



Modelado mediante DEM de flujos de escombros desencadenados por lluvia: caso del Cerro del Quinceo (10/julio/2018)

DEM modeling of debris flows triggered by rain: the case of Cerro del Quinceo (July 10, 2018)

Miguel Ángel Rodríguez Velázquez¹✉, Laura Moreno Martínez³, Carlos Chávez Negrete¹, Francisco Javier Domínguez Mota^{1,2}

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

³ Universidad de Alicante, Departamento de Matemática Aplicada

Resumen

Los flujos de detritos desencadenados por lluvias se encuentran entre los tipos de procesos de remoción de masa más destructivos que afectan a regiones montañosas. El 10 de julio de 2018, uno de estos eventos ocurrió en las laderas del Cerro del Quinceo, Morelia, México, ejemplificando las consecuencias devastadoras de eventos en condiciones hidrometeorológicas extremas sobre asentamientos ubicados en terrenos inestables y en zonas de altas pendientes. En este documento se presentan algunos resultados sobre el modelado numérico de los complejos mecanismos geomecánicos detrás del evento. Para el efecto, se muestra una aplicación del Método de Elementos Discretos (Discrete Element Method, DEM en inglés) para la simulación de estos complejos fenómenos de flujo.

Palabras clave: flujo de escombros, Método de Elementos Discretos, modelación numérica, evento Quinceo.

Abstract

Debris flows triggered by rainfall are among the most destructive types of landslides affecting mountainous regions. On July 10, 2018, one such event occurred on the slopes of Cerro del Quinceo, Morelia, Mexico, exemplifying the devastating consequences of extreme hydrometeorological conditions on settlements located on unstable terrain and steep slopes. This paper presents results on the numerical modeling of the complex geomechanical mechanisms behind the event. It shows an application of the Discrete Element Method (DEM) for the simulation of these complex flow phenomena.

Keywords: debris flow, Discrete Element Method, numerical modeling, Quinceo event.

Introducción

Los deslizamientos de laderas y particularmente los flujos de escombros provocados por las lluvias se encuentran entre los fenómenos naturales más peligrosos en zonas montañosas y escarpadas. Combinan la fuerza destructiva de los deslizamientos de tierra con el movimiento del flujo de agua proveniente de la propia escorrentía superficial. Estos movimientos masivos de rápida propagación suelen estar constituidos de agua mezclada con sedimentos, fragmentos de roca y residuos orgánicos, y son capaces de recorrer kilómetros a velocidades relativamente altas (Iverson, 1997). Su aparición repentina y su enorme energía cinética los hacen especialmente peligrosos para los asentamientos humanos y la infraestructura, causando un número significativo de víctimas y pérdidas económicas (Highland y Bobrowsky, 2008)

La transición dinámica de una pendiente estable a

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 28 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto de 2026

✉ Autor para correspondencia

Miguel Ángel Rodríguez Velázquez
miguel.rodriguez@umich.mx

Como citar

Rodríguez-Velázquez MA, Moreno-Martínez L, Chávez-Negrete C, Domínguez-Mota F (2026). Modelado mediante DEM de flujos de escombros desencadenados por lluvia: caso del Cerro del Quinceo (10/julio/2018). *Ciencia Nicolaita* 97:218-223. doi:[10.35830/cn.vi97.956](https://doi.org/10.35830/cn.vi97.956)

un flujo de escombros implica cambios de fase distintos (Hungr y McDougall, 2005) que comienzan con la localización de un desplazamiento generado por corte en el suelo y evolucionan hacia una masa deslizante que, a través de un arrastre progresivo, se transforma en un flujo de escombros completamente desarrollado.

El presente trabajo se centra en el evento ocurrido el 10 de julio de 2018 sobre las inmediaciones del Cerro

del Quinceo, en Morelia, Michoacán, México; cuando una precipitación intensa desencadenó el deslizamiento de tierra sobre un coluvión modificado que operó como embalse temporal, lo cual favoreció al desarrollo de un destructivo flujo de escombros hacia aguas abajo, donde se ubican algunos asentamientos humanos.

El área de estudio se encuentra en uno de los afluentes de la microcuenca de drenaje “El Quinceo”, situada al norte del municipio de Morelia, en la parte norte de Michoacán (véase la **Figura 1**). La ladera oriental del Cerro del Quinceo está compuesta principalmente por suelos volcánicos erosionados y depósitos piroclásticos, incluyendo suelos arenosos con limo y arcilla.

A partir de visitas de campo a la microcuenca, se delimitó el modelo geométrico para el estudio del problema, asociado al cauce que tuvo mayor influencia en el desastre; concretamente, el embalse temporal donde se produjo el

fallo (Ver **Figura 1**). Se observó que se trata de una zona en la que la escorrentía superficial queda temporalmente confinada debido a la forma “cóncava” de la zona, en la que se pueden alcanzar profundidades de flujo relativamente grandes en episodios de lluvias intensas.

Materiales y métodos

El Método de Elementos Discretos (DEM por sus siglas en inglés) es una técnica numérica utilizada para modelar el comportamiento de materiales granulares y sistemas discontinuos sometidos a grandes deformaciones. A diferencia de los métodos de dominios continuos que tratan los materiales como bloques homogéneos, el DEM representa explícitamente partículas individuales y sus interacciones, lo que lo hace particularmente adecuado para problemas

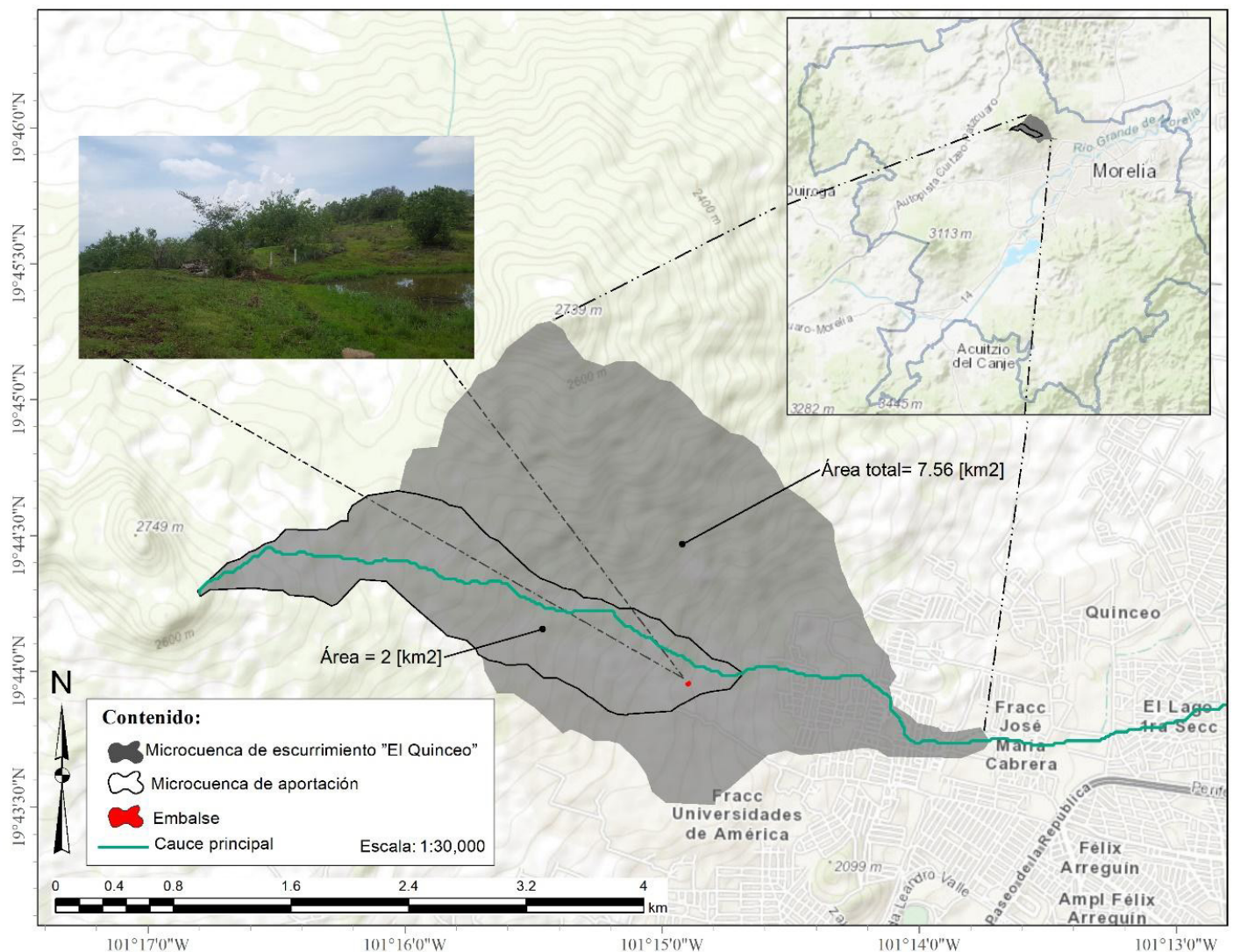


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

que involucran fragmentación, flujo o comportamiento a granel de sistemas de partículas. El método fue propuesto originalmente por Cundall en 1971 para la mecánica de rocas, adaptándolo posteriormente para medios granulares (Cundall, 1979) y desde entonces ha encontrado un uso frecuente en diversas aplicaciones científicas y de ingeniería (Cardozo y Hardy, 2023). En los siguientes párrafos haremos una descripción muy breve del método, el lector interesado puede consultar más detalles en Matuttis y Chen (2014).

La clave del DEM es la representación de un sistema como una colección de partículas distintas que pueden interactuar mediante fuerzas de contacto. Cada partícula en la simulación se trata como una entidad independiente con sus propias propiedades físicas como masa, tamaño, forma y características materiales. El movimiento de estas partículas se rige por la segunda ley de Newton del movimiento, que se resuelve numéricamente para cada partícula del sistema. Así, los movimientos traslacionales y rotacionales se describen mediante las ecuaciones (1) y (2):

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{N_c} F_{ij}^c + F_i^{ext} \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{N_c} M_{ij} M_{ij} \quad (2)$$

donde m_i es la masa de la partícula i , v_i es su velocidad, F_{ij}^c representa la fuerza de contacto entre las partículas i y j , F_i^{ext} incluye fuerzas externas como la gravedad, I_i es el momento de inercia, ω_i es la velocidad angular y M_{ij} es el momento resultante de las fuerzas de contacto.

La fuerza de contacto entre partículas se descompone típicamente en componentes normal y tangencial. La fuerza normal se modela frecuentemente mediante un sistema resorte-amortiguador:

$$F_n = k_n \delta_n n - \gamma_n v_n \quad (3)$$

donde k_n es el coeficiente de rigidez normal, δ_n es la superposición entre partículas, n es el vector normal unitario, γ_n es el coeficiente de amortiguamiento normal y v_n es la componente normal de la velocidad relativa. La fuerza tangencial F_t puede modelarse de manera similar, incluyendo frecuentemente un componente de fricción basado en la ley de Coulomb:

$$F_t = \min(k_t \delta_t - \gamma_t v_t, \mu |F_n| t) \quad (4)$$

donde k_t es la rigidez tangencial, δ_t es el desplazamiento tangencial, γ_t es el coeficiente de amortiguamiento tangencial, v_t es la componente tangencial de la velocidad relativa, μ es el coeficiente de fricción y t es el vector tangente unitario.

La integración temporal en DEM se realiza en muchas aplicaciones mediante un esquema explícito, que es adecuado para la naturaleza dinámica de las interacciones entre partículas. El algoritmo consiste en los siguientes pasos que se repiten en cada paso de tiempo: actualizar las velocidades medio paso, actualizar las posiciones basadas en las velocidades actuales, calcular las nuevas fuerzas basadas en las posiciones actualizadas y finalmente completar la actualización de velocidades. Los pequeños pasos de tiempo requeridos para la estabilidad numérica están determinados por la frecuencia natural más alta del sistema, que depende de la rigidez y masa de las partículas.

Por la complejidad de los problemas en los que se aplica, uno de los aspectos fundamentales de las simulaciones DEM es el algoritmo de detección de contactos. A medida que aumenta el número de partículas, el enfoque naïve de verificar todos los pares de partículas posibles se vuelve computacionalmente prohibitivo. Se han desarrollado varios métodos eficientes, incluyendo enfoques basados en mallas, métodos basados en árboles como octrees y algoritmos avanzados como el método de celdas enlazadas. Estas técnicas reducen significativamente el costo computacional al verificar solo las partículas que probablemente estén en contacto.

Las simulaciones DEM pueden modelar partículas con diferentes formas, aunque las partículas esféricas son las más comunes debido a que facilitan la detección de contactos y el cálculo de fuerzas. Para partículas no esféricas, surge una complejidad adicional tanto en la detección de contactos como en el cálculo de fuerzas. Los enfoques comunes incluyen el uso de partículas compuestas formadas por múltiples esferas o algoritmos especializados para partículas poliédricas. La elección de la representación de la forma de la partícula depende de la aplicación específica y del equilibrio requerido entre precisión y eficiencia computacional.

Por su capacidad de representar diferentes medios a través de las partículas materiales, el DEM puede acoplarse con otros métodos numéricos para resolver problemas multifísicos. El acoplamiento más común es con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en lo que se conoce como CFD-DEM, donde el DEM maneja la fase sólida de las partículas mientras que el CFD modela la fase fluida. Este enfoque es particularmente útil para modelar lechos fluidizados, transporte neumático y otros sistemas de flujo gas-sólido. La interacción entre fases se modela típica-

mente mediante fuerzas de arrastre, con el fluido ejerciendo fuerzas sobre las partículas y las partículas afectando a su vez el flujo del fluido.

Por último, es importante mencionar que el método DEM tiene aplicaciones en numerosos campos, incluyendo ingeniería farmacéutica, donde modela el flujo de polvos en prensas de tabletas, ingeniería minera para simulaciones de procesamiento de minerales, ingeniería civil para realizar estudios de mecánica de suelos e ingeniería química para modelar reactores de lecho fluidizado. En cada una de estas aplicaciones, el DEM proporciona información que es difícil o imposible de obtener únicamente mediante métodos experimentales, como datos detallados a escala de partícula sobre fuerzas, velocidades y redes de contacto.

Caso de estudio

Las afectaciones ocasionadas por el evento del 10 de julio de 2018 en el cerro del Quinceo fueron numerosas. Una de ellas fue el acarreo de material granular, constituido por escombros y materiales más finos. Este tipo de fenómenos en laderas, impulsados por procesos hidrológicos, constituye un conjunto de procesos geomorfológicos complejos en los que el agua actúa como principal agente de transporte y erosión.

Este proceso inicia con la infiltración de agua de lluvia en el suelo, lo que incrementa la presión de poros y se reduce la fuerza de contacto entre las partículas, adicionalmente se disminuye la cohesión en la parte fina del suelo, facilitando su movilización. En pendientes pronunciadas, la escorrentía genera arrastre por fuerza cortante, especialmente en materiales sueltos como arenas, gravas y limos. A medida que el agua fluye cuesta abajo, se forman surcos o regueros que concentran el flujo, aumentando su capacidad de transporte y generando erosión lineal.

En casos extremos, la saturación hídrica puede desencadenar movimientos en masa, como deslizamientos o flujos de detritos, donde el material granular se mezcla con agua formando una masa viscosa que se desplaza pendiente abajo. Factores como la pendiente, la textura del material, la vegetación y la intensidad de la precipitación determinan la magnitud del acarreo. Suelos sin cobertura vegetal son más susceptibles, ya que las raíces no estabilizan el suelo y la ausencia de hojarasca reduce la infiltración, aumentando la escorrentía.

En la **Figura 2** se observan dos ejemplos de los acarreos ocurridos en el evento del 10 de julio de 2018; en la izquierda, se identifica material transportado sobre una de las laderas de la zona de interés, con características de haber ocurrido antes y posterior al caso de estudio; y en la derecha, se observa parte del material transportado y de-

positado el día del evento sobre una zona urbana, ubicada aguas abajo de la zona de estudio. Este tipo de acarreos son resultado de la intensa precipitación y capacidad erosiva del flujo sobre la zona de estudio.

Para el presente trabajo se modelaron con DEM dos ejemplos de acarreos de material incluyendo los efectos de la pendiente y características físicas del material asociadas a condiciones de saturación del material; ambos ejemplos constituyen una prueba piloto para futuros escenarios de modelación.

Resultados

A fin de reproducir los resultados de la dinámica mostrada en la **Figura 2**, se realizaron dos simulaciones empleando una implementación de DEM mediante Kratos Multiphysics (Dadvand *et al.*, 2010; Dadvand *et al.*, 2013; Mataix Ferrándiz *et al.*, 2025). En ambas se emplearon 17080 elementos discretos, con 18850 elementos para definir la base del dominio, que en ambos casos representa la superficie del pavimento de la calle, con pendientes descendientes de 5° y 20°.

El modelo constitutivo empleado para los elementos discretos fue el de Mohr-Coulomb, con densidad $\rho = 1250 \text{ kg/m}^3$, cohesión $c = 1 \text{ kPa}$, ángulo de fricción $\phi = 1^\circ$, módulo de Young $E = 20 \text{ MPa}$ y relación de Poisson $\nu = 0.45$. Las características físicas y parámetros considerados se definieron con base a lo observado durante los recorridos en campo, muestras de material recolectadas posterior al evento en la zona alta de la cuenca de estudio y a los estudios realizados por Iverson, 1997; Iverson, 2000 y Duncan *et al.*, 2014 en problemas similares.

En la **Figura 3** se muestran los desplazamientos re-



Figura 2. Ejemplos de los acarreos ocurridos en la zona de estudio.

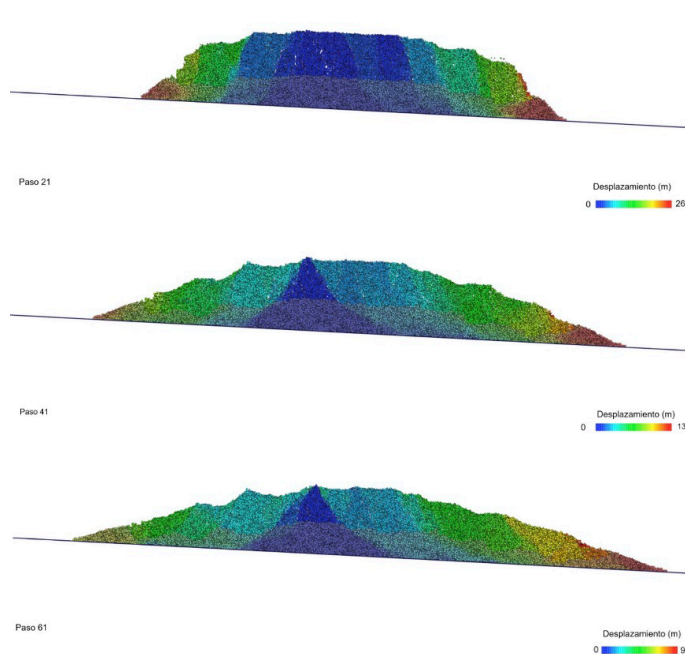


Figura 3. Desplazamientos relativos para una pendiente de 5°.

lativos a tres tiempos para la pendiente de 5°, las cuales describen zonas bajas donde comienza el proceso de deposición del material granular. A pesar de lo limitado de la descripción numérica para un fenómeno tan complejo, es posible observar el comportamiento cualitativo correspondiente a los acarreo mostrados en la parte derecha de la **Figura 2**.

En la **Figura 4** se muestran los correspondientes desplazamientos relativos a tres tiempos para la pendiente de 20 grados. Adicional al comportamiento cualitativo esperado, es posible observar claramente el efecto de la pendiente más pronunciada, correspondiente a la zona alta o media de la ladera, condiciones semejantes a la parte izquierda de la **Figura 2**.

Discusión

Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, en concordancia con lo esperado desde el punto de vista cualitativo, reflejan el comportamiento observado en los acarreo de material de la zona de estudio. En particular, las simulaciones empleando 17080 elementos discretos y 18850 elementos para definir la base del dominio permitieron replicar la dinámica mostrada en la **Figura 2**, que representa el acarreo de material en la superficie del pavimento con las pendientes consideradas en las pruebas, lo que sugiere que los parámetros elegidos son representativos del fenómeno.

No obstante, a pesar de la potencia y versatilidad del

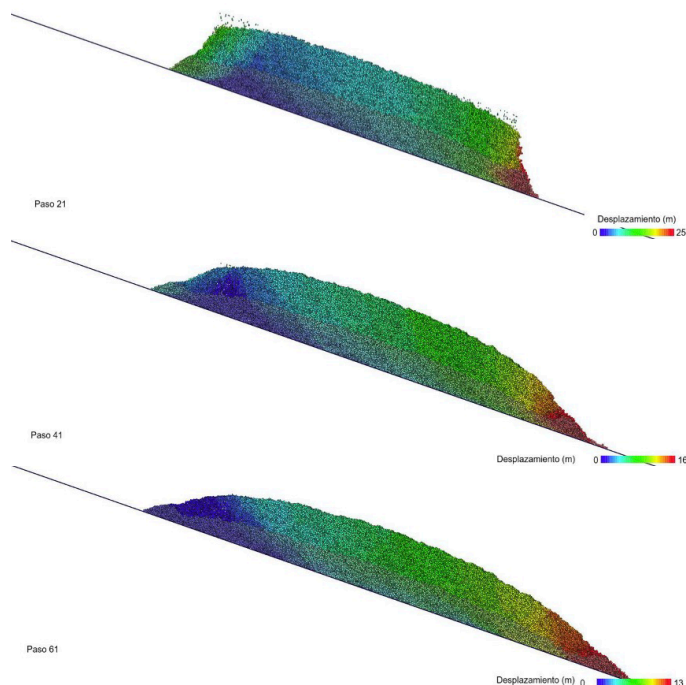


Figura 4. Desplazamientos relativos para una pendiente de 20°.

DEM, estos ejemplos también ponen de manifiesto varias limitaciones inherentes al método. El costo computacional escala considerablemente con el número de partículas, lo que convierte en un reto las simulaciones de escenarios a gran escala. Por ejemplo, modelar una dinámica con duración de 1×10^{-4} segundos requirió un tiempo de cómputo de 130 minutos en una Mac Mini con chip M4 de Apple, CPU de 10 núcleos, GPU de 10 núcleos y Neural Engine de 16 núcleos, con memoria unificada de 16 GB. Esta exigencia computacional es especialmente relevante cuando se pretende simular eventos de mayor magnitud o complejidad, como los que se presentaron en otras partes de la zona de estudio.

Además del costo computacional, el método requiere una cuidadosa calibración de parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción y la densidad, que no siempre corresponden directamente a propiedades físicas medibles durante el evento, especialmente cuando se trata de materiales saturados por precipitación. En las simulaciones, los parámetros fueron definidos a partir de la información obtenida en campo y los estudios realizados por Iverson (1997, 2000) y Duncan *et al.* (2014), lo que permitió aproximar el comportamiento real del material, aunque existen limitaciones en la representación numérica de fenómenos tan complejos. Por otro lado, el modelo computacional basado en la suposición de partículas rígidas solamente con pequeñas superposiciones puede resultar inapropiado para materiales que experimentan deformaciones significativas, como es el caso del modelo de estu-

dio, donde las condiciones de saturación y la heterogeneidad de los materiales afectan la dinámica de los acarreo. Finalmente, las simulaciones con diferentes pendientes muestran diferencias notables en el comportamiento del material, evidenciando zonas de deposición y el efecto de pendientes pronunciadas en la movilidad del material granular. Aunque el DEM permite observar el comportamiento cualitativo de los acarreo, como se aprecia en las **Figuras 3 y 4**, es necesario considerar la mejora de los modelos reológicos y la integración de efectos adicionales como la escorrentía para futuras investigaciones, con el fin de representar mejor los esfuerzos predominantes y las condiciones reales del evento.

Conclusiones

A pesar de las limitaciones en algunos resultados, el Método de Elementos Discretos continúa evolucionando como una poderosa herramienta para comprender y predecir el comportamiento de materiales granulares. Su capacidad para proporcionar información a escala de partícula lo hace único entre los métodos numéricos, ofreciendo conocimientos que conectan las interacciones microscópicas con el comportamiento macroscópico. A medida que aumenta el poder computacional y mejoran los algoritmos, el DEM está encontrando aplicación en problemas cada vez más complejos en ingeniería.

Como trabajo futuro se espera desarrollar un modelo que permita integrar los efectos directos de la escorrentía sobre el material e implementar modelos reológicos que contemplen más parámetros para representar mejor los esfuerzos reológicos predominantes del evento.

Agradecimientos

Queremos agradecer al AULA CIMNE-Morelia y al CIC-UMSNH por su apoyo financiero para este trabajo, así como a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) en México por su apoyo financiero.

También deseamos expresar nuestro agradecimiento al SIIIA MATH y a la Universidad Michoacana de San

Nicolás de Hidalgo (UMSNH) por su colaboración y respaldo institucional, así como por el uso de su infraestructura computacional.

Referencias

- Cardozo N, Hardy S (2023). cdem: A macOS program for discrete element modeling of tectonic structures. *Geosphere* 19(5):1259–1279. doi:[10.1130/GES02647.1](https://doi.org/10.1130/GES02647.1)
- Cundall PA, Strack OD (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29(1):47–65.
- Dadvand P, Rossi R, Oñate E (2010). An Object-oriented Environment for Developing Finite Element Codes for Multi-disciplinary Applications. *Arch Computat Methods Eng* 17:253–297. doi:[10.1007/s11831-010-9045-2](https://doi.org/10.1007/s11831-010-9045-2)
- Dadvand P, Rossi R, Gil M, Martorell X, Cotela J, Juanpere E, Idelsohn S, Oñate E (2013). Migration of a generic multi-physics framework to HPC environments. *Computers & Fluids* 80:301–309.
- Duncan M, Wright GS, Brandon LT (2014). Soil strength and slope stability. *John Wiley & Sons*.
- Highland ML, Bobrowsky P (2008). Landslide types and processes. *US Geological Survey Circular* 1325.
- Hungr O, McDougall S (2005). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Canadian Geotechnical Journal* 42(5):1420–1432.
- Iverson MR (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics* 35(3):245–296.
- Iverson MR (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research* 36(7):1897–1910.
- Mataix-Ferrándiz M, Bucher P, Zorrilla R, Warnakulasuriya S, Cornejo A, Rossi R, Roig C, Jcotela, Maria J, Tteschemacher, Masó M, Casas G, Núñez M, Dadvand P, Latorre S, De Pouplana I, Irazábal-González J, AFranci, Arrufat F, riccardosi, Ghantasala A, Sautter K, Wilson P, dbaumgaertner, Chandra B, Geiser A, Kelemen M, Iluis, Lopez I, jgonzalezusua (2025). KratosMultiphysics/Kratos: Release v10.2.3 (v10.2.3). *Zenodo*. doi:[10.5281/zenodo.1568766](https://doi.org/10.5281/zenodo.1568766)
- Matuttis HG, Chen J (2014). Understanding the discrete element method: simulation of non-spherical particles for granular and multi-body systems. *John Wiley & Sons*.