canónicas se presenta en el panel superior de la Figura 3.

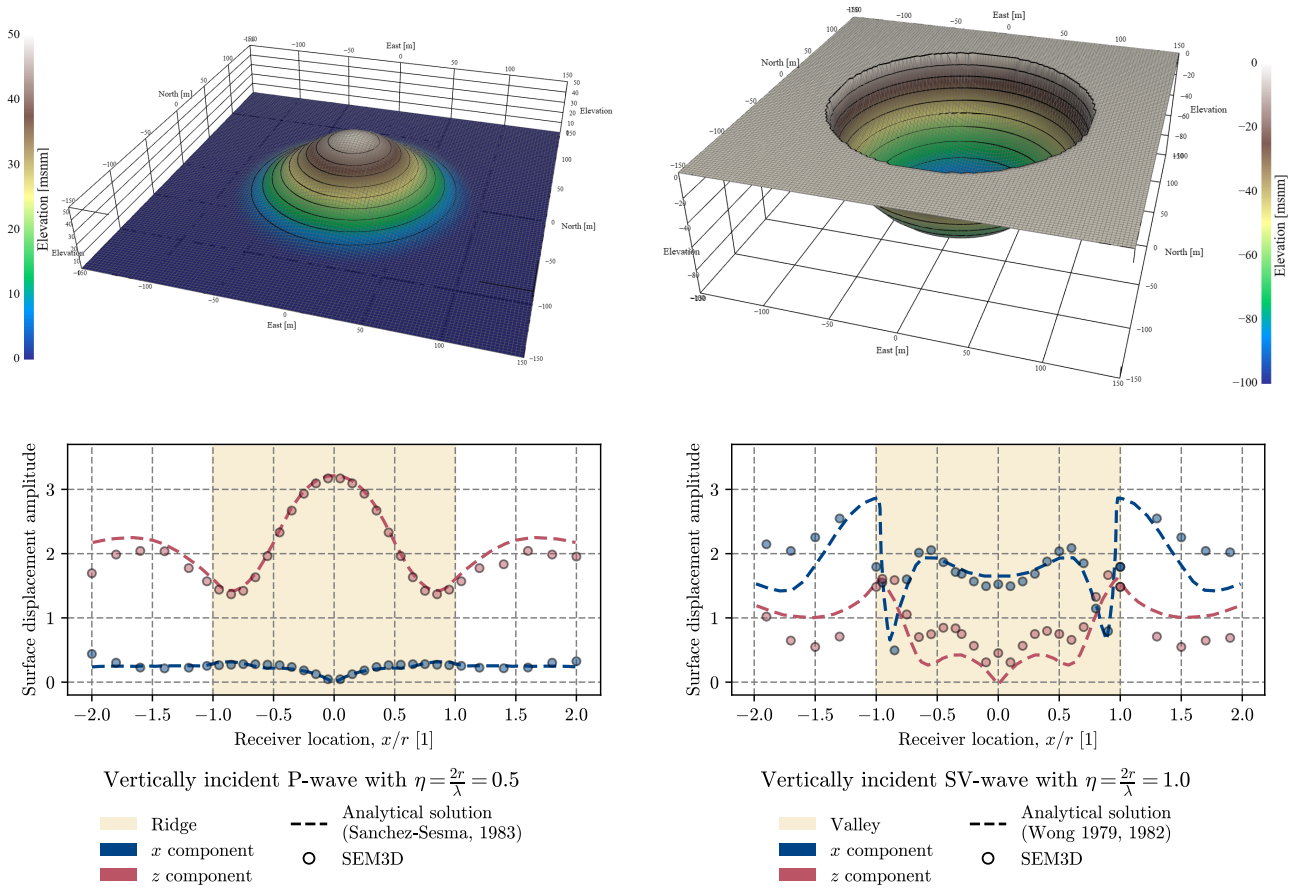


Figura 3. Validación de resultados de SEM3D para amplitud de los espectros de desplazamiento en superficie contra dos soluciones clásicas (semi-)analíticas de topografías canónicas. Izquierda: Caso 1 (cerro); derecha: Caso 2 (valle/cuenca)

En ambos casos, la onda incidente es una onda plana horizontal propagándose verticalmente en dirección vertical ascendente. Para el primero caso es de tipo P, es decir, vibración en el mismo sentido de la dirección de propagación (eje z); para el segundo caso es de tipo SV, es decir, vibración perpendicular a la dirección de propagación (eje x). Ambas ondas planas fueron modeladas en SEM3D como un tendido de fuentes puntuales muy cercanas unas de otras de tal forma que, para una suficiente profundidad y extensión del tendido respecto a una dimensión representativa de la geoforma, por ejemplo, r , el frente de propagación sea efectivamente plano. La profundidad de las fuentes fue variable, garantizando que los frentes de onda arribaran a superficie antes del tiempo total de simulación de 3 s en ambos casos.

El caso del cerro fue comparado contra los resultados de Sanchez-Sesma (1983) quien utilizó un coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$, por lo que se modeló el medio elástico con $V_p = 1000$ m/s y $V_s = 534.4$ m/s; para el caso del valle, los resultados de referencia son los de Wong (1979; 1982), quien utilizó un coeficiente de Poisson $\nu = 0.33$, por lo que se modeló el medio elástico con $V_p = 1000$ m/s y $V_s = 500$ m/s. Las amplitudes de los espectros de desplazamientos se evalúan para una frecuencia adimensional, η , como se describe en la Eq. 4.

$$\eta = \frac{2r}{\lambda} = \frac{2rf}{V} \quad (4)$$

donde λ es la longitud de onda y f la frecuencia de la onda. En los dos casos, la onda incidente se modeló como un pulso de Ricker definido en la Eq. 5, con una frecuencia central $f_c = 2.5$ Hz, por lo que se tienen $\eta = 0.5$ y $\eta = 1.0$ para los dos casos respectivamente.

$$f(t) = (1 - 2\omega)e^{-\omega} \quad (5)$$

$$\omega = (\pi f_c(t - t_0))^2$$

Como resultado final, se obtuvieron los gráficos del panel inferior de la Figura 3. Estos se obtienen calculando la amplitud de los espectros de desplazamiento a la frecuencia objetivo (2.5 Hz) en las trazas sintéticas registradas en superficie a lo largo de la línea $y = 0$. Si la onda incidente tiene una amplitud diferente de uno, las amplitudes en superficie se normalizan por la amplitud de la onda incidente. Se observa entonces que los resultados obtenidos mediante simulación usando SEM3D son congruentes con los de referencia de las soluciones analíticas, siendo más fieles los resultados en el caso del cerro que en el del valle. Las diferencias en este último caso se atribuyen a que originalmente Wong (1979; 1982) derivó sus modelos analíticos para una condición bidimensional de deformación plana, lo que tridimensionalmente equivaldría a un cilindro horizontal infinitamente largo y no a una semiesfera como se modeló en este caso.

4 Efecto topográfico en los desplazamientos permanentes

Los resultados de la sección anterior validaron la aplicabilidad de SEM3D para estudiar el efecto topográfico en la propagación de ondas sísmica. Ahora, es posible dar el paso para evaluar cómo dichos efectos topográficos en las ondas sísmicas afectan el cálculo de los desplazamientos sísmicos con miras a la evaluación de la amenaza sísmica de deslizamientos.

Para esto, se consideraron los mismos dos casos evaluados en la anterior sección. La única diferencia es que, para el caso del cerro, se simuló una onda plana SV al igual que en la validación del valle semiesférico. Este cambio se debe a que en la validación la onda incidente era de tipo P, por lo que su única componente desde la fuente hasta antes de interactuar con la topografía es en el eje z . Si bien al momento de que el frente de onda interactúa con la topografía se dan cambios de modos y aparecen componentes horizontales necesarias para el cálculo de u_p , estas son de muy baja amplitud con respecto a las verticales.

Para las dos geoformas no se definió un valor de coeficiente de aceleración crítico constante para toda la zona, ya que como se explicó anteriormente, este depende de la resistencia al corte del material y del mecanismo de falla considerado. Uno de los atributos del mecanismo es la profundidad a la cual se encuentra la superficie de falla, la cual es variable en el espacio y se ha visto que muestra una relación inversamente proporcional con la pendiente del terreno, aunque depende de muchos otros parámetros del terreno (Catani, Segoni and Falorni,

2010). Se estableció entonces, de forma arbitraria, un modelo simplificado para describir la distribución espacial de k_y como una función de la pendiente del terreno, β , dada por la expresión de la Eq. 6:

$$k_y = 0.4 \exp(-0.025\beta) \tag{6}$$

que indica un decaimiento exponencial de k_y con un máximo valor posible de 0.4. La Figura 4 muestra los resultados de lo anteriormente descrito, constatándose valores mucho más bajos para el caso 2, asociados a las zonas con pendientes subverticales en los bordes superiores de la cuenca, mientras que en el cerro se tienen pendientes máximas del orden de 37° . Una vez se tiene la distribución espacial de k_y y las aceleraciones en superficie como resultado de las simulaciones, es posible proceder con el cálculo de u_p .

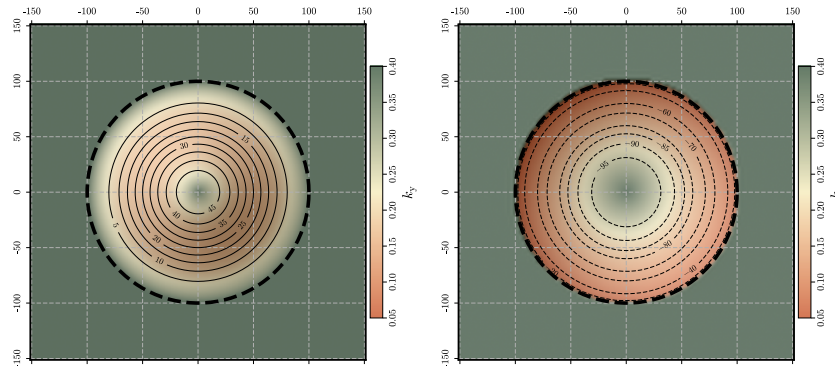


Figura 4. Distribución espacial de k_y . Izquierda: Caso 1 (cerro); derecha: Caso 2 (valle/cuenca)

4.1 Caso 1: Cerro

La Figura 5 muestra tres resultados relacionados con el cálculo de u_p para el primer caso. En el extremo izquierdo se observa la distribución espacial de u_p asumiendo que las aceleraciones evaluadas con el método directo de Newmark no varían espacialmente, esto como resultado de realizar la simulación de propagación de onda en un dominio con la cara libre plana, es decir, sin incluir el efecto topográfico (escenario 1). En el medio, por el contrario, la simulación sí consideró la topografía en la cara libre (escenario 2), por lo que las aceleraciones no son constantes sino variables en superficie, y como consecuencia, se observa visualmente que las magnitudes de u_p difieren entre escenarios, ya que ambas representaciones tienen la misma escala de colores. Adicionalmente, se observa en ambos escenarios que los mayores valores de u_p se intensifican hacia la línea E-W, lo cual es esperado debido al carácter SV de la onda incidente, y que el método directo de Newmark implementado en `pyNewmarkDisp` considera las dos componentes horizontales y determina la aceleración resultante ortogonal a la cara de la ladera.

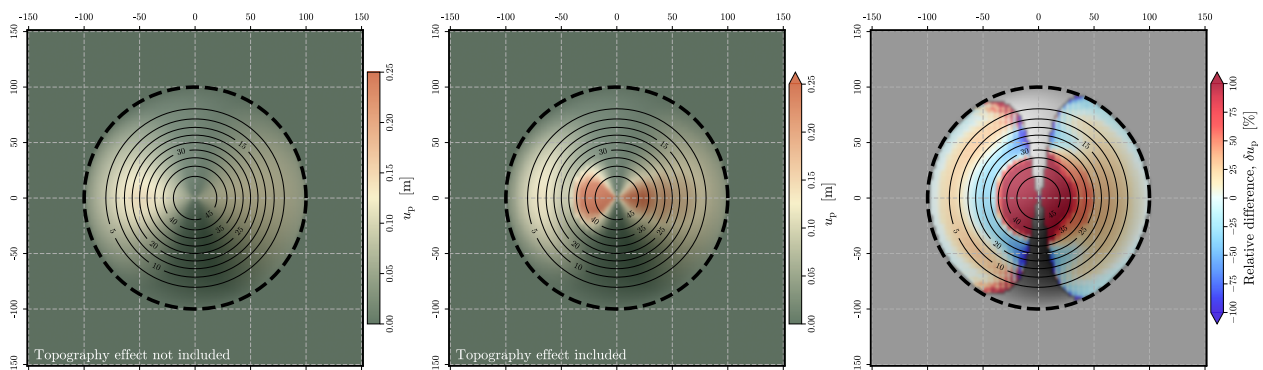


Figura 5. Distribución espacial de u_p – Caso 1 (cerro). Izquierda: efecto topográfico no considerado; centro: efecto topográfico considerado en la simulación de propagación de onda; derecha: diferencias relativas

Los valores máximos para los escenarios 1 y 2 fueron $u_p = 13.7$ cm y $u_p = 39.0$ cm respectivamente, evidenciando puntualmente el efecto topográfico en el valor máximo de u_p , no obstante, una mirada espacial de dicho efecto se presenta en el extremo derecho de la Figura 5 donde se observa a lo largo de todo el dominio las diferencias relativas, δu_p definidas en la Eq. (7), donde el superíndice t hace referencia a los resultados habiendo considerado el efecto topográfico y nt a los resultados donde no fueron considerados.

$$\delta u_p = \frac{u_p^t - u_p^{nt}}{u_p^{nt}} \tag{7}$$

La escala de colores representando δu_p es simétrica y centrada en cero; los tonos rojizos representan áreas donde el efecto topográfico implicó un mayor cálculo de u_p con respecto al caso sin el efecto topográfico y los azules lo contrario. Esto permite identificar inmediatamente las zonas donde el efecto topográfico incrementa o reduce la cuantificación de u_p respecto al caso donde no se considera dicho efecto, resaltando particularmente los mayores incrementos en la cresta del cerro.

4.2 Caso 2: Valle/Cuenca

La Figura 6 muestra los resultados relacionados con el cálculo de u_p para el segundo caso. No obstante, en esta ocasión se evaluó un tercer escenario que consiste en el cálculo de u_p para una aceleración constante en el dominio a partir del registro en un receptor localizado en el fondo de la cuenca. En la columna izquierda de la Figura 6 se tienen los resultados de u_p para las aceleraciones constantes (escenarios 1 y 3), en el medio se tiene el resultado para las aceleraciones variables en superficie por el efecto topográfico (escenario 2), y en la columna derecha se tienen las diferencias relativas del escenario 2 con respecto al 1 y al 3.

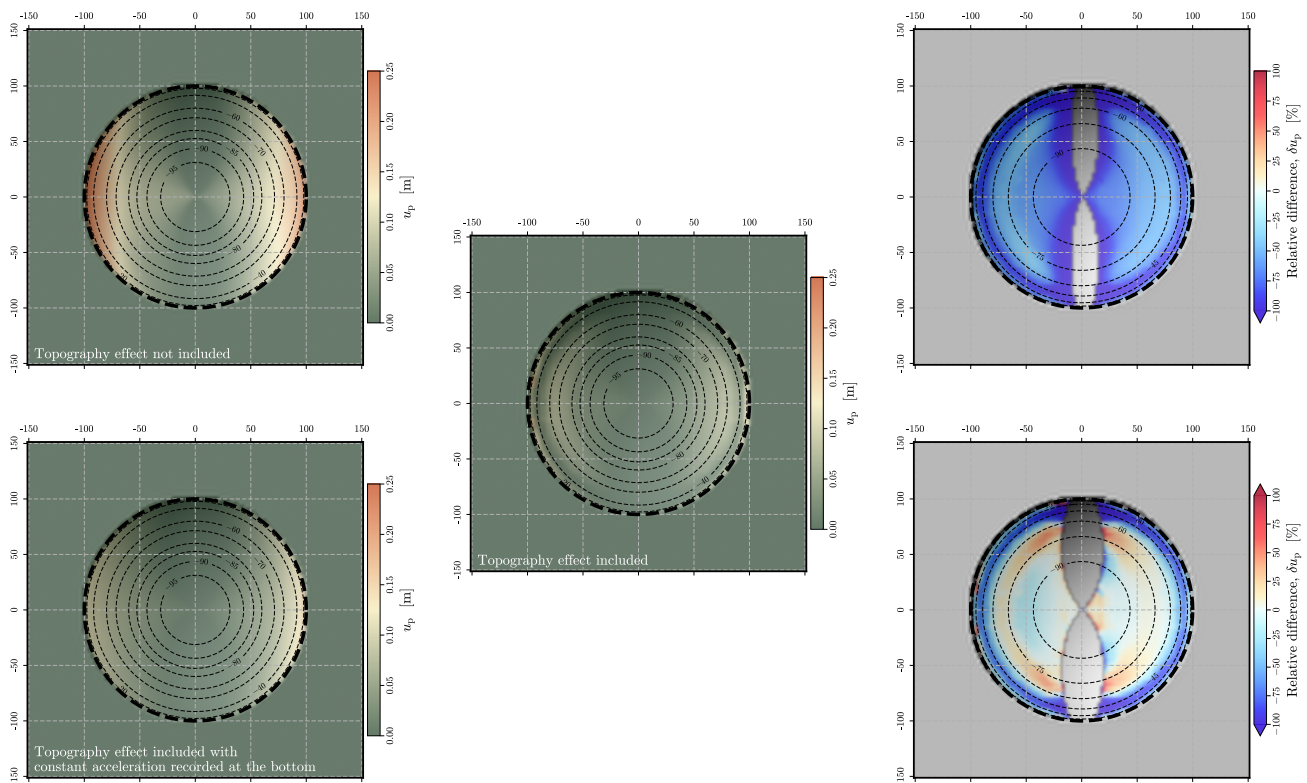


Figura 6. Distribución espacial de u_p – Caso 2 (cerro). Izquierda: efecto topográfico no considerado. Centro: efecto topográfico considerado en la simulación de propagación de onda. Derecha: diferencias relativas. Arriba: receptor de referencia en terreno plano. Abajo: receptor de referencia en el fondo de la cuenca

Los valores máximos para los escenarios 1, 2 y 3 fueron $u_p = 23.8$ cm, $u_p = 18.7$ cm y $u_p = 15.7$ cm respectivamente. Al observar δu_p para los escenarios 1 y 2, se observa que, en general, para esta condición geomorfológica se reducen los desplazamientos permanentes, lo cual es consistente con la reducción en las amplitudes de la onda al interactuar con una topografía de la cuenca respecto a las amplitudes al interactuar con una superficie del terreno plana. Por otro lado, δu_p para los escenarios 3 y 2 evidencia un patrón de intercalación entre incrementos y reducciones de u_p a lo largo de las laderas de la cuenca respondiendo a amplificaciones/reducciones de la amplitud de la onda al interactuar con la geoforma y sus laderas en comparación con la onda que se registra en el fondo de la cuenca.

5 Conclusiones y comentarios finales

Se presentó y validó el simulador numérico de propagación de ondas a gran escala SEM3D para modelar ondas sísmicas con el objetivo de evaluar el efecto topográfico de las mismas en el cálculo de los desplazamientos permanentes sísmicos en taludes naturales o laderas; lo anterior con miras a la evaluación física de la amenaza sísmica de deslizamientos implementando una adaptación del marco de análisis SEM-Newmark.

Se evaluaron dos casos de geoformas canónicas axisimétricas: una elevación topográfica con forma de campana gaussiana representando un cerro rodeado por un terreno plano y una depresión topográfica con forma semiesférica representan un valle o cuenca en medio de un terreno plano. Dicha evaluación se realizó tanto para validar las amplitudes de los espectros de desplazamientos en superficie, como para la evaluación de los efectos de las amplificaciones/reducciones de las amplitudes de las aceleraciones en el cálculo de desplazamientos permanentes con el método directo de Newmark.

En los dos casos, se evidenciaron incrementos y/o disminuciones en u_p al comparar los resultados de las aceleraciones considerando y sin considerar el efecto topográfico en la propagación de ondas. En particular se resaltan los fuertes incrementos de u_p hacia la cresta del cerro, las cuales explicarían la ocurrencia con mayor frecuencia de deslizamientos detonados por sismos cerca de las crestas de geoformas montañosas. Así mismo, se identificaron disminuciones notables de u_p en las laderas y fondo de la depresión topográfica evaluada. Estas dos tendencias observadas en u_p son consistentes con la respuesta sísmica esperada para las dos geoformas analizadas.

Además, para el caso del valle, se compararon los resultados de u_p considerando el efecto topográfico contra un caso hipotético en el cual se calculó u_p evaluando las aceleraciones en un receptor localizado en el fondo del valle de manera constante en todo el dominio. Como resultado, se observaron intercalaciones positivas y negativas de δu_p a lo largo de las laderas de la cuenca, lo cual podría generar sobrestimación de la amenaza sísmica de deslizamientos en las zonas de δu_p positivo y subestimación en las zonas de δu_p negativo si se desarrollaran modelos basados únicamente en mediciones instrumentales en fondos de valles o depresiones topográficas sin considerar el efecto topográfico de las laderas de la cuenca.

Trabajos complementarios a lo presentado en presente estudio podrían considerar ondas planas con ángulos de incidencias diferentes al vertical o fuentes sísmicas puntuales en lugar de ondas planas. Existen además variantes topográficas canónicas que podrían ser evaluadas o dar el paso a topografías realistas de terrenos montañosos.

6 Referencias

- Aki, K. and Richards, P.G. (2002) *Quantitative Seismology*. Mill Valley, California: University Science Books.
- Catani, F., Segoni, S. and Falorni, G. (2010) 'An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale', *Water Resources Research*, 46(5), pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1029/2008WR007450>.
- Chen, Z., Huang, D. and Wang, G. (2023) 'A regional scale coseismic landslide analysis framework: Integrating physics-based simulation with flexible sliding analysis', *Engineering Geology*, 315(June 2022), p. 107040. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107040>.

- Chen, Z. and Wang, G. (2023) 'Comparison of empirically-based and physically-based analyses of coseismic landslides: A case study of the 2016 Kumamoto earthquake', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 172(April), p. 108009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108009>.
- Chen, Z., Wang, G. and Huang, D. (2020) 'Physics-based and empirically-based coseismic sliding prediction models', in 17th World Conference on Earthquake Engineering. Sendai, Japan.
- Dahal, A. et al. (2023) 'From ground motion simulations to landslide occurrence prediction', *Geomorphology*, 441, p. 108898. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108898>.
- Fan, X. et al. (2019) 'Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts', *Reviews of Geophysics*, 57(2), pp. 421–503. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018RG000626>.
- Festa, G. and Vilotte, J.-P. (2005) 'The Newmark scheme as velocity–stress time-staggering: an efficient PML implementation for spectral element simulations of elastodynamics', *Geophysical Journal International*, 161(3), pp. 789–812. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02601.x>.
- Guerra Ospino, J.C. (2020) Propuesta para la evaluación de amenaza por movimientos en masa inducidos por sismo. Universidad Nacional de Colombia. Available at: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78666>.
- Huang, D. et al. (2020) 'An integrated SEM-Newmark model for physics-based regional coseismic landslide assessment', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132(February), p. 106066. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106066>.
- Ji, J. et al. (2022) 'A GIS-based tool for probabilistic physical modelling and prediction of landslides: GIS-FORM landslide susceptibility analysis in seismic areas', *Landslides*, 19(9), pp. 2213–2231. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01885-9>.
- Jibson, R.W. (2011) 'Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective', *Engineering Geology*, 122(1–2), pp. 43–50. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.017>.
- Jibson, R.W. (2013) 'Mass-Movement Causes: Earthquakes', in *Treatise on Geomorphology*. Elsevier, pp. 223–229. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00169-X>.
- Jibson, R.W., Harp, E.L. and Michael, J.A. (2000) 'A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps', *Engineering Geology*, 58(3–4), pp. 271–289. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00039-9).
- Keefer, D.K. (2002) 'Investigating Landslides Caused by Earthquakes – A Historical Review', *Surveys in Geophysics*, 23(6), pp. 473–510. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1021274710840>.
- Komatitsch, D. (1997) Méthodes spectrales et éléments spectraux pour l'équation de l'élastodynamique 2D et 3D en milieu hétérogène.
- Komatitsch, D., Tromp, J. and Vilotte, J.P. (1998) 'The spectral element method for elastic wave equations: Application seismic problems to 2D and 3D', 1998 SEG Annual Meeting, 1164(March 1998), pp. 1139–1164.
- Komatitsch, D. and Vilotte, J.-P. (1998) 'The Spectral Element Method: An Efficient Tool to Simulate the Seismic Response of 2D and 3D Geological Structures', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(2), pp. 368–392. Available at: <https://doi.org/10.1785/BSSA0880020368>.
- Lade, P.V. (2010) 'The mechanics of surficial failure in soil slopes', *Engineering Geology*, 114(1–2), pp. 57–64. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.04.003>.
- Matasovic, N. (1991) 'Selection of Method for Seismic Slope Stability Analysis', in *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, pp. 1057–1062. Available at: <http://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/http://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/02icrageesd/session07/25>.
- Montoya-Araque, E.A. and Montoya-Noguera, S. (2023) 'Sensitivity Analysis of a Physically Based Model to Assess Rainfall-Triggered Shallow Landslides', *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(5), pp. 2797–2814. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02427-3>.
- Montoya-Araque, E.A., Montoya-Noguera, S. and Lopez-Caballero, F. (2024) 'An open-source application software for spatial prediction of permanent displacements in earthquake-induced landslides by the Newmark

- sliding block method: pyNewmarkDisp', *Environmental Modelling & Software*, 173, p. 105942. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.105942>.
- Newmark, N.M. (1965) 'Effects of Earthquakes on Dams and Embankments', *Géotechnique*, 15(2), pp. 139–160. Available at: <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.139>.
- Peng, W.F. et al. (2009) 'Incorporating the effects of topographic amplification and sliding areas in the modeling of earthquake-induced landslide hazards, using the cumulative displacement method', *Computers & Geosciences*, 35(5), pp. 946–966. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.09.007>.
- Rathje, E.M. and Antonakos, G. (2011) 'A unified model for predicting earthquake-induced sliding displacements of rigid and flexible slopes', *Engineering Geology*, 122(1–2), pp. 51–60. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.12.004>.
- Sanchez-Sesma, F.J. (1983) 'Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(6), pp. 1621–1636. Available at: <https://doi.org/10.1785/BSSA07306A1621>.
- Touhami, S. et al. (2022) 'SEM3D: A 3D High-Fidelity Numerical Earthquake Simulator for Broadband (0–10 Hz) Seismic Response Prediction at a Regional Scale', *Geosciences*, 12(3), p. 112. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences12030112>.
- Wasowski, J., Keefer, D.K. and Lee, C.-T. (2011) 'Toward the next generation of research on earthquake-induced landslides: Current issues and future challenges', *Engineering Geology*, 122(1–2), pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.06.001>.
- Wong, H.L. (1979) Diffraction of P, SV, and Rayleigh waves by surface topographies. Report No. CE 79-05. University of Southern California.
- Wong, H.L. (1982) 'Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(4), pp. 1167–1183.

Agradecimientos y financiamiento

Los autores agradecen al grupo de investigación en Mecánica Aplicada de la Universidad EAFIT en Colombia, así como a la Escuela *CentraleSupélec* y al Laboratorio LMPS (*Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay*) de la Universidad Paris-Saclay en Francia por el apoyo, las instalaciones y el equipo computacional que ha facilitado la presente investigación. Un especial agradecimiento al Centro de Computación Científica Apolo de la Universidad EAFIT y a *Moulon Mesocenter* de la Universidad Paris-Saclay por los recursos computacionales, particularmente los clusters Apolo y Ruche respectivamente. Un agradecimiento especial al Dr. David Alejandro Castro-Cruz (King Abdullah University of Science and Technology Thuwal, Arabia Saudita) por el código base para el mallador de dominios 3D para realizar las simulaciones; igualmente al Dr. Filippo Gatti, la Dra. Valeria Soto-Moncada y a la candidata a Dra. Fanny Lehmann (laboratorio LMPS de la Universidad Paris-Saclay) por la formación base y el apoyo para necesidades específicas durante las simulaciones.

Este proyecto ha sido financiado por el proyecto interno No. 817898 "Amenaza sísmica de deslizamientos en el Valle de Aburrá" de la Universidad EAFIT; por el proyecto ADI 2022 del IDEX Paris-Saclay, Francia, ANR-11-IDEX-0003-02; y por el proyecto con Código Registro: 92556 "Amenaza sísmica y por lluvias de deslizamientos en Medellín, Colombia" de Minciencias, convocatoria 923-2022 (ECOSNORD).