



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Efecto del uso de barreras flexibles en el comportamiento de un flujo de detritos aplicado a la cuenca alta de la quebrada Taruca, municipio de Mocoa, utilizando DEM.

Ginna Marcela Torres Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia

2024

Efecto del uso de barreras flexibles en el comportamiento de un flujo de detritos aplicado a la cuenca alta de la quebrada Taruca, municipio de Mocoa, utilizando DEM.

Ginna Marcela Torres Rodríguez

Trabajo final de Maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Geotecnia

Director:

Mauricio Alberto Tapias Camacho, Ingeniero Civil, MSc en Geotecnia, PhD

Línea de Investigación:

Modelación y análisis en geotecnia: Taludes, laderas, cauces y zonificación geotécnica

Grupo de Investigación:

GENKI – Geotechnical Engineering Knowledge and
Innovation.

Universidad Nacional de Colombia

Facultad, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2024

“El caballero lloró más al darse cuenta de que si no se amaba, no podía amar realmente a otros. Su necesidad de ellos se interpondría. En eso apareció el mago y le dijo: solo podrás amar a otros en la medida en que te ames a ti mismo”.

*El Caballero de la Armadura Oxidada
Robert Fisher.*

Contenido

Tabla de Figuras.....	7
Agradecimientos	10
Resumen.....	11
Abstract.....	13
1 Introducción.....	14
2 Objetivos y Metodología.....	17
2.1 Objetivo General	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
2.3 Metodología.....	17
2.3.1. Definición de la zona de estudio:.....	18
2.3.2. Caracterización de los parámetros geomécánicos y geotécnicos del material del movimiento en masa:.....	19
2.3.3. Análisis de Sensibilidad: Modelación DEM para flujo sin barreras:.....	19
2.3.4. Calibración y validación del modelo DEM:.....	20
2.3.5. Estudio del efecto de barreras por modelación DEM:.....	21
2.3.6. Comparativo DEM: Evento sin Barreras y evento con barreras:.....	22
3 Movimientos en masa	23
3.1 Definición	23
3.2 Clasificación.....	23
3.3 Factores que influyen en un movimiento en masa.....	25
3.3.1 Impactos de Terremotos	27
3.3.2 Lluvia	27
3.3.3 Aumento de la Superficie Freática.....	27
3.3.4 Cambios estructurales progresivos en los materiales de la formación de la pendiente.....	28
3.3.5 Reducción Rápida	28
3.3.6 Licuefacción espontánea	28
3.3.7 Filtración de una fuente artificial de agua	28
3.3.8 Reactivación de antiguos deslizamientos	28
3.3.9 Meteorización	29
3.3.10 Cargas externas.....	29
3.3.11 Cortes de Terreno, Ladera o Talud.....	29
3.3.12 Presión Artesiana.....	29

3.3.13	Erosión de Ríos y costas	29
3.3.14	Flujos de Escombros	30
4	Flujos de Detritos	31
4.1	Definición de Flujo de Detritos.....	31
4.2	Modelación física de los flujos de detritos	34
4.3	Modelación numérica de los flujos de detritos.....	37
4.4	Guías de diseño para mitigación de flujos de detritos	40
4.5	Tipos de obras para la mitigación de flujos de detritos	43
4.6	Modelaciones de obras para la mitigación de flujos de detritos	46
5	Método de elementos discretos (DEM).....	50
5.1	Definición General	50
5.2	Fundamentos del DEM	50
5.3	Calibración de simulaciones DEM	52
5.4	YADE, programa computacional DEM	53
5.4.1	Datos experimentales para simulación	55
5.4.2	Modelo de contacto	57
6	Estudio de Caso: Mocoa-Putumayo, Colombia	61
6.1	Localización Mocoa.....	61
6.2	Descripción del evento.....	61
6.3	Definición de la zona para el análisis	67
6.4	Descripción geológica y geotécnica de los materiales	72
6.5	Parámetros geomecánico de los materiales para la simulación numérica. 74	
7	Modelación numérica de flujo de detritos y de barreras en la Quebrada Taruca77	
7.1	Introducción	77
7.2	Descripción del modelo para el flujo de detritos escogido.....	78
7.3	Descripción del código general	79
7.4	Descripción de los resultados esperados.....	83
7.5	Análisis de sensibilidad para elección de parámetros geomecánico	87
7.5.1	Ángulo de rozamiento para las partículas:	88
7.5.2	Módulo de rigidez para las partículas:	91
7.5.3	Ángulo de rozamiento para el material que conforma la superficie de la cuenca: 94	
7.6	Validación del modelo frente al evento real	98

7.7	Modelo final escogido	102
7.8	Simulación del evento con intervención de Barreras	102
7.8.1	Descripción General de parámetros físicos y mecánicos para las barreras:	103
7.8.2	Efecto de intervención de Barrera 1:	104
7.8.3	Efecto de intervención de Barrera 2:	107
7.8.4	Efecto de intervención de Barrera 3:	109
7.8.5	Efecto de intervención de Barrera 2 y 3:	111
7.9	Elección de barreras	114
7.10	Simulación y efecto de variación de rigidez en las barreras	115
7.11	Simulación y efecto de variación de geometría en las barreras	118
7.12	Comparativos de modelo sin Flujo y modelo con la intervención de Barreras	121
8	Conclusiones	124
9	Recomendaciones	127
10	Bibliografía	128
A.	Anexo A: Código de la simulación de evento original sin intervención de Barreras 134	
B.	Anexo B: Código de la simulación de evento original con intervención de Barrera 1 142	
C.	Anexo C: Código de la simulación de evento original con intervención de Barrera 2 149	
D.	Anexo D: Código de la simulación de evento original con intervención de Barrera 3 156	
E.	Anexo E: Código de la simulación de evento original con intervención de Barrera 2 y 3	163

Tabla de Figuras

Figura 3-1 Clasificación de movimientos en masa referenciado de Varnes (1958) y traducido de Bell (1993). Fuente: (García Yagüe , 1988)	25
Figura 3-2 Ejemplo de cambios en el Factor de Seguridad respecto al tiempo. Fuente: (Popescu, 2002)	26
Figura 4-1. a. Flujos de Detritos, b. Avalancha de Detritos Fuente: Cruden & Varnes 1996 (Montero Olarte, 2017).....	31
<i>Figura 4-2 Corte Esquemático típico de un flujo de detritos.</i>	33
Figura 4-3 Incremento de tensión de arrastre en canales curvos.	35
Figura 4-4 Relación entre velocidad y Fuerza de Impacto. Fuente: (He & Li, 2014).....	38
Figura 4-5 Relación entre velocidad y Fuerza de Impacto. Resultados al utilizar diferentes correlaciones. Fuente: (García Amaya, 2018).....	39
Figura 4-6 Metodologías de Mitigación.	42
Figura 4-7 Esquema de Sistematización Caso de Obra Curcutí, Venezuela.	44
Figura 4-8 Barrera Flexible con red de anillos y Postes. Fuente: (A Bianchini Ingeniero SA / Maccaferri Group , 2002)	45
Figura 4-9 Explosión de 60kg a una distancia de 1 metro de pared hormigón débil. Fuente: (García Reyes, 2013).....	46
<i>Figura 4-10 Malla de Gaviones con elementos discretos llenada por esferas.</i>	48
<i>Figura 4-11 Fuerza de Impacto vs Tiempo.</i>	49
<i>Figura 5-1 Interacción entre partículas-Fuerzas de contacto y de gravedad que actúan sobre una partícula Fuente: (Tapias Camacho, 2016)</i>	50
Figura 5-2 Características básicas del DEM-Calculo cíclico de movimiento de la partícula Fuente: (Tapias Camacho, 2016).....	52
Figura 5-3 Terminal inicial para ejecutar código programa computacional YADE	54
Figura 5-4 Interfase gráfica de YADE	54
Figura 5-5 Ciclo de ejecución en YADE	55
Figura 5-6 Características principales para componentes de datos: cuerpos.....	56
Figura 5-7 Ejemplos de componentes funcionales de YADE	57
Figura 5-8 Modelo de Contacto Lineal Simple. Interacción Normal y Tangencial. Fuente: (Tapias Camacho, 2016)	57
Figura 5-9 Serie de 2 resortes que representan la rigidez normal de contacto entre 2 esferas.....	58
Figura 6-1 Localización de Mocoa, departamento de Putumayo.....	61
Figura 6-2 Esquemización de las ríos y quebradas respecto a la localización del municipio Mocoa-Putumayo. Fuente: (Corpoamazonía, 2017).....	62
Figura 6-3 a). Foto aérea del evento ocurrido en 2017 y b). Bloques que desplazó la avalancha de detritos. Fuente: (UNGRD et al., 2018)	63
Figura 6-4 Modelo conceptual parte media-alta subcuenca Taruca y Taruquita. Fuente: (UNGRD et al., 2018).....	64
Figura 6-5 En la parte superior los procesos foto interpretados y en la parte inferior los histogramas de distancias de viaje de la cuenca a) Taruca-Taruquita y b) Sangoyaco. Fuente: (Consortio Inypsa et al., 2018)	66

Figura 6-6 Zona estudiada en planta Cuenca Alta de la Quebrada Taruca Fuente: (Corpoamazonía, 2005)	69
Figura 6-7 Perfil longitudinal de la Quebrada Taruca generado a partir de las abscisas y cotas del Plano de Corpoamazonía.	70
Figura 6-8 Perfil numérico de la Quebrada Taruca generado para el programa computacional YADE por medio de Coordenadas. Fuente: Autor	71
Figura 6-9 Distancia de viaje (buffer) a cada una de las quebradas identificadas a escala 1:25.000 en función de los cuartiles. Recuadro en rojo: Área de estudio en este trabajo.	72
Figura 6-10 Puntos estudiados por el Consorcio en cuanto a la granulometría del material caído de la Quebrada Taruca. Fuente: (Consorcio Inypsa et al., 2018)	75
Figura 6-11 Material caído de la Quebrada Taruca. Fuente: (Consorcio Inypsa et al., 2018)	76
Figura 7-1 Depósitos recientes dejados por las quebradas Taruquita (a) y Taruca (b). Los sedimentos finos, son aprovechados en la extracción de arena. (Jojoa, 2003)	78
Figura 7-2 Modelo de flujo para Caso de Quebrada Taruca: partículas tramo final.	79
<i>Figura 7-3 Caída Libre hasta el reposo de las partículas. Primer momento del código. ...</i>	81
<i>Figura 7-4 Barrera Móvil en interacción con el movimiento de las partículas.</i>	82
<i>Figura 7-5 Velocidad media vs Tiempo (No. De Ciclos) de diferentes materiales</i>	83
<i>Figura 7-6 Fuerza de Impacto vs Tiempo (No. De Ciclos): (a) Resultados para material SL20: arena de Leighton Buzzard (LB) con variación de fracción sólida de 0.20; (b) Resultados para material SL50: arena de Leighton Buzzard (LB) con variación de fracción sólida de 0.50.</i>	84
<i>Figura 7-7 Fuerza de Impacto vs Tiempo (No. De Ciclos) para material SL50: arena de Leighton Buzzard (LB) con variación de fracción sólida de 0.50: (a) Fuerzas en los cables; (b) Fuerzas en cables y resultantes.</i>	86
En la <i>Figura 7-8</i> , así como en la anterior se representan las Fuerzas de impacto del flujo de los detritos (kPa) relacionada con el tiempo (s), sin embargo, los ensayos de escala son simulados con una “barrera flexible” simulando unos cables junto a una membrana elástica, obteniendo las fuerzas aproximadas en cada uno de los cables dispuestos en la superficie de la estructura.	86
<i>Figura 7-9 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaje variando Fricción en las partículas</i>	90
<i>Figura 7-10 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaje variando Fricción en las partículas. Eje vertical: Número de partículas acumuladas por tramo</i>	91
<i>Figura 7-11 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaja variando E partículas. Valores de E en Pa.</i>	93
<i>Figura 7-12 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaja variando E partículas</i>	94
<i>Figura 7-13 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaja variando Fricción de superficie (cuenca).....</i>	97
<i>Figura 7-14 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaja variando Fricción de superficie (cuenca).....</i>	98
<i>Figura 7-15 Volumen entre abscisas 1924 a >2000 m para Parámetro Fricción de partículas(°).</i>	99
<i>Figura 7-16 Volumen entre abscisas 1870 a >2000 m para Parámetro E(Pa) de las partículas.</i>	100

<i>Figura 7-17 Volumen entre abscisas 1886 a >2000 m para Parámetro Fricción de Cuenca^(o).</i>	101
<i>Figura 7-18 Posición de las Barreras perpendicularmente propuestas al movimiento de detritos.</i>	103
<i>Figura 7-19 (A) Posición de la Barrera 1 en la superficie, (B) Movimiento de Partículas sobre la Barrera 1 en la superficie.</i>	105
<i>Figura 7-20 Fuerza de Impacto en la B1 vs el No. de ciclos.</i>	106
<i>Figura 7-21 Energía Cinética en la B1 vs el No. de ciclos.</i>	106
<i>Figura 7-22 (A) Posición de la Barrera 2 en la superficie, (B) Movimiento de Partículas sobre la Barrera 2 en la superficie.</i>	107
<i>Figura 7-23 Fuerza de Impacto en la B2 vs el No. de ciclos.</i>	108
<i>Figura 7-24 Energía Cinética en la B2 vs el No. de ciclos.</i>	109
<i>Figura 7-25 (A) Posición de la Barrera 3 en la superficie, (B) Movimiento de Partículas sobre la Barrera 3 en la superficie.</i>	109
<i>Figura 7-26 Fuerza de Impacto en la B3 vs el No. de ciclos.</i>	110
<i>Figura 7-27 Energía Cinética en la B3 vs el No. de ciclos.</i>	111
<i>Figura 7-28 Comparación de las Fuerzas de Impacto en las tres Barreras si vs el Número de ciclos.</i>	112
<i>Figura 7-29 Posicionamiento de las Barreras 2 y 3 (a) sin flujo y (b) en el curso del flujo</i>	113
<i>Figura 7-30 Fuerza de Impacto proponiendo las 2 Barreras B2 y B3.</i>	114
<i>Figura 7-31 Fuerzas de Impacto en Barrera 2-Variando Rigidez VS Número de Ciclos. Valores de E en Pa.</i>	116
<i>Figura 7-32 Fuerzas de Impacto en Barrera 3-Variando Rigidez VS No. de Ciclos. Valores de E en Pa.</i>	116
<i>Figura 7-33 Red de Anillos como barrera flexible analizada por DEM.</i>	118
<i>Figura 7-34 Fuerzas de Impacto en Barrera 2-Variando Alturas VS No. de Ciclos. Alturas H en m.</i>	119
<i>Figura 7-35 Fuerzas de Impacto en Barrera 3-Variando Alturas VS No. de Ciclos. Alturas H en m.</i>	120
<i>Figura 7-36 Evolución de la Energía Cinética a lo largo del trayecto del flujo de partículas durante ciclos de cálculo para diferentes sistemas de barreras: Sin Barreras (SB), B1, B2, B3 y B2B3.</i>	122

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que desempeñaron un papel significativo en el desarrollo y conclusión de este trabajo de investigación.

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme la motivación y la persistencia necesarias para emprender y culminar esta etapa que, hace unos años, comenzó como un sueño. Su guía ha sido la luz que iluminó mi camino académico.

Extendiendo mi gratitud, quiero reconocer a mi director de tesis, el profesor Mauricio, por su orientación experta y paciencia inquebrantable. Sus valiosos consejos y comentarios fueron fundamentales para dar forma y mejorar este trabajo.

A mi madre, un ejemplo a seguir y mi compañera en este viaje y en la vida, le agradezco por su apoyo constante, respaldo en mis sueños y metas, y por estar presente en cada logro.

A mi padre, quien siempre insistió y respaldó mi decisión de culminar mi maestría en la prestigiosa Universidad Nacional de Colombia.

A mis amigos, fieles compañeros de esta travesía académica, les agradezco por acompañarme, luchar a mi lado, trasnochar y compartir enseñanzas valiosas tanto en el ámbito profesional como en el personal.

Por último, a la empresa que ha sido testigo de mi crecimiento profesional y que me brindó la oportunidad y el apoyo para continuar mi formación. A mis colegas en Colombia, siempre estaré agradecida por ser parte de este viaje.

Resumen

Efecto del uso de barreras flexibles en el comportamiento de un flujo de detritos aplicado a la cuenca alta de la quebrada Taruca, municipio de Mocoa, utilizando DEM.

En este estudio, se presenta un análisis de lo que habría sido el empleo de barreras flexibles en el comportamiento del flujo de detritos que tuvo lugar en el año 2017 en la parte alta de la cuenca Taruca, específicamente en Mocoa. Para llevar a cabo esta investigación, se desarrolló un código utilizando el programa "YADE". Este código representa la caída de material granular a lo largo de una distancia predeterminada de 2.5 km en la cuenca, con el objetivo de calcular la interacción entre las partículas y las barreras, teniendo el volumen de material involucrado.

La formulación del código se basó en el Método de Elementos Discretos (DEM), un enfoque numérico que posibilita el estudio del comportamiento entre partículas mediante la evaluación de las interacciones individuales entre ellas. Este método proporciona una representación detallada de la dinámica de partículas, permitiendo así una comprensión más profunda del impacto de las barreras flexibles en el flujo de detritos en la cuenca de interés.

El código está diseñado específicamente para la simulación numérica del movimiento ocurrido en las coordenadas correspondientes a la parte alta de la cuenca de Mocoa, particularmente en la Quebrada Taruca. Como resultado, se obtienen datos cruciales, tales como las fuerzas de impacto con las que las partículas alcanzan las barreras, así como la energía y el desplazamiento de dichas partículas. Utilizando esta información, se realiza la variación de la posición de las barreras, generando así cuatro casos de estudio iniciales. Estos casos se comparan con el flujo sin barreras con el objetivo de determinar la posición óptima de las barreras. Posteriormente, se exploran variaciones en las alturas de las barreras para evaluar el impacto que estas modificaciones tienen en el comportamiento del flujo. Este enfoque sistemático permite identificar la configuración más efectiva de las barreras para mitigar el impacto del flujo de detritos en la cuenca. Los resultados mostraron que la implementación de estructuras transversales en la trayectoria de los flujos de detritos reduce la energía cinética del movimiento de partículas en hasta un 85%. Este porcentaje

es crucial para considerar en la mitigación del impacto en las áreas que necesitan protección.

Palabras clave: Flujo de Detritos, Método de Elementos Discretos (DEM), partículas, YADE.

Abstract

Effect of the use of flexible barriers on the behavior of a debris flow applied to the upper basin of the Taruca stream, municipality of Mocoa, using DEM.

In this study, an analysis is presented on the impact of employing flexible barriers on the behavior of debris flow that occurred in 2017 in the upper part of the Taruca basin, specifically in Mocoa. To conduct this research, a code was developed using the "YADE" program. This code simulates the fall of granular material over a predetermined distance of 2.5 km in the basin, aiming to calculate the interaction between particles and barriers, considering the volume of material involved.

The code formulation is based on the Discrete Element Method (DEM), a numerical approach that enables the study of particle behavior by evaluating individual interactions between them. This method provides a detailed representation of particle dynamics, allowing for a deeper understanding of the impact of flexible barriers on debris flow in the targeted basin.

The code is specifically designed with coordinates corresponding to the upper part of the Mocoa basin, particularly in the Taruca Creek. As a result, crucial data such as impact forces (pressures) with which particles reach the barriers, as well as the energy and displacement of these particles, are obtained. Using this information, variations in the position of the barriers are implemented, generating four initial case studies. These cases are compared with the flow without barriers to determine the optimal position of the barriers. Subsequently, variations in the heights of the barriers are explored to assess the impact of these modifications on flow behavior. This systematic approach allows for the identification of the most effective barrier configuration to mitigate the impact of debris flow in the basin.

The results showed that implementing cross structures in the path of debris flows reduces the kinetic energy of particle movement by up to 85%. This percentage is crucial for consideration in mitigating the impact on areas that need protection.

Keywords: Debris Flow, Discrete Element Method (DEM), particles, YADE.

1 Introducción

En la planificación y desarrollo de obras civiles en los municipios de cada departamento del país, es esencial considerar las áreas de susceptibilidad ante la posible ocurrencia de eventos o desastres naturales. Estos desastres se pueden derivar de los cambios ambientales observados, siendo uno de ellos los procesos de movimientos en masa. Por lo tanto, la identificación y evaluación de las zonas vulnerables a este tipo de eventos deben ser parte integral de la estrategia de planificación para garantizar la seguridad y la sostenibilidad de las infraestructuras locales.

Existe variedad de procesos de movimientos en masa, entre ellos los Flujos de detritos que pueden ser catalogados como el movimiento en masa más destructivo que puede existir, por la combinación de material que lleva consigo. Los flujos de detritos y/o avalanchas de detritos pueden causar grandes pérdidas económicas, de infraestructura y humanas. Desde una perspectiva económica, en el año 2018 se llevó a cabo una evaluación de los impactos en los sectores agrícola y de vivienda, arrojando valores de 220 billones y 1.496 billones respectivamente, como resultado de los efectos derivados de este tipo de movimientos (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2018). Según la Unidad Nacional para la gestión del riesgo de desastres (UNGRD, 2020), *“Colombia se encuentra expuesta a amenaza sísmica alta e intermedia, siendo un país con múltiples amenazas geológicas.”* (UNGRD, 2020). Es decir que *“más del 87% de la población está expuesto a cualquier tipo de evento, específicamente un 82% está expuesta a movimientos en masa”*, dentro de los cuales se encuentran los flujos de detritos y avalanchas. (UNGRD, 2020)

Mocoa sufrió en el año 2017 un desastre clasificado dentro de los movimientos en masa mencionados, siendo uno de los más devastadores en la historia de Colombia. Las fuertes lluvias que cayeron esa madrugada en Mocoa generaron el desbordamiento del río Mulato, Sangoyaco y Taruca (Peñas, 2017). Debido a la combinación de material que produjo estos desbordamientos, una avalancha acompañada de agua, lodo y sedimentos; incluyendo rocas y escombros de gran tamaño dejaron grandes pérdidas en la zona.

La revisión de la planificación y el análisis de zonas críticas son fundamentales para mitigar los impactos de eventos, como el mencionado anteriormente. Es crucial considerar la vulnerabilidad de un municipio, que abarca aspectos como su fragilidad social, económica, impactos sociales, culturales e incluso pérdidas humanas. Estas situaciones se presentan

con mayor frecuencia cuando existen infraestructuras o poblaciones muy cercanas a zonas de riesgo, como se evidenció en el caso de Mocoa. La planificación cuidadosa y la identificación proactiva de áreas vulnerables son esenciales para reducir al máximo los riesgos asociados a eventos naturales.

Partiendo de estas variables en este trabajo se busca estudiar el efecto del planteamiento de barreras flexibles que ayuden a mitigar el riesgo que generaría un evento de este tipo.

El flujo de detritos como medio seco se analizó numéricamente utilizando la metodología de elementos discretos (DEM), implementando estructuras tipo barrera transversal a lo largo del flujo, específicamente la presentada en Mocoa en 2017 descrita anteriormente. A partir de las caracterizaciones realizadas in situ, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad mediante modelado numérico para obtener el modelo central y lograr la mayor proximidad y representación del evento original. Una vez elegidos los parámetros, se implementaron y analizaron las barreras: el impacto generado por los sedimentos sobre ellas, el análisis de la energía cinética durante el movimiento y, finalmente, el desplazamiento de las partículas. Se realizaron variaciones en la distribución de las barreras a lo largo de la cuenca y modificaciones en su geometría, con el fin de identificar las ventajas y el impacto que genera implementar este tipo de estructuras transversales en estos eventos.

La presente investigación está estructurada en diez (10) capítulos, ordenados según un proceso lógico para el desarrollo en función del cumplimiento de los objetivos.

Los capítulos 1 y 2 contienen la introducción y los objetivos y metodología del presente trabajo.

El tercer capítulo se inicia proporcionando una base de conocimientos sobre los movimientos en masa, que constituyen el tema central de esta tesis. Se aborda su conceptualización, clasificación y los diversos factores que ejercen influencia en dichos movimientos.

Después de haber explorado previamente los movimientos en masa, el cuarto capítulo se concentra en presentar y desarrollar el concepto de flujos de detritos, ya que se clasifica el evento de Mocoa como tal. En este capítulo, se examina cómo se analiza este tipo de eventos mediante formulaciones físicas y numéricas respaldadas por investigaciones y estándares internacionales para normalizar el análisis de este tipo de flujos. Además, se proporcionará información detallada sobre los tipos de estructuras utilizadas a nivel mundial para mitigar estos eventos.

La investigación se realiza mediante modelación numérica, aspecto que se explora en el quinto capítulo. En este capítulo, se esclarecen los principios fundamentales de la metodología basada en elementos discretos y se presenta el programa computacional seleccionado, en este caso, YADE. Se proporciona información detallada sobre los datos necesarios para la simulación y se anticipan los resultados que se obtendrán a partir de esta. Además, se profundiza en el modelo de contacto que será empleado para el análisis.

En el sexto capítulo se examina el evento ocurrido en Mocoa en el año 2017. Se destacan aspectos significativos como la descripción detallada, su ubicación geográfica y la caracterización de los materiales presentes en la zona, considerando aspectos geológicos y geotécnicos. Los parámetros para la simulación se derivan de investigaciones documentadas en fuentes públicas que ofrecen información valiosa sobre el evento.

La evolución de la investigación en relación con el modelo se presenta en el séptimo capítulo, donde se explora a fondo la elección y ajuste del modelo numérico con respecto al evento real. Se lleva a cabo un análisis de sensibilidad, detallando los parámetros y su validación. Además, se muestran gráficamente los resultados de las fuerzas de impacto y la energía simulada en el programa computacional. Se describe la información del evento simulado, tanto con barreras como sin ellas, y se analiza el efecto generado. Finalmente, se lleva a cabo una comparación entre ambos escenarios. En este último capítulo, se experimenta con variaciones en los parámetros geométricos y elásticos de las barreras, lo que es analizado y se ofrece como recomendación para investigaciones futuras.

Los capítulos 8, 9 y 10 contienen respectivamente las conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

2 Objetivos y Metodología

El objetivo de las barreras flexibles es poder disipar las velocidades de los flujos que se generan por las altas pendientes en las cuenca, y poder así mitigar su efecto reteniendo los sedimentos y detritos que caen y deslizan por arrastre de las tensiones generadas aguas arriba de las cuencas. En este trabajo se analizará el efecto de las barreras flexibles en el comportamiento del flujo variando la posición a lo largo de una cuenca específica. En consecuencia, a lo anterior, se busca medir el efecto que generaría las barreras en el flujo de detritos a partir de un análisis en elementos discretos aplicado al caso de Mocoa, específicamente en la cuenca alta de la Quebrada Taruca para finalmente comparar el efecto que generó el evento en el 2017 y el que generaría al tener la implementación de este tipo de barreras.

2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de barreras flexibles en el comportamiento de un flujo de detritos localizado en la cuenca alta de la quebrada Taruca en el municipio de Mocoa, a través de la modelación numérica utilizando DEM.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el flujo de detritos y las zonas críticas de acuerdo con investigaciones realizadas en la zona de la cuenca alta de la quebrada Taruca (Mocoa, Putumayo) con base en los eventos ocurridos en 2017.
- Modelar numéricamente un flujo de detritos en la zona de estudio con la utilización de barreras usando elementos discretos (DEM).
- Comparar los resultados obtenidos con el evento ocurrido en Mocoa en 2017 y los escenarios que incluyen la implementación de estructuras transversales.

2.3 Metodología

Con el fin de cumplir los objetivos relacionados anteriormente, se lleva la investigación de la siguiente manera.

En primer lugar, definir la zona de estudio y la longitud a ser analizada. Para esto se cuenta con la documentación pública de Corpoamazonía, de la cual se busca obtener la caracterización geomecánica de los materiales encontrados en el movimiento en masa, los volúmenes aportados por cada cuenca y las propiedades geotécnicas que pueden ser tomadas como información base para el análisis del comportamiento.

Se realiza un análisis por medio del método de elementos discretos por medio del cual se discretiza un medio y se obtienen las fuerzas que genera partícula-partícula en un tiempo determinado. Con este método se buscan las fuerzas que las partículas generan sobre la barrera y cuál sería el efecto de la intervención del flujo por medio de este tipo de estructuras. Esto se realiza por medio de la programación de un código en lenguaje Python utilizando el programa gratuito y de licencia libre "YADE".

Se analizan 2.0km de la cuenca alta de la Quebrada Taruca, en 3 etapas.

La etapa inicial la cual representa la cuenca sin ninguna intervención buscando calibrar los parámetros geotécnicos para las partículas y la cuenca; este análisis es realizado sin barreras. Obtenidos los parámetros se analizan etapas con barreras variando su posición (3 barreras con variabilidad de posición). Con estas etapas se comparan los valores obtenidos y se realiza un análisis correspondiente a los datos obtenidos. Bajo esta metodología se busca tener la aproximación más cercana a lo sucedido para poder encontrar las ventajas que tiene el uso de estructuras transversales en estos movimientos en masa que son de magnitudes muy altas lo que deja grandes pérdidas en la infraestructura urbana y vial cercana a las zonas de alto riesgo.

Una limitación identificada en esta metodología es la incorporación del flujo como un medio continuo y viscoso en el análisis de la cuenca. Esta inclusión requiere un costo computacional significativamente mayor para combinar ambas metodologías. En este trabajo se llevó a cabo los análisis exclusivamente para los detritos, considerando la fricción entre partículas, fricción entre partículas y cuenca, considerando los flujos en un medio seco. Esta consideración ha permitido el cumplimiento del objetivo de evaluar el efecto de barreras transversales. Esta decisión refleja un compromiso entre la complejidad del modelo y los recursos computacionales disponibles, destacando la importancia de equilibrar la precisión del análisis con la eficiencia computacional en este tipo de enfoques integrados.

El estudio ha sido subdividido y se ha trabajado por etapas las cuales son descritas a continuación:

2.3.1. Definición de la zona de estudio:

La definición de la zona de estudio implica la identificación y delimitación precisa del área geográfica que será objeto de análisis. Este proceso incluye la consideración de varios factores relevantes al fenómeno en cuestión. Por ejemplo: Topografía, Hidrología, Geología, Infraestructura, Historial de eventos. La combinación de estos factores permite

definir con precisión la zona de estudio, facilitando un análisis exhaustivo y contextualizado que puede llevar a la implementación de medidas de mitigación adecuadas. En el documento, esta definición de la zona de estudio se detalla en relación con la cuenca de la quebrada Taruca, destacando cómo estos factores específicos influyen en la selección del área y el enfoque del análisis.

La información base para esta etapa de la investigación son reportes e investigaciones realizadas por entidades privadas y públicas como el Consorcio Inypsa, la Unidad de Gestión del Riesgo, Universidad Javeriana, Corpoamazonia, Servicio Geológico Colombiano, entre otros; los cuales serán descritos en el desarrollo del documento.

2.3.2. Caracterización de los parámetros geomécánicos y geotécnicos del material del movimiento en masa:

Una vez revisada la información y definida la zona de estudio junto con los perfiles a implementar, se procede a verificar los parámetros que se utilizarán en la presente investigación. Esta etapa implica identificar y determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo y las rocas en la zona elegida, esenciales para el análisis de estabilidad y comportamiento del terreno. Los parámetros esenciales para esta investigación incluyen aquellos relacionados con el terreno que conforma la superficie de deslizamiento (la cuenca) y las partículas que se deslizan sobre ella.

Es necesario realizar un análisis exhaustivo de esta información, basada en los ensayos realizados por los equipos de ingeniería responsables de los informes guía para este proyecto. Estos ensayos incluyen granulometría, límites de Atterberg, resistencia al corte, módulos de elasticidad, entre otros. Con estos valores bien definidos, se pueden establecer parámetros de referencia para las modelaciones, permitiendo calibrar y validar el modelo numérico frente al comportamiento real del terreno.

2.3.3. Análisis de Sensibilidad: Modelación DEM para flujo sin barreras:

Una vez tengamos los parámetros iniciales necesarios para comenzar las modelaciones, nos adentramos en la fase de análisis de sensibilidad. Esta etapa es fundamental en la modelación numérica a través del Método de Elementos Discretos (DEM) para comprender el comportamiento del flujo de detritos en ausencia de barreras. El objetivo es evaluar cómo distintos parámetros afectan el resultado de la simulación, lo que nos proporciona una comprensión más profunda de los factores que influyen en el flujo y nos ayuda a tomar decisiones informadas sobre medidas de mitigación.

Durante este análisis, examinaremos cómo variables como el tamaño de las partículas, el coeficiente de fricción, la rigidez y la relación de Poisson impactan el comportamiento del flujo. Además, buscaremos ajustar el modelo para que reproduzca con precisión los eventos reales observados en la zona de estudio, lo que implica una calibración cuidadosa de los parámetros del modelo.

Al mismo tiempo, identificaremos los parámetros más críticos, aquellos que tienen un mayor impacto en la simulación. Esto nos permitirá centrar nuestros esfuerzos en la recopilación de datos y mediciones en futuras investigaciones, asegurando que nuestro modelo sea lo más preciso y representativo posible.

El análisis de sensibilidad es esencial para asegurar que el modelo DEM sea robusto y preciso. Permite identificar y mitigar incertidumbres en los parámetros, mejorando la confiabilidad de las predicciones del flujo de detritos. Además, proporciona información valiosa para el diseño de medidas de mitigación, como la ubicación y características de barreras de contención.

2.3.4. Calibración y validación del modelo DEM:

La calibración del modelo constituye un proceso meticuloso y fundamental en el ámbito de la modelación, especialmente en el contexto del análisis de fenómenos naturales como los flujos de detritos. Este proceso implica una evaluación minuciosa y continua de la sensibilidad del modelo frente a una variedad de parámetros, con el objetivo de ajustar dichos parámetros de manera que los resultados simulados se aproximen lo más fielmente posible a los datos reales observados.

Para llevar a cabo la calibración del modelo, se procede a comparar y analizar cómo varían las distancias de viaje en función del volumen de partículas en diferentes ubicaciones dentro del área de estudio. Este análisis sensible permite identificar aquellos parámetros del modelo que ejercen una influencia significativa en el comportamiento del flujo de detritos. Tales parámetros pueden incluir las propiedades físicas y mecánicas del material, así como las condiciones iniciales del sistema.

Durante el proceso de calibración, se realizan ajustes iterativos en los parámetros del modelo, con el fin de lograr una concordancia óptima entre los resultados simulados y los datos observados en la realidad.

Es esencial destacar que la calibración del modelo es un proceso continuo y riguroso, que demanda una cuidadosa evaluación de los resultados obtenidos en cada iteración. Se requiere un enfoque holístico que considere no solo la precisión de los resultados en términos absolutos, sino también la coherencia y consistencia del modelo en diferentes escenarios y condiciones. Solo a través de este proceso iterativo y exhaustivo se puede obtener un modelo confiable y representativo del fenómeno estudiado, capaz de proporcionar información valiosa para la comprensión y la gestión de riesgos en entornos naturales vulnerables.

2.3.5. Estudio del efecto de barreras por modelación DEM:

Una vez que se ha alcanzado el modelo final, se abre paso a una fase crucial: la evaluación del impacto de las barreras de tipo pared dentro del flujo de detritos. Esta etapa representa un momento crucial en la investigación, ya que implica explorar cómo la introducción de estas estructuras puede influir en la dinámica y la mitigación del flujo de detritos en el área de estudio.

La evaluación del efecto de las barreras tipo pared abarca diversos aspectos. En primer lugar, se estudia el impacto de las barreras en la reducción de la velocidad y la energía del flujo, fuerzas de impacto en la superficie de la barrera y la energía cinética de las partículas durante el movimiento.

En último lugar en esta investigación, se analiza cómo estas estructuras interactúan con el flujo de detritos, considerando factores como su altura, ubicación y geometría. Se examina cómo estas variables afectan la capacidad de las barreras para interceptar y retener los sedimentos en movimiento, y cómo influyen en la distribución de las fuerzas sobre la superficie de las barreras.

La evaluación del efecto de las barreras tipo pared también implica consideraciones prácticas y operativas, como la viabilidad de su implementación y mantenimiento en el entorno natural. Se mencionan en la investigación aspectos logísticos, económicos y ambientales relacionados con la instalación y el mantenimiento de estas estructuras, así como posibles desafíos y limitaciones que podrían surgir en el proceso.

En resumen, la evaluación del efecto de las barreras tipo pared constituye una etapa integral y multidimensional en la investigación, que busca comprender cómo estas estructuras pueden contribuir a la gestión y mitigación de riesgos en áreas propensas a flujos de detritos. A través de un enfoque integral y holístico, se busca obtener información valiosa

que pueda informar la toma de decisiones y la implementación de medidas de protección efectivas en entornos naturales vulnerables.

2.3.6. Comparativo DEM: Evento sin Barreras y evento con barreras:

Por último, en esta etapa se busca hacer un análisis fundamental que busca entender el impacto de la introducción de barreras en la dinámica del flujo de detritos. Esta comparación se realiza mediante la modelación numérica utilizando el Método de Elementos Discretos (DEM) anteriormente ya mencionados, lo que permite simular y evaluar el comportamiento del flujo en ambas situaciones.

En el caso del flujo sin barreras, el análisis se centra en estudiar la propagación y el comportamiento natural del flujo de detritos en ausencia de estructuras de contención.

Por otro lado, en el caso del flujo con barreras, se introducen barreras de tipo pared en la simulación para evaluar su efecto en la mitigación y control del flujo de detritos. Se estudia cómo estas barreras interactúan con el flujo, interceptando y desviando los sedimentos, así como reduciendo su velocidad y energía.

Se analiza la eficacia de las barreras para proteger áreas vulnerables y minimizar los riesgos asociados con el flujo de detritos, como la erosión del suelo y el daño a infraestructuras.

La comparativa DEM entre ambos escenarios permite identificar y cuantificar los beneficios y limitaciones de la implementación de barreras en la gestión de riesgos por flujos de detritos.

Se examinan aspectos como la reducción de la energía cinética, las fuerzas sobre las barreras, y la protección proporcionada a áreas críticas. Esta evaluación proporciona información valiosa para la toma de decisiones en la planificación y diseño de medidas de mitigación de riesgos en áreas propensas a flujos de detritos.

3 Movimientos en masa

3.1 Definición

El concepto de movimiento en masa abarca todos los desplazamientos descendentes de rocas, detritos o suelo provocados por la acción de la gravedad, según la definición de Cruden (1991) como lo indica Montero Olarte (2017).

3.2 Clasificación

Los movimientos en masa pueden ser de diferentes tipos. Colombia se caracteriza por tener una gran diversidad de accidentes geográficos. Se resalta la presencia de cadenas montañosas, que permiten dividir al territorio en una región montañosa al occidente y una región plana al oriente. Las principales cordilleras son tres: oriental, central y occidental; que, junto con la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía de la Macarena y otras más pequeñas, definen las características geomorfológicas del país. Estas condiciones topográficas son el primer factor natural del territorio para que se presenten movimientos en masa. IDIGER (2019).

Algunos tipos de deslizamientos y movimientos en masa se pueden catalogar en:

- **Deslizamientos rotacionales:** el deslizamiento se produce cuando las resistencias superan los ángulos de estabilidad del cuerpo, común en suelos cohesivos y con una superficie de falla de tipo curva. Este tipo de evento conduce a la acumulación de material en la base de la pendiente. También se manifiesta en materiales granulares o en rocas altamente fracturadas, donde la presión de poros alcanza niveles que provocan una falla rotacional en lugar de una traslacional. Las fallas rotacionales también pueden presentarse en taludes de roca altamente meteorizada. (Montero Olarte, 2017)
- **Deslizamiento traslacional:** De acuerdo con Hutchinson (1988), este tipo de deslizamiento implica una falla por cortante a lo largo de una superficie casi plana en dirección a la pendiente, a veces canalizada en sección transversal. El desplazamiento del material ocurre de manera casi paralela al perfil del terreno, y se establece en algunas investigaciones e informes que la relación D/L es de 0,1 o menos. (Montero Olarte, 2017)
- **Flujos de lodo o tierra:** Sharpe (1938), considera 3 tipos de flujos rápidos: flujo de lodo, flujo de tierra y flujos de detritos. Los flujos de lodo y tierra son el tipo de flujo

más gradual; se encuentra con frecuencia en áreas de colinas o terrenos con relieve bajo, especialmente en regiones tropicales húmedas. En estas zonas, la meteorización provoca la formación de capas superficiales más sueltas y porosas que descansan sobre suelos arcillosos relativamente impermeables (Sharpe 1938, en Schultz & Cleaves 1955).

- **Flujos de detritos:** Estos movimientos se caracterizan por ser los más veloces. Los flujos de lodo en áreas áridas o semiáridas podrían asemejarse a flujos de detritos, siendo muy comunes en regiones húmedas con una cobertura vegetal bien establecida. Además, se trata de desplazamientos que involucran rocas descompuestas o material relativamente suelto.
- **Desprendimiento de rocas:** Según Hutchinson (1988), estas se describen como el descenso, bastante libre y extraordinariamente rápido, de masas de suelo o roca, independientemente de su tamaño, desde pendientes empinadas o acantilados.
- **Vuelco:** De acuerdo con Hutchinson (1988), el volcamiento de un bloque de roca sucede cuando la fuerza resultante debido al peso del bloque cae fuera del punto de pivote, ubicado en la base del bloque afectado. Este fenómeno es frecuente en masas rocosas con discontinuidades fuertemente inclinadas y puede implicar grandes volúmenes.

Varnes desarrolló la clasificación sistemática del movimiento en masa basada en el mecanismo de falla y los materiales que componen la matriz y están siendo alterados (Montero Olarte, 2017). Esta clasificación (Figura 3-1) relaciona 5 tipos de movimientos en masa: caída, deslizamientos, propagación lateral, flujo y avalancha. Varnes realiza una subclasificación donde tiene en cuenta factores complementarios como la velocidad y el contenido de agua, aire o hielo que tiene el mecanismo representado.

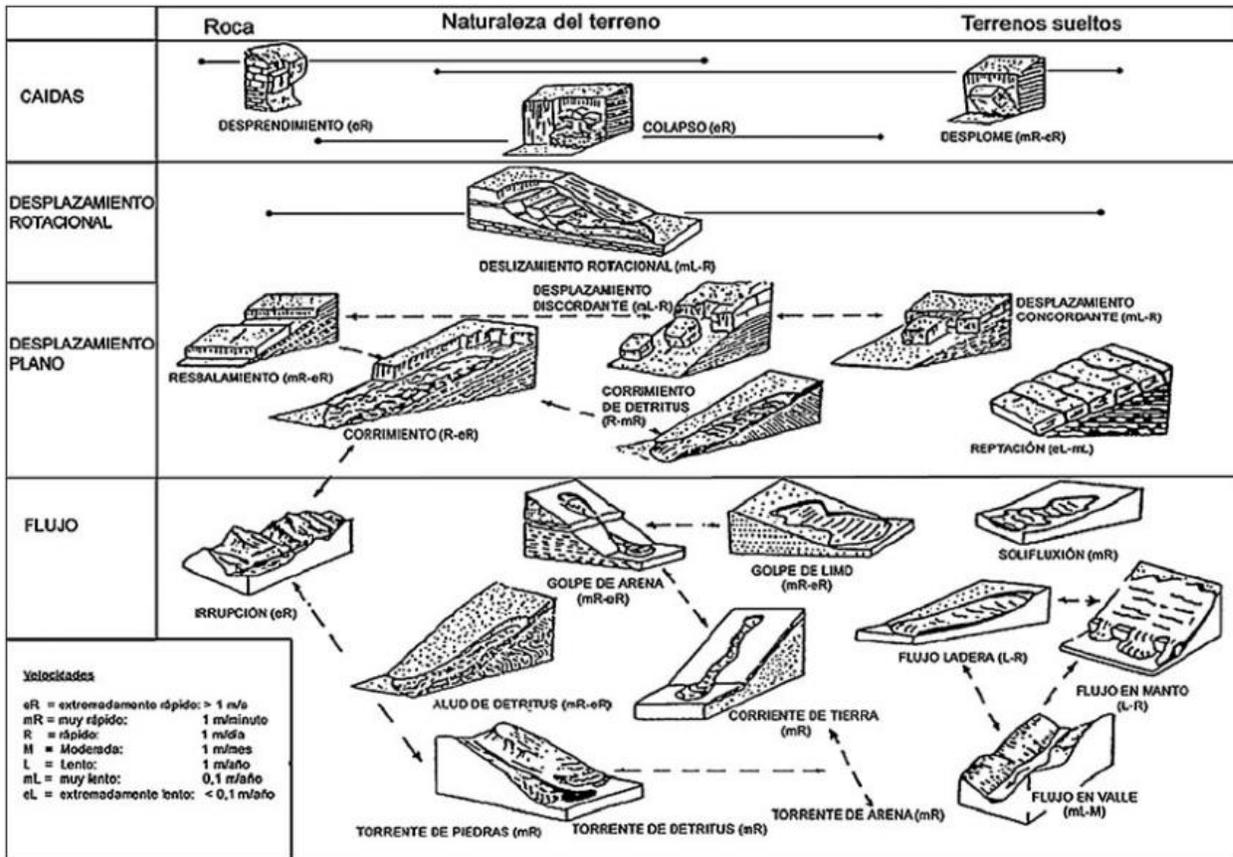


Figura 3-1 Clasificación de movimientos en masa referenciado de Varnes (1958) y traducido de Bell (1993).

Fuente: (García Yagüe , 1988)

La Figura 3-1 tomada de Varnes (1958), evidencia en materiales no consolidados y de acuerdo con el incremento de agua varios tipos de mecanismo, entre ellos flujos de detritos y avalanchas de detritos en donde el material deslizable es una combinación de roca y suelo. Estos flujos y avalanchas son representados por masas que tienen movimientos en largas distancias de forma viscosa la mayor parte del trayecto.

3.3 Factores que influyen en un movimiento en masa

Como bien se menciona anteriormente, un movimiento es provocado por una serie de factores que generan un cambio de los esfuerzos en la ladera y así pierden propiedades que mantienen la estabilidad del terreno, generando caídas, flujos, desprendimientos, etc...

Cuando se produce un movimiento, el especialista a cargo intenta identificar la causa que lo ha provocado. Con el tiempo, factores tanto externos como internos pueden modificar la seguridad y estabilidad de la estructura de las laderas, lo que resulta en desplazamientos.

Además, la frecuencia de estos eventos provoca cambios más rápidos en las propiedades que inicialmente garantizaban la estabilidad.

Terzagui (1950), dividió las causas de los movimientos en causas externas las cuales causan incrementos en la resistencia de corte (por ejemplo; cambios geométricos, descargas en los picos de las pendientes, cargas en la cresta de las laderas, golpes y vibraciones, reducciones y cambios en régimen de agua) y las causas internas que disminuyen la resistencia de corte (por ejemplo; fallas progresivas, clima, erosiones por filtración). (Popescu, 2002).

En la *Figura 3-2* se muestra los cambios en el Factor de seguridad respecto al tiempo y algunas causas o factores que pueden influir en la estabilidad del terreno.

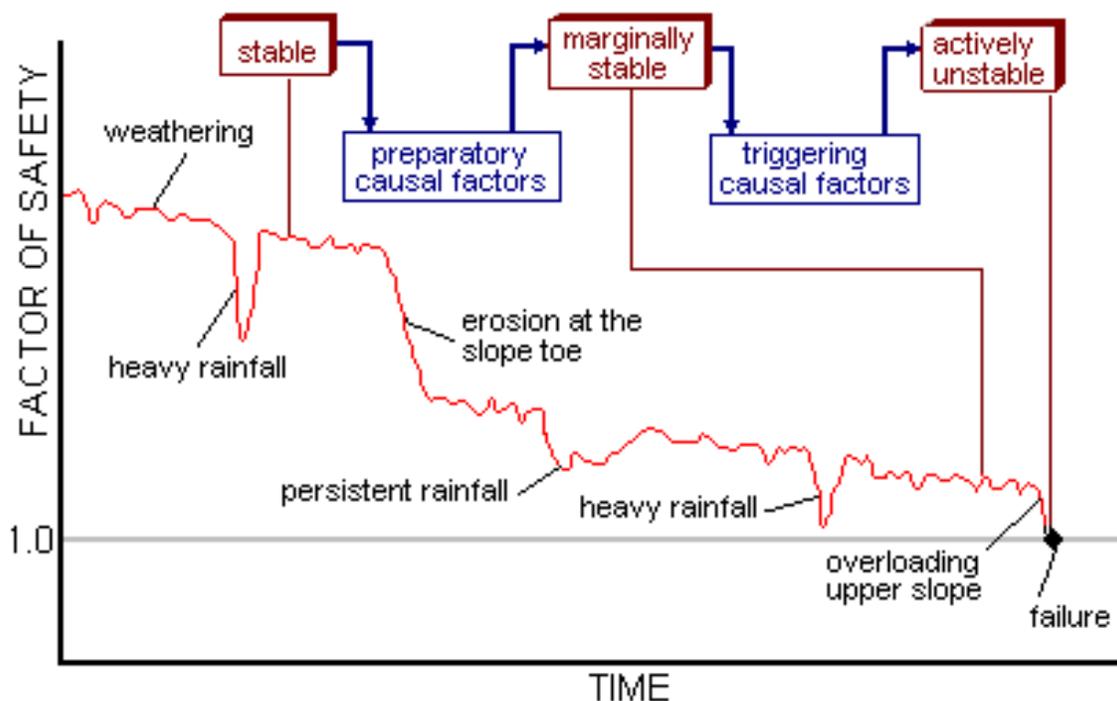


Figura 3-2 Ejemplo de cambios en el Factor de Seguridad respecto al tiempo.

Fuente: (Popescu, 2002)

Así de esta manera, darnos cuenta de que, en tiempo largo, no se puede atribuir el deslizamiento a un solo factor o a una sola causa (Popescu, 2002), puesto que es una recolección en varios años de varios sucesos que pueden hasta suceder de forma progresiva.

“De todos los procesos geológicos, los deslizamientos de tierra son uno de los más perjudiciales para las obras del hombre.” (Varnes D. , 1976).

A continuación, algunos factores que causan cambios y deslizamientos del terreno:

3.3.1 Impactos de Terremotos

Un terremoto o sismo es un movimiento fuerte sobre la tierra, en este caso genera cambios en las tensiones de corte aumentándolas y creando superficies de falla potenciales de deslizamientos (Terzaghi, 1950).

Los sismos se consideran manifestaciones de actividad tectónica, que pueden causar deslizamientos de tierra, debido a la reducción de la resistencia del suelo por la carga cíclica o a la reducción de la estabilidad de la pendiente por las fuerzas dinámicas que actúan en direcciones adversas (Duncan, 2005).

3.3.2 Lluvia

Las temporadas invernales en Colombia pueden generar grandes afectaciones a nivel socioeconómico y de infraestructura. Un ejemplo claro en Colombia es el Km 58 de la vía al llano. La Sociedad Colombiana de Ingenieros afirmó que: “los niveles de precipitación fueron altos, llegaron a ser 2000 a 3000 mm de lluvia acumulada al año, siendo una de las zonas con mayor precipitación en el país”. (Sociedad Colombiana de Ingenieros, 2020) Aunque esa fue una de las tantas razones por las que ocurrió dicho deslizamiento, nos demuestra que la lluvia es un factor importante en el ámbito de susceptibilidad ante materiales frágiles.

En Hong Kong, la tormenta de 1966 ocasionó 29 deslizamientos que ocasionaron 35 personas muertas y alrededor de 8500 tuvieron que ser evacuados (Conforth, 2005). La lluvia acumuló cerca de 460 mm y el mayor del deslizamiento ocurrió cerca al pico de intensidad que fue 150mm por hora.

Un deslizamiento puede llegar a ser el resultado de en un corto tiempo tener altas intensidades de lluvia.

3.3.3 Aumento de la Superficie Freática

El aumento del nivel freático puede llegar a producirse en periodos largos, causa una disminución en la resistencia al corte del material.

3.3.4 Cambios estructurales progresivos en los materiales de la formación de la pendiente

Los cambios de los materiales en las pendientes y la progresiva depositación de los mismos puede generar diferentes superficies de falla que ocasionen deslizamientos, de esta manera disminuyendo los esfuerzos efectivos creados en la superficie.

3.3.5 Reducción Rápida

Esto refiere al descenso del nivel del agua ya sea en un flujo de un río o un reservorio. Este evento puede causar superficies de falla dependiendo de varias de las propiedades de resistencia del material que se tiene, cómo lo es el peso específico del material, la cohesión, ángulo interno de fricción y así mismo propiedades del agua combinado al material. De esta manera se revisa que el cambio de este aumento y descenso del agua pueda ser controlado sin generar pérdidas de material en la zona.

3.3.6 Licuefacción espontánea

La licuefacción espontánea es la pérdida de resistencia al corte de un suelo no cohesivo y hay un incremento de la presión del agua en los poros del suelo, causando de esta manera deslizamientos de manera súbita (Diccionario de Geotecnia, 2005).

3.3.7 Filtración de una fuente artificial de agua

Las infiltraciones de una fuente de agua dentro del material pueden causar cambios en los estados de esfuerzos, ya que pueden ser volúmenes de agua importante que se pueden infiltrar dentro del terreno observado. La mayoría de los deslizamientos de este tipo ocurren cuando se acercan a pendientes en las cuales los materiales pueden ser de alguna manera susceptibles ante la filtración del agua.

3.3.8 Reactivación de antiguos deslizamientos

Los deslizamientos tienen una periodicidad de ocurrencia.

El origen geológico de deslizamientos antiguos es tan diverso que comúnmente se asume que estos ocurren durante el pleistoceno. A menudo estos deslizamientos de escombros son heterogéneos, mezclado con suelo y roca proveniente de la pendiente arriba. Los efectos de las actividades constructivas sobre deslizamientos antiguos muestran que, en Portland, Oregón se reactivó un antiguo deslizamiento debido a las excavaciones de dos reservorios (Conforth, 2005).

Terzagui hacía referencia a las causas anteriores para determinar el porqué de un deslizamiento. Conforth menciona otros tipos de causas adicional a las anteriores, que es de gran importancia poder evidenciar acá:

3.3.9 Meteorización

La meteorización es un proceso de conversión natural del material de roca a suelo, ya sea a través del hielo, humedecimiento o secado. Lo que representa un decrecimiento de las propiedades de los materiales y de la roca en cuestión. Es un cambio de propiedades físicas y químicas que puede generar cambios de una roca maciza dura a un material blando sin propiedades de resistencia, causando inestabilidades y así deslizamientos.

3.3.10 Cargas externas

La construcción de terraplenes o estructuras externas requiere una evaluación geotécnica en consonancia con la composición del suelo presente en la zona de construcción. Esto se realiza con el propósito de prevenir posibles superficies de falla que carezcan de las resistencias requeridas para soportar las cargas externas.

3.3.11 Cortes de Terreno, Ladera o Talud

Normalmente los cortes de algún material se realizan con tal fin de estabilizar el terreno dejando una superficie y pendiente a tal grado que no exista la posibilidad de deslizarse. Estos cortes se hacen para construcciones civiles que se encuentren cerca; en estos casos hay que tener en cuenta que las nuevas pendientes de corte realizadas deben tener un respectivo análisis para que los esfuerzos de corte puedan resistir.

3.3.12 Presión Artesiana

La presión artesiana ocurre cuando la cabeza de agua subterránea en el suelo o roca es mayor que la cabeza del suelo suprayacente. La cabeza de presión confinada es estable bajo condiciones naturales existentes, pero se convierte inestable cuando se realiza un corte de talud. Permitiendo que el gradiente hidráulico de la capa artesiana ascienda, causando un nacedero de agua. Los cuales, en muchos casos produce flujos de lodo (Conforth, 2005).

3.3.13 Erosión de Ríos y costas

Las erosiones de ríos y costas ocurren en su mayoría cuando hay un aumento de niveles de agua los cuales buscan ampliar y profundizar, movilizándolo el material de tal manera que las tensiones de arrastre generadas por el agua son mayores a las soportadas por los materiales. Así van socavando las pendientes generando presiones artesianas que hacen que el material colapse.

3.3.14 Flujos de Escombros

Ocurren durante tormentas de alta intensidad. Los flujos de escombros son un proceso normal geológico por el cual un valle estrecho y escarpado está ampliándose y profundizándose, estos flujos ocurren en intervalos periódicos (Conforth, 2005).

Aunque pueden ser numerosos los factores que contribuyen a la ocurrencia de un evento de esta magnitud, es fundamental tenerlos en consideración y evaluar en qué tipo de amenaza podrían convertirse. Específicamente en el caso de los flujos, varios factores pueden estar implicados, y cada uno de ellos tiene el potencial de desencadenar estos eventos.

4 Flujos de Detritos

Los flujos de detritos ocurren cuando masas como sedimentos saturados con agua surgen pendiente abajo a la respuesta de la acción de la gravedad (Iverson, 1997). Esta es una descripción muy general y amplia de los movimientos en masa tipo flujo de detritos, sin embargo, en el presente capítulo se evidenciarán las diferentes definiciones que se han encontrado durante el tiempo para este tipo de movimiento en masa.

4.1 Definición de Flujo de Detritos

Según Cruden & Varnes (1996), el término flujo se refiere a movimientos espacialmente continuos con superficies de cortes y estrechamente espaciadas, las cuales no se preservan (Montero Olarte, 2017). Los autores hacen referencia a varios tipos de flujos, los cuales son comunes como lo son los flujos de detritos y avalanchas de detritos (*Figura 4-1*):

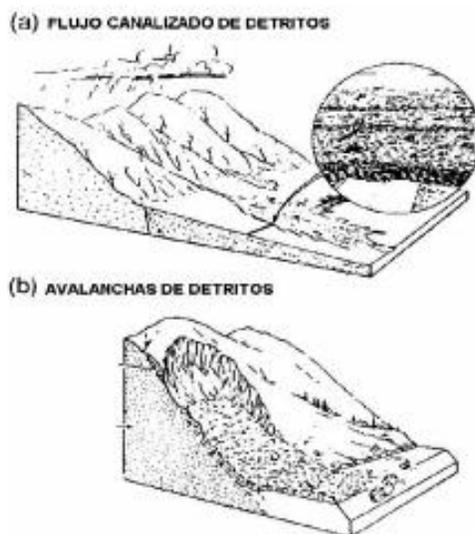


Figura 4-1. a. Flujos de Detritos, b. Avalancha de Detritos

Fuente: Cruden & Varnes 1996 (Montero Olarte, 2017)

Sin embargo, en el nivel actual de conocimiento no se confirma una distinción clara entre flujos y avalanchas de detritos, adicional a que los flujos de detritos pueden pasar de forma gradual a ser avalanchas de detritos y ocurrir de forma simultánea dentro de un mecanismo.

En el año 1910, Die Muren por Josef Stiny fue uno de los primeros términos utilizados para este tipo de deslizamiento, que comienza con una definición de Flujo de Detritos como una descripción de una inundación en un torrente de montaña, cargando y transportando consigo sedimentos. Dado que es un material que se desliza y es transportado por una larga longitud, este material se combina y es transformado en una unidad viscosa la cual está formada por agua, suelo, mezcla de arenas, grava, roca, madera y lleva lo que consigo se encuentre ladera abajo.

Sharpe en 1938 afirma que las avalanchas y flujos de detritos son movimientos rápidos, que son frecuentes en regiones húmedas con una cobertura vegetal bien desarrollada y transporta materiales que están relativamente sueltos o roca muy meteorizada. Este tipo de movimientos siguen trayectorias largas y estrechas con velocidades altas en medio de pendientes fuertes. Estos primeros deslizamientos que ocurren en la cuenca alta son ocasionados por fuertes lluvias y debido a las pendientes altas el deslizamiento toma impulso y fluye hasta la base de las laderas con alto contenido de agua y material transportado (Montero Olarte, 2017).

Los flujos y avalanchas de detritos se caracterizan por tener movimientos frecuentes y erosiones tipo cárcavas de acuerdo con lo explicado por Cruden y Varnes en 1978. Estos flujos son desencadenados por fuertes lluvias y los materiales involucrados pueden variar desde arcillas hasta bloques de grandes tamaños. Son desarrollados en rocas o suelos y sus principales características a evaluar son la velocidad y humedad las cuales son asociadas a los efectos y daños posibles que causan en el impacto (Montero Olarte, 2017).

Hungr (2001) afirma que es mejor preservar el término flujo de detritos como un fenómeno que incluye una alta pendiente inicial que considera un flujo rápido confinado en un canal el cual es depositado aguas abajo en un abanico. Un ejemplo concreto sería un flujo de detritos que desciende por una ladera empinada de una montaña, confinándose inicialmente en un canal natural antes de extenderse y depositarse en un abanico en la base de la pendiente. En Colombia, hay varias poblaciones que se encuentran en áreas propensas a la formación de abanicos aluviales debido a la topografía del terreno y las condiciones geológicas. Por ejemplo, Salgar (Antioquia), Armenia (Quindío) e Ibagué (Tolima). Es importante señalar que estas poblaciones pueden enfrentar riesgos asociados con eventos naturales como avalanchas o flujos de detritos, y las autoridades locales suelen implementar medidas de prevención y gestión de riesgos para proteger a las comunidades.

El comportamiento de un flujo de detritos es muy similar al efecto de la “Nuez de Brasil”, el cual es explicado a continuación.

La teoría de la segregación por tamaño de partículas, comúnmente referido como el "efecto de la nuez de Brasil", ha sido objeto de investigación durante varios años. Este estudio se llevó a cabo debido al proceso complejo y la intervención de diversos factores que pueden influir en esta teoría. Además, la observación de la segregación por tamaño de partículas no se limita a un solo campo; ha sido aplicada en diversas disciplinas como la fabricación, astronomía, geología e ingeniería.

“Al abrir una caja de nueces mixtas, una experiencia común es encontrar las nueces más grandes en la parte superior” (Gajjar et al., 2011), es una premisa en la que se centraliza el efecto de la segregación de partículas. Resulta algo contradictorio que las semillas de mayor tamaño se encuentren en la superficie y las pequeñas en el fondo, situación que se puede ver reflejada en algunos de los flujos conocidos dentro de los movimientos en masa que se presentan en la Ingeniería. Este fenómeno se atribuye a una combinación del empaquetamiento y las interacciones entre partículas dentro del material granular.

El efecto puede ser utilizado para la determinación del comportamiento en un movimiento en masa como lo son los flujos de detritos. Al tener dentro de los movimientos en masa vacíos que pueden ser llenados por los materiales más finos, las partículas de tamaños mayores van a tender a subir a la superficie por las colisiones generadas en los movimientos descritos por la definición de un flujo de este tipo. Toda esta dinámica genera y contribuye al deslizamiento, flujo y transportes de materiales a velocidades aplicando el efecto de la segregación de partículas o el conocido efecto de la nuez de Brasil como se muestra en la *Figura 4-2*.

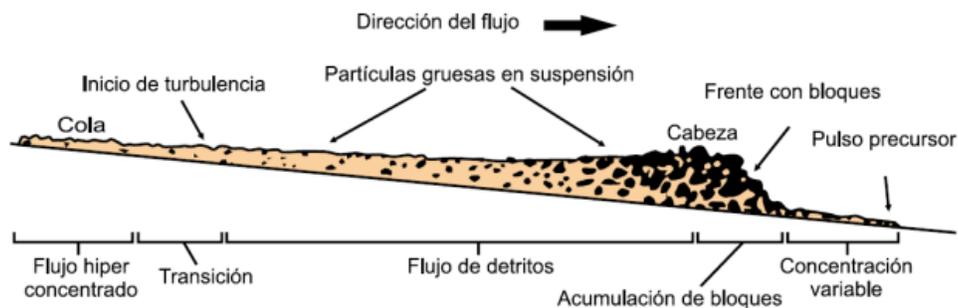


Figura 4-2 Corte Esquemático típico de un flujo de detritos.

Fuente: (Muñoz Muñoz, 2018).

La teoría puede comprenderse observando cómo se comportan las partículas en un sistema granular cuando se les somete a vibración o agitación. Las partículas más grandes tienden a ubicarse en la parte superior debido a diferencias en aceleración, flujo de partículas, segregación por tamaño y un efecto de empaquetamiento. Durante la vibración, las partículas más grandes experimentan una aceleración efectiva menor, ya que las fuerzas aplicadas tienen un impacto menor debido a su mayor masa. Además, debido a sus dimensiones, las partículas más grandes encuentran más dificultades para ajustarse y moverse entre las partículas más pequeñas, lo que facilita su desplazamiento hacia la parte superior del sistema.

4.2 Modelación física de los flujos de detritos

La evaluación de flujos y avalanchas de detritos se realiza a partir de una caracterización que brinda parámetros para analizar el riesgo e impacto que puede generar un movimiento de este tipo. Esta evaluación se basa en la geomorfología, sedimentología y estratigrafía de los materiales que conformen la matriz del flujo y avalancha de detritos (Giraud, 2005).

Los flujos de detritos son considerados flujos no newtonianos, esto debido a que a lo largo de la longitud va recolectando sedimentos que hacen que su densidad sea cada vez mayor, superando la del agua y aumentando la resistencia a la deformación. Esto genera que el material gráficamente no se comporte linealmente, mientras que los fluidos newtonianos su comportamiento si es así.

Para evaluar un flujo de detritos de acuerdo con investigaciones consultadas se pueden tener varios parámetros en cuenta y normalmente son evaluados bajo dos condiciones: Estática y dinámicamente.

Algunos aspectos físicos que están asociados al movimiento del flujo de detritos son:

- Velocidad del flujo: Rangos que pueden variar entre 1 a 15m/s (Muñoz Muñoz, 2018). En pendientes pronunciadas, las velocidades suelen ser más altas, generando tensiones de arrastre intensas y facilitando el transporte del material sedimentario. Cuando los canales presentan curvaturas, las velocidades aumentan en las márgenes internas, resultando en tensiones más fuertes y una mayor erosión en esa zona. En la *Figura 4-3*, se observa cómo la relación entre el radio de curvatura puede influir en el esfuerzo cortante, particularmente cuando los radios son pequeños. Este fenómeno conlleva a aumentos en la velocidad del flujo y en las tensiones en esas áreas específicas.

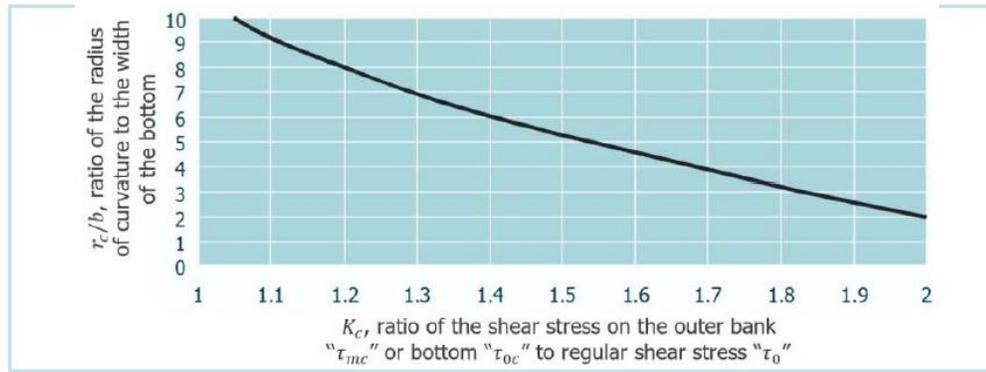


Figura 4-3 Incremento de tensión de arrastre en canales curvos.

Fuente.: (Maccaferri, 2021)

- Viscosidad y densidad: Las densidades del material están directamente relacionadas con el comportamiento del flujo debido a los aportes de material que va teniendo en el trayecto. Cuando estas densidades aumentan, la viscosidad también debido a la mezcla de material combinado (arenas, gravas, material fino, palos de madera, etc..) que puede tener en el movimiento.
- Energía de impacto: El flujo transporta una energía que se traduce en energía cinética del movimiento, la cual se ve influenciada por la velocidad y la masa (ver Ecuación 4-1), como se mencionó anteriormente. Bajo este contexto, es viable evaluar las energías a lo largo del recorrido y tomar las medidas necesarias en los puntos con mayor riesgo frente a este tipo de eventos.

$$Ec = \frac{1}{2} \times m \times v^2$$

Ecuación 4-1 Energía Cinética donde m = masa de la mezcla y v = Velocidad de la mezcla.

Se han realizado varias investigaciones para poder determinar cuál es la fuerza de impacto del flujo ante un tipo de barrera que pueda interponerse. Esta fuerza es relacionada con la presión hidrostática a la altura del flujo cinético (Segalini & Vagnon, 2016).

La formulación para analizar está fuerza en condiciones estáticas está dada en la Ecuación 4-2:

$$F = k \times \rho_m \times g \times h_f$$

Ecuación 4-2 Fuerza máxima de impacto condiciones estáticas.

Donde,

$k = \text{Coeficiente est\u00e1tico.}$

$\rho_m = \text{Densidad de la mezcla, } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$g = \text{Gravedad, } \left(\frac{m}{s^2}\right)$

$h_f = \text{Altura del flujo, (m)}$

Por otro lado, los modelos hidrodin\u00e1micos eval\u00faan que el empuje es dado por un fluido homog\u00e9neo generando un empuje en el movimiento, es decir din\u00e1micamente, el cual es evaluado dadas en la Ecuaci\u00f3n 4-3:

$$F = \alpha \times \rho_m \times vf^2$$

Ecuaci\u00f3n 4-3 Fuerza de impacto para condici\u00f3n din\u00e1mica.

Donde,

$\alpha = \text{Coeficiente din\u00e1mico.}$

$\rho_m = \text{Densidad de la mezcla, } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$vf^2 = \text{Velocidad del flujo, } \left(\frac{m}{s}\right)$

Jiang y Zhao(2015) a partir de estas combinaciones, realizaron una propuesta nueva para la estimaci\u00f3n de las fuerzas de impacto, en la que inclu\u00eda la influencia de las fuerzas tangenciales durante el impacto y la fricci\u00f3n entre la barrera y el flujo siendo estas las fuerzas resistentes al movimiento. A continuaci\u00f3n es representada la formulaci\u00f3n de las fuerzas resistentes:

$$F_{drag} = \delta \rho_m vf^2 A \times \cos \beta - \rho_m gh_f \times \tan \varphi \cdot \frac{H_{max} - h_f}{\sin \theta} \cos \beta \cos \theta B$$

$\delta =$

$\rho_m = \text{Densidad de la mezcla, } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$vf^2 = \text{Velocidad del flujo, } \left(\frac{m}{s}\right)$

$$h_f = \text{Altura del flujo, (m)}$$

$$g = \text{Gravedad, } \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

Como se evidencia anteriormente, las fuerzas de impacto de los flujos son representados por densidades, altura del flujo, velocidades, pendiente y también en los ángulos de fricción dado al rozamiento y resistencia que las partículas van a tener con la superficie lo cual verá afectada directamente la velocidad, ya que entre mayor sea ese rozamiento más lento irá el flujo. En superficies lisas, como lo es el concreto, por ejemplo, las partículas rodarían libremente mientras que unas condiciones con mayores rugosidades serían todo lo contrario.

4.3 Modelación numérica de los flujos de detritos

La evaluación de flujos y avalanchas de detritos se realiza a partir de una caracterización que brinda parámetros para analizar el impacto que puede generar un movimiento de este tipo. Esta evaluación se basa en la geomorfología, sedimentología y estratigrafía de los materiales que conformen la matriz del flujo y avalancha de detritos (Giraud, 2005).

Siendo una parte inicial del presente trabajo para así realizar los modelos necesarios en la implementación de las barreras flexibles y su análisis por medio de la modelación numérica utilizando el método de los elementos discretos (DEM, por sus siglas en inglés: Discrete/Distinct Element Method). Algunas de las investigaciones realizadas para flujos de detritos son descritas a continuación en las que se evalúan diferentes tipos de parámetros en los materiales matemática y numéricamente,

- **Predicción de la fuerza de impacto de los flujos de escombros según la distribución y el tamaño de las partículas, (He & Li, 2014):** El análisis de la fuerza de impacto se puede abarcar desde tres aspectos: la presión dinámica del lodo del flujo de detritos, la fuerza de impacto de las partículas gruesas y el impacto que generan los cantos rodados. Se llevaron a cabo cálculos para evaluar el impacto de un flujo de detritos viscoso contra una barrera de contención, para ello se realizaron ciertas suposiciones para el estudio, entre las cuales se incluyen: (1) la altura de la barrera de contención es de 6 m, (2) la profundidad del flujo de detritos es de 2 m y (3) la velocidad promedio del flujo de detritos es de 5 m/s. Algunos parámetros se establecieron mediante mediciones de campo o experimentos de laboratorio. En la investigación, se examinó cómo la velocidad del material al impactar con la barrera de contención se relaciona con la fuerza de impacto.

Los resultados de los cálculos, que se muestran en la *Figura 4-4*, revelan una conexión lineal entre la velocidad y la fuerza de impacto. Cuando las partículas golpean la barrera de contención a mayores velocidades, la fuerza de impacto también aumenta. Desde esta investigación se concluye que la fuerza de impacto está relacionada con la velocidad de las partículas, entre mayor sea la velocidad mayor será esta fuerza.

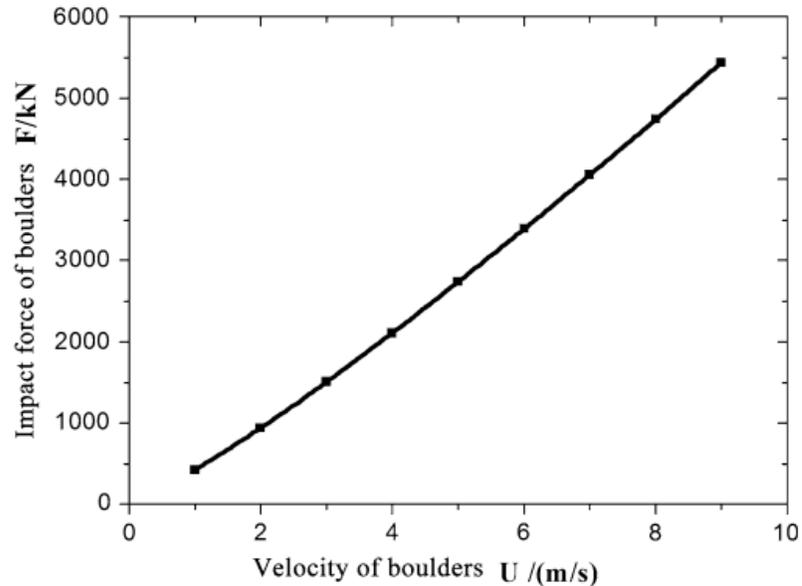


Figura 4-4 Relación entre velocidad y Fuerza de Impacto.

Fuente: (He & Li, 2014)

Esta variable será también evaluada en el flujo, dado que hay pendientes dentro de la geometría en estudio que generan una mayor velocidad en las partículas lo que puede generar mayor fuerza de impacto en las barreras propuestas.

- **Simulación de las fuerzas de impacto de flujos granulares contra obstáculos, variando su contenido de sólidos y velocidad,** (García Amaya, 2018):

La determinación de los parámetros cruciales para el control del flujo incluye la densidad, altura, velocidad, ancho, pendiente y ángulo de fricción del movimiento. En la simulación utilizaron modelos matemáticos bajo una formulación en Matlab teniendo en cuenta 13 referencias de la literatura. El autor analizó la incidencia del parámetro velocidad y densidad en las formulaciones. Los parámetros cruciales mencionados anteriormente, se encuentran comúnmente presentes en las ecuaciones desarrolladas para el análisis hidrodinámico e hidrostático de los flujos. Se llega a la conclusión de que todas las variables geomecánicas

consideradas por el autor son indicativas del comportamiento del movimiento. Sin embargo, se destaca nuevamente que la velocidad emerge como una variable especialmente significativa en relación con la fuerza de impacto.

En este estudio, el autor lleva a cabo una revisión bibliográfica con el propósito de examinar la sensibilidad de los parámetros que regulan los movimientos. Tomando como ejemplo la Figura 4-5, que ilustra la relación entre la Fuerza de impacto (kN) y la Velocidad (m/s), el autor destaca un comportamiento coherente entre las ecuaciones aplicadas y aquellas recopiladas. Además, se observa un aumento directo en la fuerza de impacto a medida que la velocidad incrementa, estableciendo así una relación completamente directa según el análisis del autor.

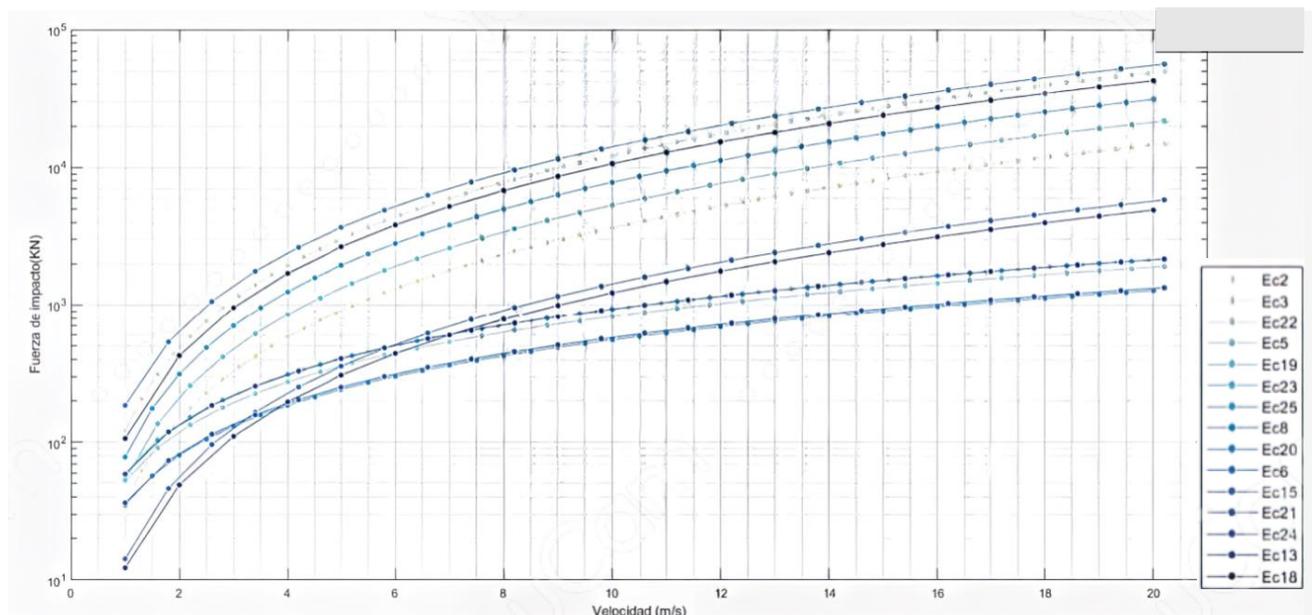


Figura 4-5 Relación entre velocidad y Fuerza de Impacto. Resultados al utilizar diferentes correlaciones.

Fuente: (García Amaya, 2018)

Según lo evidenciado en el estudio de He (2014), se hace patente que conforme la velocidad aumenta, también lo hace la fuerza de impacto, aunque no de manera lineal como se ha observado en investigaciones anteriores. Por ejemplo, García Amaya (2018) analiza 20 ecuaciones en las que las variables están influenciadas por la presión hidrodinámica, donde el parámetro de la velocidad está elevado al cuadrado.

La influencia de la velocidad también se analizará a lo largo del estudio en curso.

- **Un modelo para el análisis de deslizamientos de flujo rápido, flujos de escombros y avalanchas**, (Hungar O. , 1995): El modelo realizado en esta investigación, se fundamenta en una solución lagrangiana de las ecuaciones de movimiento, brindando la flexibilidad para seleccionar diversas reologías de materiales que pueden desplazarse coherentemente sobre una fina capa basal licuada. Se lleva a cabo una caracterización del material mediante la aplicación de las leyes de Newton, lo que permite clasificar de manera apropiada el flujo y determinar la viscosidad. Este proceso de caracterización considera las ecuaciones de movimiento en función de las diferentes pendientes que puede presentar el objeto en el estudio específico.

Se ha desarrollado un nuevo modelo para el análisis dinámico de deslizamientos rápidos, capaz de considerar sus características únicas. Este modelo ha sido comparado con otros modelos existentes y con experimentos controlados, mostrando resultados satisfactorios.

El modelo integra diversos factores, como las propiedades del material, la topografía y las condiciones iniciales, para predecir con precisión el comportamiento de los movimientos en masa rápido. El estudio destaca la naturaleza dinámica de los deslizamientos rápidos y flujos de escombros, resaltando la importancia de considerar aspectos como el comportamiento del flujo, la incorporación de material y la interacción con el terreno circundante en los análisis de desplazamientos. Al simular y analizar las distancias y velocidades de los flujos de escombros, las avalanchas de escombros y las avalanchas de rocas, el trabajo ofrece valiosas perspectivas sobre el comportamiento y la extensión de estos eventos, lo que contribuye a mejorar las estrategias de gestión de riesgos.

Una vez más, se reafirma que parámetros como las propiedades del material son esenciales para el análisis de este tipo de flujos.

4.4 Guías de diseño para mitigación de flujos de detritos

Las pautas de diseño para obras de mitigación en un flujo de detritos se han concentrado en determinar el impacto que genera el flujo y con esta estimación poder dimensionar las estructuras que pueden mitigar dicho impacto. Lo (2000) proporcionó una revisión detallada de los métodos sugeridos en la literatura para estimar cargas de impacto de escombros para el diseño de ingeniería. Además, también se revisaron brevemente otras medidas recomendadas en la literatura, como la mejora de la capacidad de retención de barreras flexibles contra el flujo de escombros. De acuerdo con su informe, la mitigación es posible por medidas pasivas y activas y su implementación depende de los estudios realizados al

terreno y al movimiento. En la *Figura 4-6*, es posible evidenciar las metodologías pasivas que están relacionadas a regulaciones, acciones legales y educativas, mientras que las activas involucran trabajos ingenieriles que buscan mitigar y reducir las consecuencias de un evento de alta magnitud.

El diseño de este tipo de obras está relacionado directamente con el comportamiento de variables que componen este tipo de movimientos, Lo (2000) en su informe también identifica cuáles variables deben ser estudiadas en la metodología con el fin de hacer una correcta implementación de las medidas de mitigación. A pesar de su complejidad, algunas variables comienzan a estudiarse y son esenciales para comprender el fenómeno. Estas variables incluyen la caracterización del movimiento en masa, que se vincula con la geología, geotecnia y morfología; la caracterización del flujo de detritos, más enfocada en la localización y los factores que desencadenan el movimiento; y la caracterización del evento, considerando la frecuencia y ocurrencia en las zonas, así como la interacción del flujo con estructuras de tipo barrera (Lo, 2000).

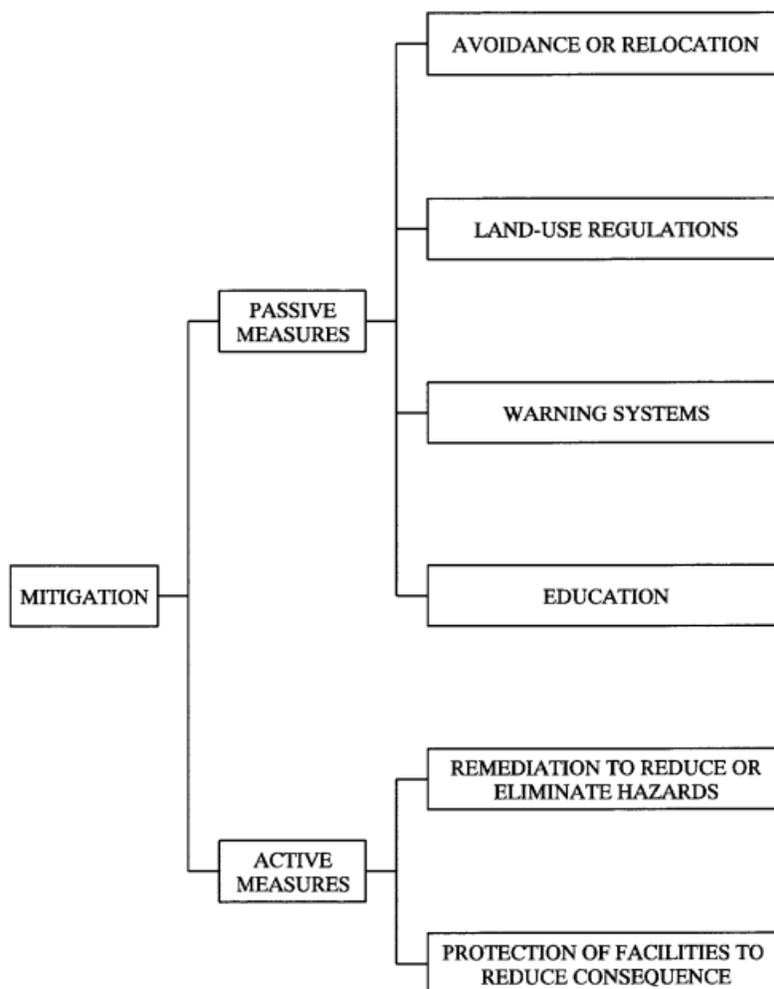


Figura 4-6 Metodologías de Mitigación.

Fuente: (Lo, 2000)

Como se ha mencionado anteriormente, en general, los modelos de impacto prácticos para los ingenieros han considerado dos tipos de impacto. El primero es el mecanismo hidráulico que considera el impacto causado por un flujo similar a un fluido a granel (Hübl et al., 2009). Por otra parte, el segundo considera la carga de impacto puntual debido a la colisión de partículas sólidas gruesas (Hu et al., 2011). En algunas directrices (por ejemplo, Volkwein, 2014), los modelos hidráulicos han sido adoptado para fines de diseño que se pueden dividir en hidrostáticos e hidrodinámicos. (Lo, 2000) Esto fue explicado en el numeral anterior de la modelación física de los flujos de detritos.

4.5 Tipos de obras para la mitigación de flujos de detritos

Las estructuras para controlar los flujos de detritos se han utilizado durante años por todo el mundo.

Técnicamente, para evitar las consecuencias de un flujo de detritos es posible revisar algunas alternativas geotécnicas a partir de estudios realizados por la Ingeniería de la zona.

Con el transcurso de los años y los diversos movimientos en masa registrados en Colombia, han surgido opiniones desde distintas perspectivas de la ingeniería. Un ejemplo destacado es el caso de Mocoa, donde algunos proveedores sostenían la capacidad de detener una avalancha mediante barreras metálicas. Estas barreras actuaban como coladores, permitiendo un controlado paso del agua mientras la malla metálica retenía sedimentos de dimensiones considerables. Se argumentaba que esta solución era más efectiva que las presas o diques tradicionales. Desde la perspectiva académica, se sostiene una opinión diferente, destacando que la medida verdaderamente efectiva consiste en la reforestación de las cuencas con especies nativas. Este enfoque busca reducir la erosión y prevenir deslizamientos de tierra de este tipo (Hernandez Bonilla, 2017).

No obstante, en la mayoría de los casos se recurre a una combinación de diversas estructuras con el objetivo de mitigar el impacto destructivo de eventos de gran magnitud, como el ocurrido en Mocoa en 2017. En este incidente, aproximadamente 11.357.000 metros cúbicos de lodo y escombros se precipitaron sobre la ciudad (Ramirez, 2017).

Una de las estructuras utilizadas para este tipo de evento son las presas como se evidencia en la *Figura 4-7*, estas son diseñadas para retención, sedimentación y disipación de ríos torrenciales con altos volúmenes de materiales, utilizadas mayormente en cuencas altas. Diseñadas a partir de los empujes hidrostáticos que nos genere el flujo analizado, teniendo en cuenta la estabilidad geotécnica del sistema en la zona, adicionalmente influyen factores en la elección de ésta como la facilidad constructiva y los mantenimientos que se pueden generar con diferentes tipos de construcción. Existen presas en hormigón, enrocados, gaviones y en terraplenes, la utilización de uno u otro material siempre estará a la disposición del sitio y las condiciones de acceso para construirla.

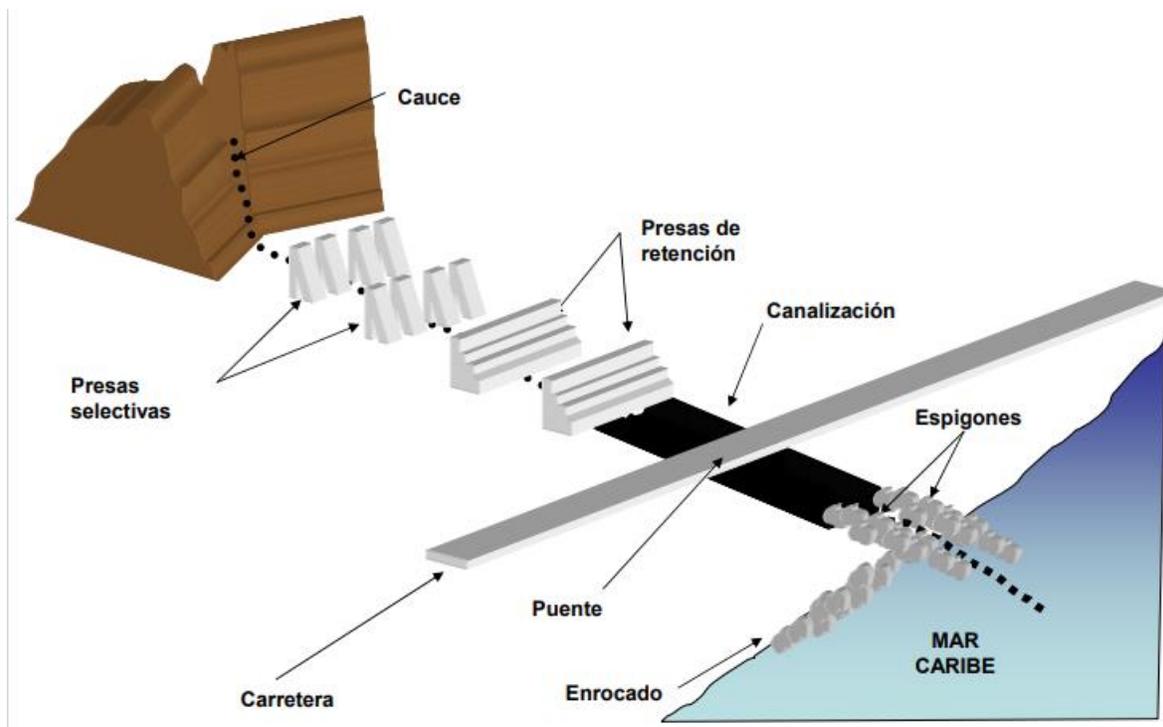


Figura 4-7 Esquema de Sistematización Caso de Obra Curcutí, Venezuela.

Fuente: (Di Pietro et al., 2000)

Otro tipo de estructura utilizada recientemente en la Ingeniería en el mundo, son las barreras flexibles para aluviones: “Barreras de red de anillos” representadas en la *Figura 4-8*, normalmente se construyen siguiendo la topografía natural del terreno, lo que significa que su geometría es ajustada a la del canal y es un tipo de “embudo” que requiere un sistema de postes y una red metálica de anillos de alta resistencia. Las barreras flexibles son ideales para detener flujos de escombros por su alta capacidad de deformación y su permeabilidad al agua (Guasti et al., 2011). Las barreras de red de anillos se componen de mallas de acero dispuestas en forma circular, ancladas a los taludes laterales del canal mediante postes y soportes. Así mismo, se incorporan dispositivos de amortiguación para mitigar la energía generada por movimientos tipo flujo de detrito, así como elementos de conexión que facilitan la unión entre segmentos. Además, se refuerzan con cables y tensores para fortalecer la estructura. En algunos casos, se integran sensores de monitoreo para detectar amenazas y activar alarmas o medidas de emergencia.



Figura 4-8 Barrera Flexible con red de anillos y Postes. Fuente: (A Bianchini Ingeniero SA / Maccaferri Group , 2002)

Además, en comparación con muros rígidos, distribuyen la energía del impacto durante una mayor duración del impacto y, por lo tanto, reducen la fuerza máxima de impacto (Boetticher et al., 2011). Además, son ventajosos por sus cortos tiempos de construcción y facilidad de instalación en terrenos de difícil acceso.

La combinación de los dos sistemas suele ser una alternativa adecuada: presas y barreras, ya que en algunas zonas donde no es posible la conformación de presas robustas por falta de área como en pendientes elevadas se pueden utilizar las barreras de red de anillos.

Es posible diseñar soluciones ingenieriles que complementen todo esto, con el objetivo de salvaguardar las cuencas laterales, previniendo la pérdida de material y evitando la ocurrencia de desprendimientos significativos. No obstante, antes de proponer alguna solución se deben conocer las causas y estudios de lo que sucede en cada uno de los eventos.

Este proyecto se enfocará en explorar los beneficios asociados con la implementación de estructuras específicas, como las barreras transversales, como presas. En esta investigación se lleva a cabo un análisis de una estructura tipo presa, parametrizada con valores correspondientes a gaviones. Dado que los gaviones son considerados estructuras flexibles, la investigación se centra en ellos. Sin embargo, para analizar la influencia de la flexibilidad en este tipo de estructuras, se modificarán parámetros de materiales utilizados

en la simulación. El propósito es examinar cómo estos cambios afectan las velocidades y atenúan las consecuencias ante eventos de gran magnitud, similar al ocurrido en Mocoa.

4.6 Modelaciones de obras para la mitigación de flujos de detritos

A continuación, se presentan algunas investigaciones desarrolladas para estudiar la interacción con estructuras utilizando el DEM:

- **Paralelización del Método de Elementos Discretos para el Análisis de Daño Después una Explosión** (Garcia Reyes, 2013): En este estudio, se introdujo un modelo numérico diseñado para visualizar la presión generada sobre un objeto cuando es impactado por una onda de choque provocada por una detonación. Se emplea el método de elementos discretos para simular el comportamiento de una estructura antes y después de una explosión. Este enfoque ofrece la ventaja de representar de manera efectiva las rupturas y desprendimientos potenciales en el material. Se llevaron a cabo análisis de índices de daño global para determinar la seguridad estructural en situaciones de explosión. Por ejemplo, la *Figura 4-9* exhibe los efectos ocasionados en una pared de hormigón frágil desde perspectivas frontal y lateral, al aplicar una carga de 60 kg a una distancia de 1 m. Este estudio se lleva a cabo con el objetivo de visualizar de manera precisa las posibles rupturas y desprendimientos que podrían ocurrir en el material.

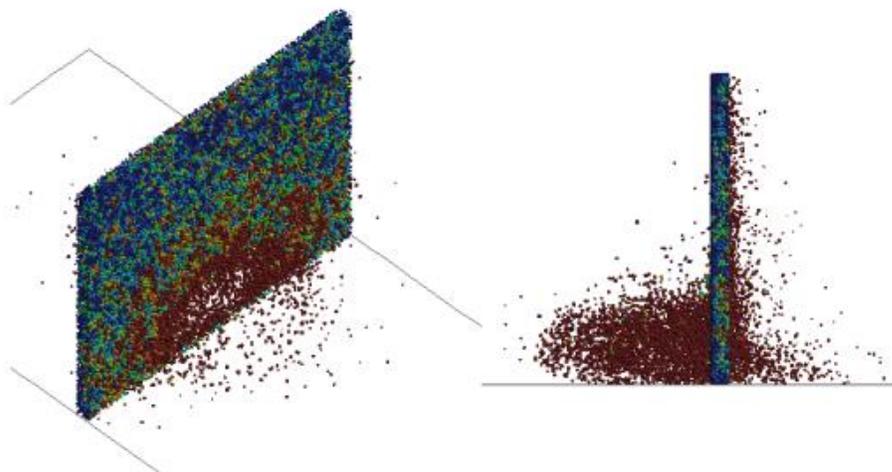


Figura 4-9 Explosión de 60kg a una distancia de 1 metro de pared hormigón débil.

Fuente: (Garcia Reyes, 2013)

Como se ilustra en la *Figura 4-9*, se observa un impacto significativo que varía según el tipo de hormigón utilizado y su resistencia. Este fenómeno puede asemejarse a un movimiento en masa, ya que las partículas chocan con una pared, ya sea rígida o flexible.

El autor analiza el Índice de daño al modificar los materiales y la distancia a la que ocurren las detonaciones, concluyendo que son factores cruciales en el diseño y la selección. El índice de daño es una medición de la vulnerabilidad de una estructura después de ser sometida a la detonación, está cuantificada por la cantidad de enlaces de cohesión perdidos (partículas iniciales comparadas con las finales). Cuando la detonación ocurre más cerca, el Índice de daño en la pared aumenta, lo cual se relaciona directamente con el estudio sobre la ubicación de las barreras en el flujo. La rigidez de los materiales también desempeña un papel importante, sugiriendo que, para mitigar estos eventos, los materiales deben tener altas rigideces para prevenir el colapso de las estructuras.

En consecuencia, surge la pregunta de si sería más apropiado intervenir con sistemas flexibles dadas las posibles implicaciones de estos movimientos. Esta cuestión será abordada en detalle en los próximos capítulos, durante las simulaciones y la evaluación de varios factores relacionados con el uso de este tipo de barreras.

- **Gaviones y Estructuras de almacenamiento: Análisis teórico-numérico-experimental de comportamiento mecánico** (Dos Santos Junior, 2018):

Este trabajo, presenta a través de un análisis técnico-experimental el comportamiento de la disposición de la estructura formada en malla metálica para gaviones y el mismo relleno (*Figura 4-10*). Teóricamente se utiliza el método de elementos discretos para conocer los valores de tensiones y deformaciones máximas en diferentes tipos de fabricaciones, logrando determinar los coeficientes de rigidez necesarios para alcanzar los valores deseados en los proyectos.

El uso de gaviones por años ha sido utilizado para estructuras en ríos, como muros de gravedad, entre otros, por lo que son estructuras que se tomarán como referencia para el uso de barreras en un flujo como opción flexible. El autor ha realizado un estudio donde propone rigideces para los materiales de relleno variando entre $E = 60E6$ MPa y $E = 13E10$ MPa, lo cual varía para la malla de gavión utilizada y varios parámetros que identifica el autor.

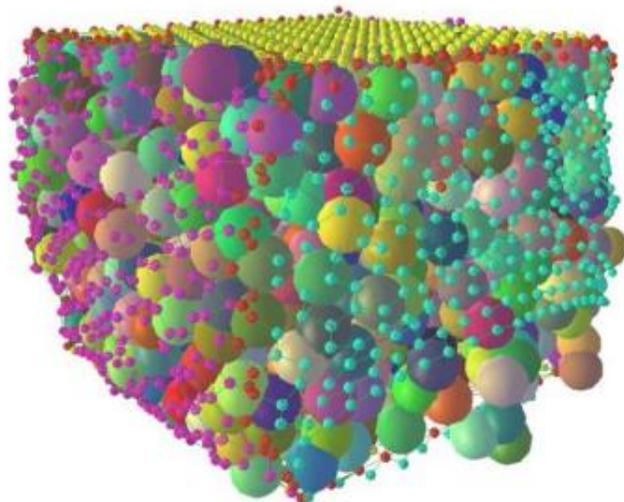


Figura 4-10 Malla de Gaviones con elementos discretos llenada por esferas.

Fuente: (Dos Santos Junior, 2018)

En esta investigación, se emplearán valores de rigidez recomendados, explorando su variación dentro de un rango que abarque tanto valores superiores como inferiores. Este enfoque permitirá evaluar la variabilidad de los resultados en relación con las fluctuaciones de dicho parámetro. Sin embargo, se sugiere para futuras investigaciones la inclusión del modelo completo que involucre estructuras como los gaviones. Aquí, se analizarán en su totalidad como muros, y su flexibilidad se tratará simplemente como un parámetro de entrada para el elemento geométrico (Facet), debido al alto costo computacional que implica este enfoque.

- **Investigación de la influencia de los deflectores de flujo de detritos granulares en el impacto de barrera rígida utilizando DEM, (Law et al., 2015):**

En este trabajo se adoptó un modelo de método de elementos discretos (DEM) previamente calibrado utilizando una serie de experimentos de canal para estudiar la efectividad de instalar deflectores frente a una barrera rígida.

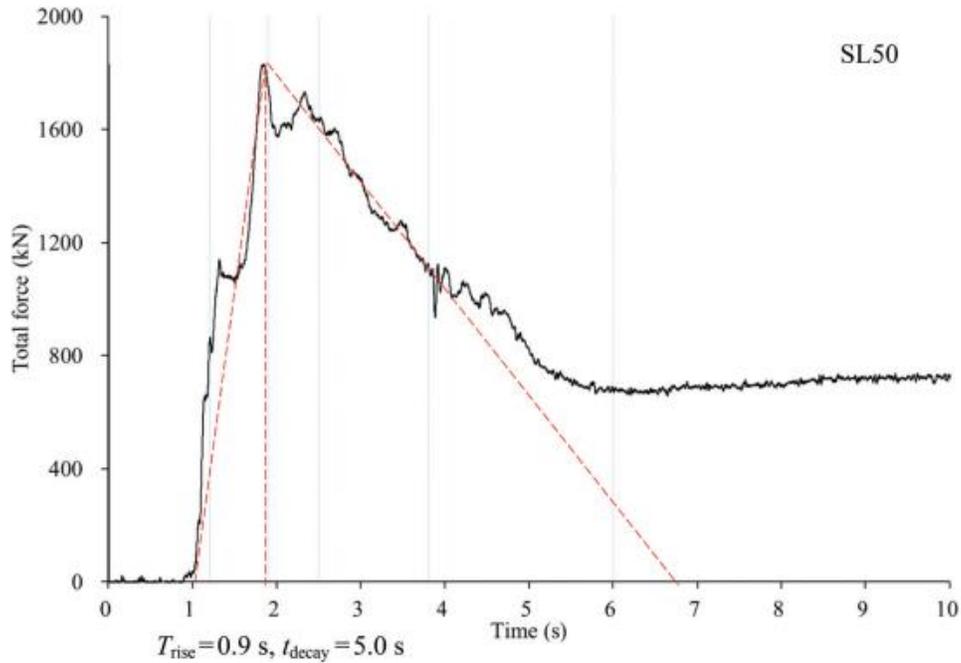


Figura 4-11 Fuerza de Impacto vs Tiempo.

Fuente: (Law et al., 2015)

En la *Figura 4-11*, se muestran los resultados en relación con el tiempo versus la fuerza de impacto. Se observa que la fuerza de impacto alcanza su punto máximo precisamente a los 2 segundos, y se destaca en la investigación que esta variación se debe a diversos factores, como la pendiente, cambios en la geometría y cantidad de partículas, entre otros.

En este estudio, se abordará en las simulaciones la identificación de las variables que inciden en las variaciones de las fuerzas de impacto.

5 Método de elementos discretos (DEM)

5.1 Definición General

El concepto de métodos de elementos discretos (DEM), se puede dar por la simulación del comportamiento que tiene un medio conformado por varias partículas las cuales pueden interactuar entre sí (Cundall & Strack, 1979). La simulación mediante esta metodología permite analizar una variedad de eventos en una escala más detallada dada la discretización que se puede realizar del sistema.

5.2 Fundamentos del DEM

DEM es un modelo numérico capaz de describir el comportamiento mecánico de conjuntos de partículas. En DEM, cada una de las partículas se trata de forma independiente, esta es la razón de tener distintos elementos, y son modeladas partícula por partícula. Las partículas interactúan entre sí en los contactos a través de alguna ley de contacto (*Figura 5-1*) (Tapias Camacho, 2016).

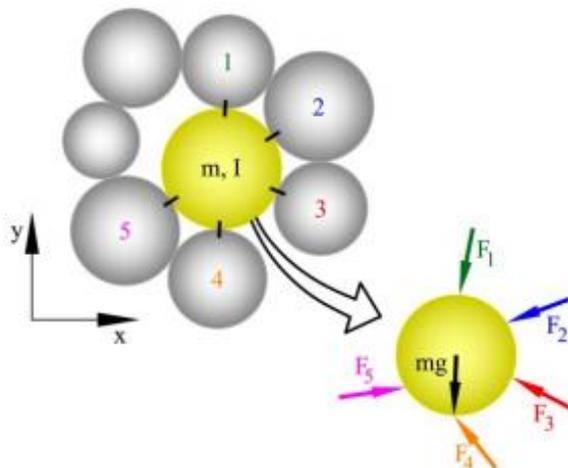


Figura 5-1 Interacción entre partículas-Fuerzas de contacto y de gravedad que actúan sobre una partícula

Fuente: (Tapias Camacho, 2016)

Un medio discreto está compuesto por partículas y enlaces. Generalmente para comenzar a utilizar DEM, es necesario conocer la posición inicial de las partículas y los enlaces y así mismo las propiedades relacionadas con el modelo constitutivo en los contactos, por ejemplo, densidades, coeficientes de fricción, rigidez, entre otras.

Usualmente las partículas son consideradas circulares (2D) o esféricas (3D), sin embargo, existen otros tipos de partículas que requieren de métodos más sofisticados e incrementan los análisis computacionales. En el modelamiento las partículas se pueden mover y girar libremente de acuerdo con la teoría de la segunda ley de Newton, donde van reconociendo nuevos contactos durante el proceso (Tapias Camacho, 2016).

La interacción entre partículas resulta de un proceso dinámico por su movimiento. (*Figura 5-1*).

Las técnicas DEM pueden ser divididas en dos categorías, de acuerdo con el tipo de contacto, el primero conocido como Smooth y el segundo conocido como Non-Smooth, tomado de Duran (2000), citada por O'Sullivan (2011) y Jean (2011), se describen como:

- Smooth aplica la Ley de fricción entre partículas la cual permite la sobreposición entre partículas, este método requiere un esquema numérico explícito.
- Non-Smooth aplica leyes de rugosidad, no permite penetración entre partículas al colisionar, este método requiere un esquema numérico implícito.

El procedimiento DEM (*Figura 5-2*) puede ser resumido por los siguientes pasos:

- Definición y posición de las partículas y enlaces. (Geometría del sistema).
- Definición del modelo de contacto. (Técnica).
- Definir propiedades de las partículas y enlaces.
- En un tiempo de incremento pequeño, se realiza la identificación de posición de las partículas y contactos alrededor.
- Seguido se aplica la Ley de Contacto en cada uno, calculado las fuerzas de contacto.
- Aplicación del equilibrio dinámico.
- Aplicación de la Ley de movimiento, calculando aceleraciones, velocidades, desplazamiento y rotaciones de las partículas, obteniendo las interacciones que es el resultado de este proceso dinámico de movimiento de las partículas.
- Se repite el mismo procedimiento incrementando gradualmente el tiempo de tal manera que se realice los cálculos correspondientes.

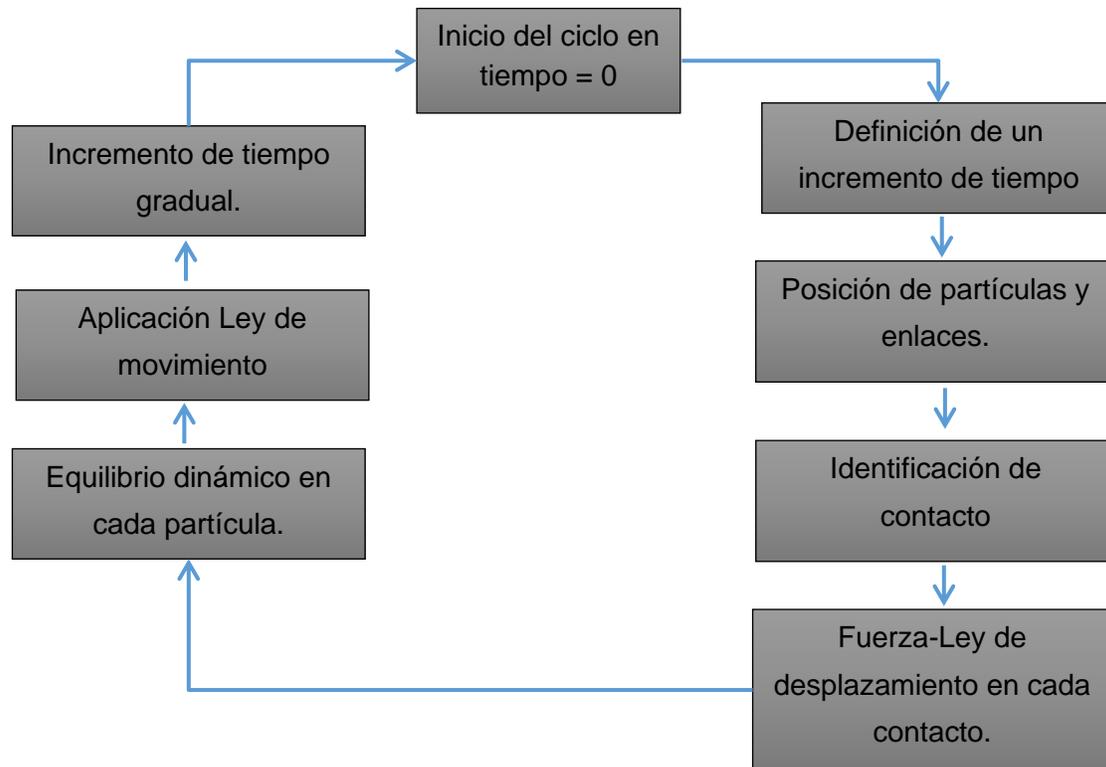


Figura 5-2 Características básicas del DEM-Calculo cíclico de movimiento de la partícula

Fuente: (Tapias Camacho, 2016)

5.3 Calibración de simulaciones DEM

Hay algunas investigaciones las cuales brindan algunas recomendaciones para la calibración de las simulaciones que sean realizadas, esto para dar la mayor cercanía posible a los modelos que se estén analizando ya sean modelos de escala real o de laboratorios.

Para la simetría y geometría de las partículas Butlanska et al., (2009), en su investigación realizada acerca de la Homogeneidad y simetría en modelos DEM, recomienda que las partículas deben ser discretizadas de tal manera que la simulación pueda no tener en cuenta aquellas que son menores al percentil 5 en la granulometría y esto no afectará los resultados que se obtengan, es más antes se logra disminuir los tiempos de ejecución de las simulaciones.

Por otro lado, Fakhimi junto a otros autores (2002) han afirmado en su investigación, donde realizan simulaciones utilizando el software PFC, que la relación entre los radios del más pequeño al mayor no debe superar 3.0 veces (A Fakhimi et al., 2002).

Otra de las recomendaciones que se puede encontrar en las investigaciones y específicamente dada por Francesco Calvetti en el año 2008, es que entre más pequeñas sean las partículas y el tiempo sea mayor la simulación será más exacta y tendremos las fuerzas de contacto más cercanas. Cuando se realizan las simulaciones con partículas de mayor tamaño los tiempos de ejecución si se reducen, pero los resultados obtenidos no serían los más cercanos posibles a la realidad. Este fenómeno es también visto cuando son ejecutados los modelos.

Estas recomendaciones se tienen en cuenta para el presente modelo. El modelo es calibrado bajo un parámetro que es la distancia de viaje. El volumen del material del flujo fue aportado por la Quebrada Taruca en el punto de llanura, acercándose a la localidad urbana. Para que la modelación avance correctamente, se debería asegurar que la mayor parte del volumen llegue a esta distancia, donde se bifurca con la Quebrada Taruquita.

5.4 YADE, programa computacional DEM

Yade es un marco extensible de código abierto para modelos numéricos discretos, centrado en el método de elementos discretos. Las partes de cálculo están escritas en C++ utilizando un modelo de objeto flexible y permitiendo la implementación independiente de nuevos algoritmos e interfaces. Python se utiliza para la construcción rápida y concisa de escenas, control de simulación, posprocesamiento y depuración (Šmilauer , 2021).

YADE es ejecutado en ambiente Linux, por lo cual es requerida una partición de la unidad de almacenamiento para su instalación o se puede hacer el uso de una máquina virtual dentro del sistema operativo Windows.

Para ejecutar YADE se abre una terminal y una vez instalado el programa, es llamado bajo el comando “yade”, seguido a esto es llamado el código creado el cual incluye datos de geometría, cuerpos, enlaces y leyes de movimiento que son componentes esenciales del código a ejecutar. (*Figura 5-3*) Este comando debe ser llamado “yade <nom_codigo>.py” así ejecutará lo que se haya escrito en el lenguaje.

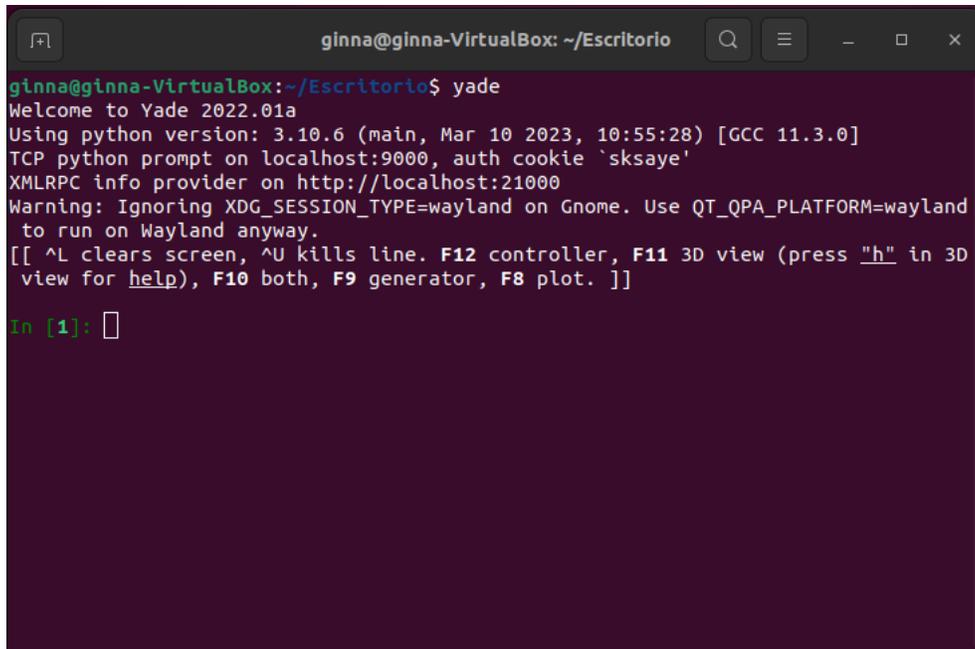


Figura 5-3 Terminal inicial para ejecutar código programa computacional YADE

Fuente: Propia

En el programa computacional es posible obtener una interfase gráfica cuando empieza a ejecutarse el código, con estas ventanas es posible controlar la simulación y obtener una visualización en 3D del código, como se muestra en la Figura 5-4.

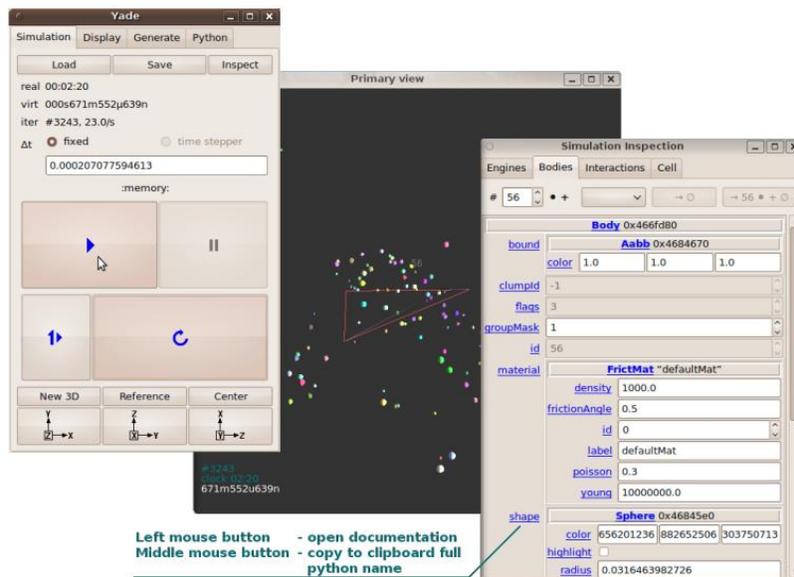


Figura 5-4 Interfase gráfica de YADE

Fuente: (Šmilauer, 2021)

Una vez es escrito el código dadas las componentes de propiedades y funcionales, se llaman los datos que se quieren obtener: Fuerzas, energías, desplazamientos y pueden ser almacenadas durante la simulación. Es de esta manera que se tiene un ciclo en el ejercicio y se pueden obtener los datos que se requieran para la investigación (Figura 5-5).

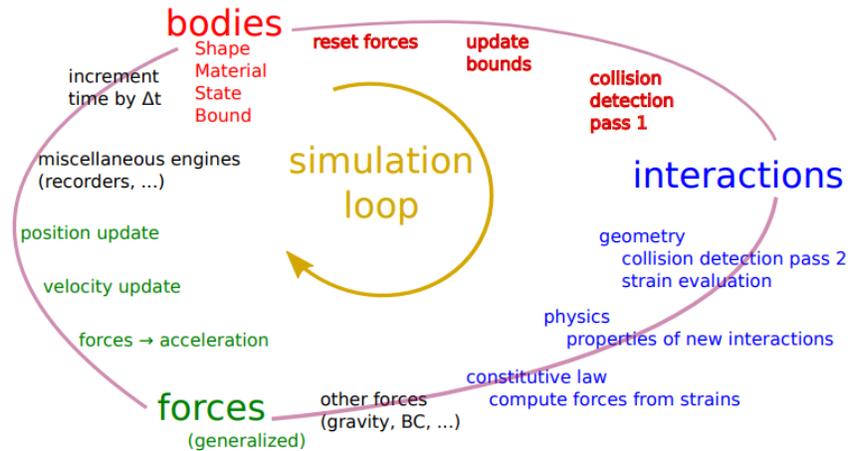


Figura 5-5 Ciclo de ejecución en YADE

Fuente: (Šmilauer , 2021)

La información se puede obtener por medio de archivos de texto que brinda el programa computacional al finalizar la ejecución del código. Para obtener estos datos, se utilizan comandos como `yade import plot`, `plot.addData()`, `plot.saveDataTxt()` y `plot.plot`. Con estos 4 comandos se puede llamar a la librería para guardar datos, adicionar datos al archivo txt, generar un archivo txt con la información llamada y generar gráficas con los archivos seleccionados.

5.4.1 Datos experimentales para simulación

Para asegurar la flexibilidad del diseño de software, Yade hace una clara distinción de 2 familias de clases: componentes de datos y componentes funcionales. Los primeros solo almacenan datos sin proporcionar funcionalidad, mientras que estos últimos definen las funciones que operan sobre los datos. En programación, esto se conoce como patrón de visitante. Los componentes funcionales "visitan" los datos, sin estar vinculados a ellos explícitamente (Šmilauer , 2021).

Algunos componentes de datos son: cuerpos como esferas, paredes, facets que son definidas bajo 4 características: Forma, material, estado y enlaces (Figura 5-6). Estas

propiedades son adjudicadas a cada una de las formas que se creen y a partir de esto se puede seguir a definir las componentes funcionales.

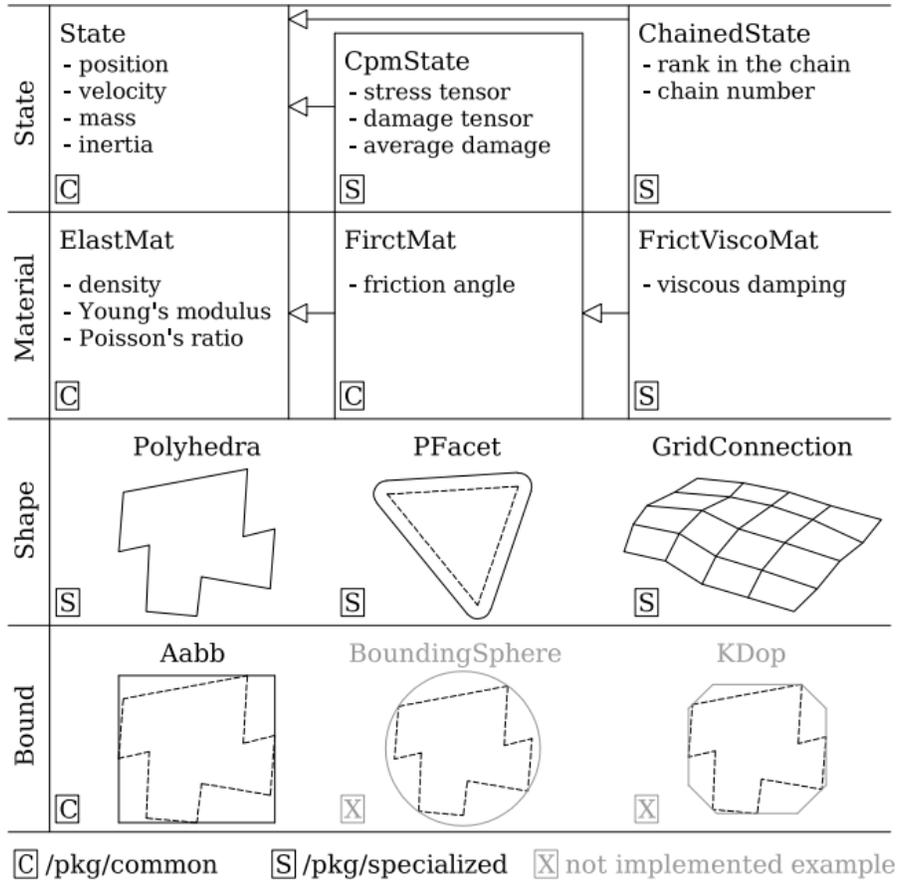


Figura 5-6 Características principales para componentes de datos: cuerpos.

Fuente: (Šmilauer , 2021)

Las componentes funcionales son creadas bajo interacciones entre los cuerpos creados, estas interacciones son dadas entre dos pares de partículas o de cuerpos. Cada interacción tiene dos componentes: interacción geométrica y física como se evidencia en la Figura 5-7. En la cual se aplica el modelo de contacto lineal simple, para la geométrica es aplicada el contacto general de esferas y para la física son tenidas en cuenta las rigideces tangenciales y normales de acuerdo con el radio, geometría y módulos de Young dados a los materiales, así como es explicado anteriormente en la Ley de contacto simple para este programa computacional.

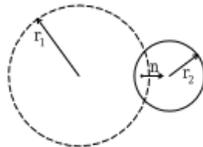
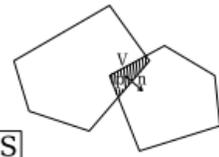
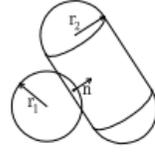
Interaction Geometry	GenericSpheresContact  [C]	PolyhedraGeom  [S]	CylScGeom  [S]
Interaction Physics	NormPhys - normal stiffness - normal force [C]	NormShearPhys - shear stiffness - shear force [C]	FrictPhys - tangens of friction angle [S]
	[C] /pkg/common	[S] /pkg/specialized	

Figura 5-7 Ejemplos de componentes funcionales de YADE

Fuente: (Šmilauer , 2021)

El código es escrito de esta manera para poder tener una continuidad de simulación a lo que se requiere obtener.

5.4.2 Modelo de contacto

El modelo de Contacto Lineal Simple es propuesto por P. A. Cundall & O. D. L Strack, el cual considera una rigidez tangencial y normal en los contactos entre 2 partículas, representada en la Figura 5-8.

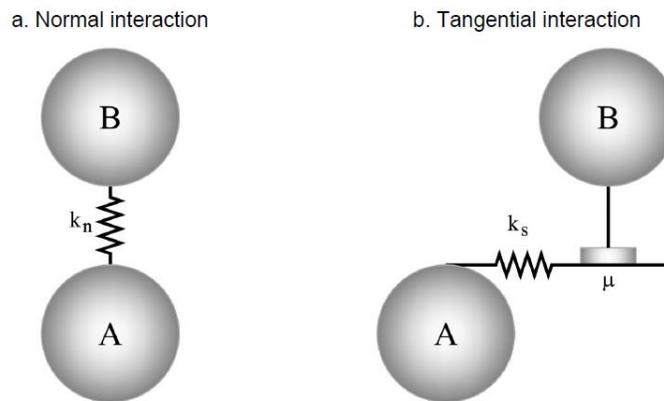


Figura 5-8 Modelo de Contacto Lineal Simple. Interacción Normal y Tangencial.

Fuente: (Tapias Camacho, 2016)

Este modelo se centra en el estudio de materiales friccionales, sin viscosidad ni cohesión entre partículas. Para este caso específico de estudio en el programa computacional YADE,

se tiene en cuenta que las rigideces estarán relacionadas con el Módulo de Young (E) del material y del radio de la partícula.

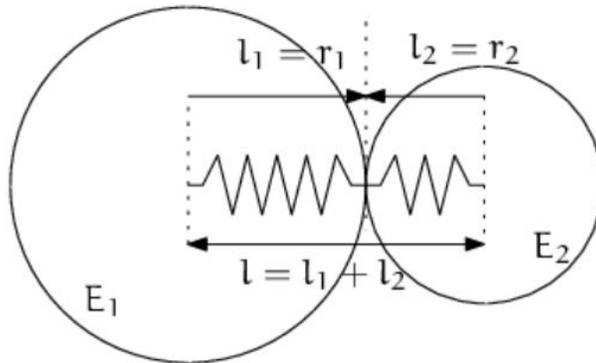


Figura 5-9 Serie de 2 resortes que representan la rigidez normal de contacto entre 2 esferas.

Fuente: (Šmilauer , 2021)

El algoritmo calcula la rigidez de interacción normal como la rigidez de dos resortes en configuración en serie con longitudes iguales a los radios de las esferas (*Figura 5-9*).

Se define la distancia entre los puntos de contacto inicialmente como los radios de las partículas. Estas distancias son definidas como l_1 y l_2 , correspondiente a cada partícula. Cambiando la distancia entre los centros de las partículas hay una deformación distribuida en ambas partículas. Los cambios de estos desplazamientos generan unas fuerzas definidas como el producto de la rigidez y el desplazamiento, donde la rigidez es proporcional y relacionada con el módulo de Young de la partícula, resultando proporcional también al radio de la partícula (Šmilauer , 2021).

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$$

Ecuación 5-1 Cambio de desplazamientos l_1 y l_2

$$K_i = E_i \times l_i$$

Ecuación 5-2 Relación entre Modulo de Young y desplazamiento

Desde la *Ecuación 5-2* se despeja la Fuerza dejando en términos de cambio de desplazamientos y rigidez:

$$K_N \Delta l = F = F_1 = F_2$$

Ecuación 5-3 Fuerza en términos de rigidez y cambio de desplazamiento.

La *Ecuación 5-1* es reemplazada en la *Ecuación 5-3*, obteniendo:

$$K_N(\Delta l_1 + \Delta l_2) = F$$

Ecuación 5-4 Fuerza en términos de desplazamiento para cada partícula

De la *Ecuación 5-3* sabiendo que el cambio de desplazamiento es igual a la relación entre fuerza y rigidez, obteniendo:

$$K_N \left(\frac{F}{K_1} + \frac{F}{K_2} \right) = F$$

Ecuación 5-5 Fuerza teniendo en cuenta rigideces para cada partícula

Definiendo así de esta manera en términos de longitudes y de fuerzas (en este caso propiedades Modulo de Young), la rigidez entre las partículas:

$$K_1^{-1} + K_2^{-1} = K_N^{-1}$$

Ecuación 5-6 relación entre rigideces

$$K_N = \frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2}$$

Ecuación 5-7 Escritura de la ecuación Ecuación 5-6

Reemplazando ecuación Ecuación 5-2 en la Ecuación 5-7, se obtiene la Ecuación 5-8.

$$K_N = \frac{(E_1 \times l_1) \times (E_2 \times l_2)}{(E_1 \times l_1) + (E_2 \times l_2)}$$

Ecuación 5-8

Y el término más utilizado para el análisis computacional durante toda la simulación, es el presentado en la Ecuación 5-9, considerando partículas de igual tamaño, para el modelo con propiedades de tipo friccional (lp2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys):

$$l_i = 2 \times r_i$$

Ecuación 5-9 Longitud relacionada con el radio de partícula en simulaciones computacional.

Finalmente, si se relacionan las Ecuación 5-9 y la Ecuación 5-8, se evidencia la relación entre el radio de las partículas, las propiedades iniciales como el módulo de Young a la rigidez.

Es por esto de gran importancia definir bien los parámetros iniciales en los elementos utilizados en los códigos. Por ejemplo, para este caso los diámetros utilizados en las partículas, los cuales serán detallados en un posterior capítulo.

6 Estudio de Caso: Mocoa-Putumayo, Colombia

6.1 Localización Mocoa

El Municipio de Mocoa está ubicado en la parte norte del Departamento del Putumayo (*Figura 6-1*), cuenta con una extensión aproximada de 1.263 km² con una extensión área urbana de 580 km² (UNGRD et al., 2018).

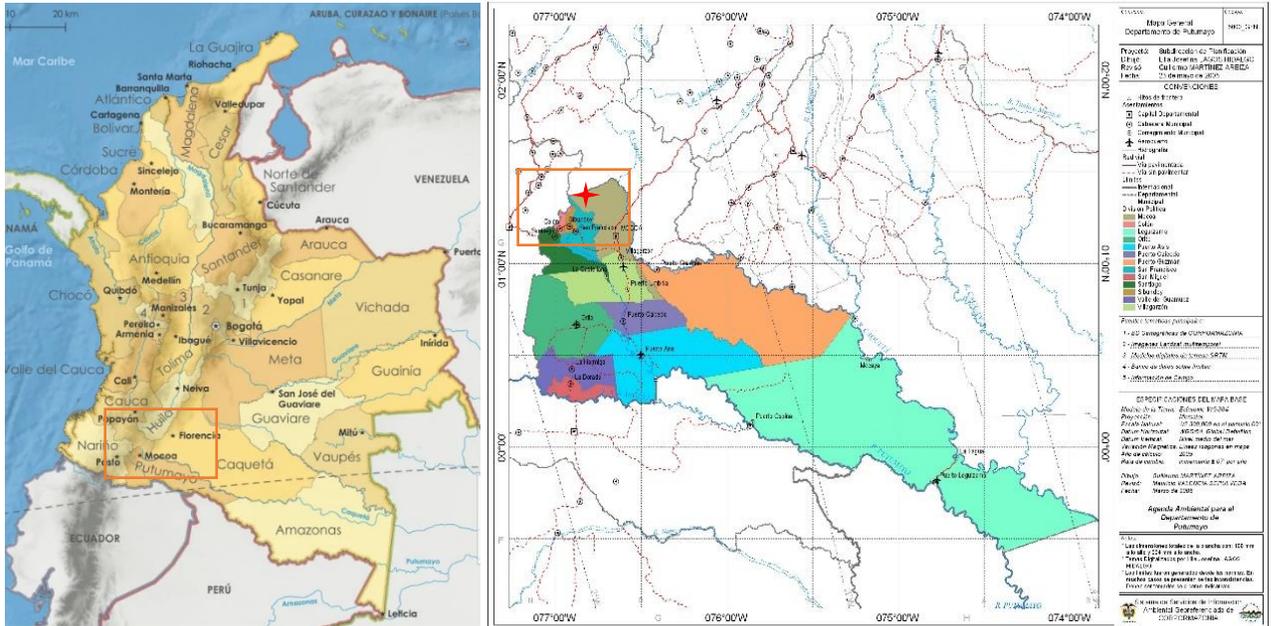


Figura 6-1 Localización de Mocoa, departamento de Putumayo

Fuente: (Corpoamazonía, 2005)

6.2 Descripción del evento

En el 2017, Mocoa tuvo una avalancha devastadora para la zona. En la noche del 31 de marzo y 01 de abril, las fuertes lluvias detonaron movimientos en masa en las cuencas de río Mulato, Sangoyaco y las quebradas Taruca y Taruquita lo que aumentó el caudal removiendo materiales de grandes magnitudes que terminaron aguas abajo cubriendo la zona urbana de Mocoa.

Las microcuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco y las quebradas Taruca y Taruquita (*Figura 6-2*) tienen la particularidad de nacer y discurrir en el piedemonte amazónico, localizado sobre el borde oriental de la cordillera oriental y desembocan en el río Mocoa, las cuales hacen parte de la subzona hidrográfica del río Caquetá y la zona hidrográfica de la macrocuenca del río Amazonas (UNGRD et al., 2018).

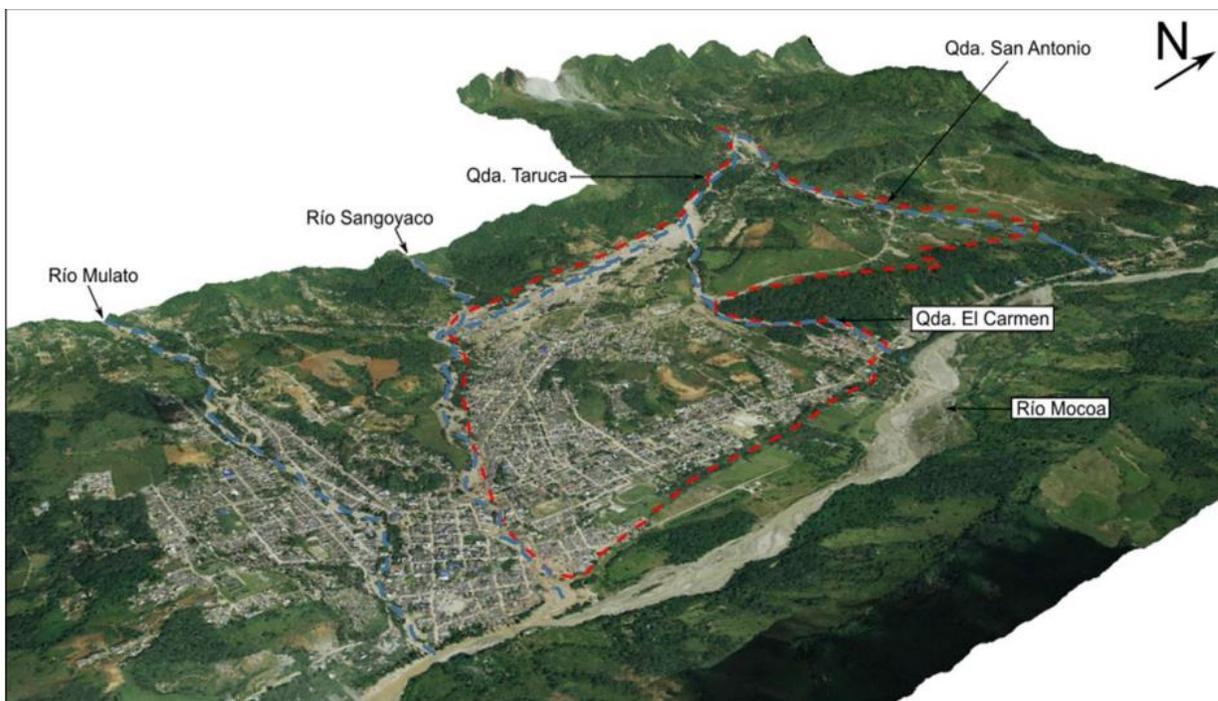


Figura 6-2 Esquematación de las ríos y quebradas respecto a la localización del municipio Mocoa-Putumayo.

Fuente: (Corpoamazonía, 2017)

El evento tuvo factores influyentes bajo su torrente, entre los cuales se pueden denotar:

- **La Influencia de los ríos y quebradas en el evento (Figura 6-3):**

En la cuenca del río Mulato se detonaron 132 movimientos en masa, de los cuales 47 aportaron directamente al drenaje un volumen aproximado de 34.009 m^3 y en la cuenca del río Sangoyaco se detonaron 153 movimientos, de los cuales 59 aportaron material al drenaje con un volumen estimado de 76.940 m^3 .

Más del 90% de los movimientos en masa evidenciados en las cuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, y ríos Mulato y Sangoyaco han sido clasificados a la fecha como movimientos en masa tipo flujo, seguido por deslizamientos traslacionales.

Así mismo, en las cuencas de las quebradas San Antonio y El Carmen se evidenciaron 127 y 38 movimientos en masa, respectivamente. Sin embargo, el volumen no fue calculado debido a que no aportaron directamente al flujo (García-Delgado et al., 2018).

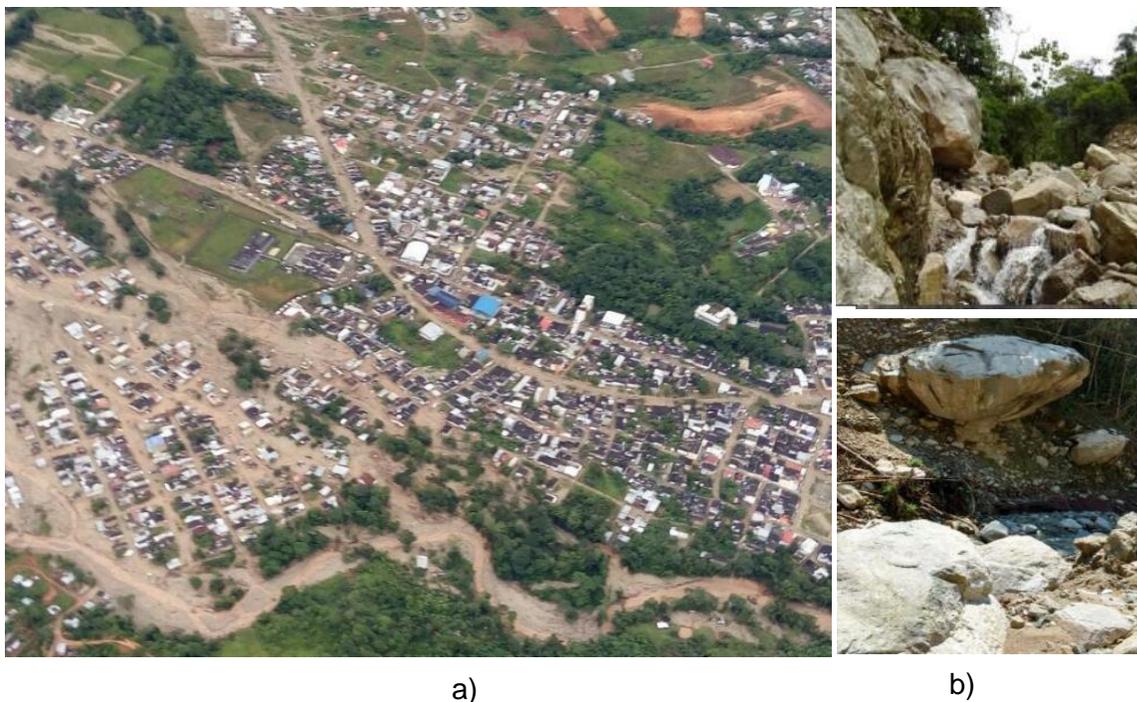


Figura 6-3 a). Foto aérea del evento ocurrido en 2017 y b). Bloques que desplazó la avalancha de detritos.

Fuente: (UNGRD et al., 2018)

En la parte alta de la quebrada Taruca se identificaron suelos residuales de espesores de 4 a 5 m, suelos que sufrieron pérdidas de resistencia en pendientes altas y generaron velocidades y tensiones de arrastre superiores por las fuertes lluvias y precipitaciones durante el evento. El Monzogranito aflora en las partes altas de la quebrada Taruca, presentando variaciones que incluyen granito, granodiorita, cuarzomonzonita, cuarzodiorita y monzodiorita. El Monzogranito de Mocoa exhibe un notable grado de fracturamiento, resultado del fuerte control estructural de la Falla La Tebaida-Mocoa, y ha experimentado procesos de meteorización debido a las condiciones climáticas predominantes en la zona. Estos factores han contribuido a la inestabilidad del macizo rocoso y han favorecido la formación de suelos residuales (García et al., 2017).

Las caídas de rocas presentadas en la *Figura 6-3*, se alimentaron en los macizos de los suelos residuales que se tenían en la parte alta de la quebrada lo que hizo que la inexistencia del material residual generara voladizos que causaran caídas en pendientes altas generando velocidades y energías de impacto considerables (UNGRD et al., 2018).

Los principales procesos (*Figura 6-4*) que causaron las avalanchas y flujo de detritos y así mismo el arrastre de materiales de gran magnitud que se evidencian en la *Figura 6-3*, fueron:

- Deslizamientos superficiales: debido a la pérdida de resistencia del suelo residual debido a la lluvia acumulada y eventos intensos de precipitación como hubo en la madrugada del 31 de marzo. Estos deslizamientos y arrastre de material son también relacionados con la erosión y transporte de sedimentos.
- Caída de bloques en las quebradas: causada por pérdida de resistencia y socavaciones laterales de las márgenes causando inestabilidad y erosiones en las partes inferiores de las laderas generando voladizos de bloques de gran tamaño, que por meteorización de la matriz caen.
- Socavaciones laterales y movilización del material de fondo de la cuenca: las socavaciones laterales producen inestabilidad en las laderas causando deslizamientos y arrastres de material, generando una fuerza mayor a la inicial y alcanzando los volúmenes de detritos que se producen en eventos de gran magnitud como el ocurrido en 2017.

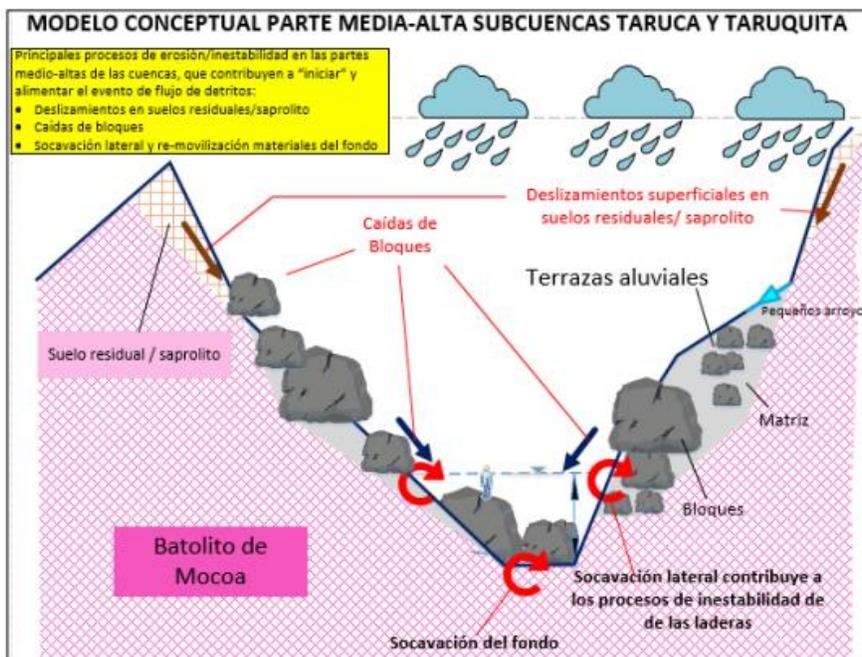


Figura 6-4 Modelo conceptual parte media-alta subcuenca Taruca y Taruquita.

Fuente: (UNGRD et al., 2018).

Debido a esto se realizó una definición de los sectores críticos, en la cual se afirma la alta densidad de deslizamientos probables en la quebrada Taruca parte media-alta, siendo la más significativa del flujo de detritos ocurrido el 31 de marzo del 2017.

A raíz de los eventos que se han presentado en Colombia y que dejan incalculables pérdidas, uno de los temas en Colombia que durante los últimos años ha tomado fuerza es el estudio de los movimientos en masa por flujo de detritos y avalanchas.

El estudio realizado por el Consorcio Inypsa et al. (2018) para Corpoamazonia y la Alcaldía de Mocoa fue realizado bajo imágenes digitales de elevación (Modelo Digital de Elevación, MED), evaluado mediante un análisis multitemporal para poder determinar los diferentes volúmenes y distancias de viajes que tuvieron los flujos aportados por cada una de las cuencas implicadas en el movimiento en masa.

Para la Quebrada Taruca, según el estudio realizado se determinan dos procesos de tipo fluvio-torrencial, en los cuales se ha desbordado su cauce por ramales que componen la misma cuenca debido al alto flujo de material. El procedimiento utilizado por la consultoría Consorcio Inypsa et al. (2018), fue realizar un proceso probabilístico junto a la interpretación de imágenes para obtener las distancias de viaje, realizando unos histogramas para poder visualizar cuales son los procesos más representativos ocurridos en la cuenca y de esta manera establecerlos como es evidenciado en la *Figura 6-5*. Estas representaciones gráficas, que muestran la frecuencia en relación con las longitudes, se utilizaron para identificar las distancias de viaje más periódicos en distintos años.

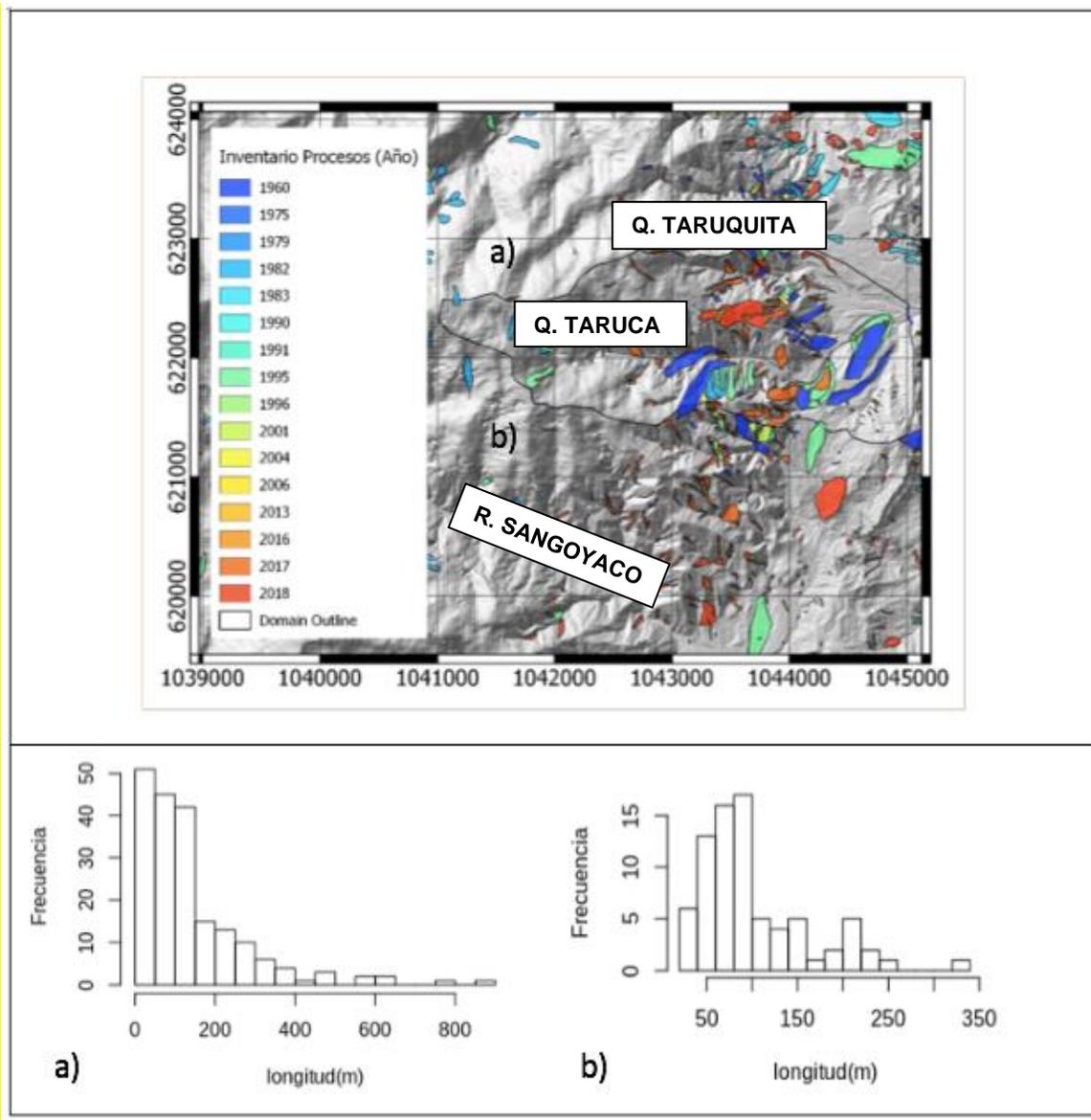


Figura 6-5 En la parte superior los procesos foto interpretados y en la parte inferior los histogramas de distancias de viaje de la cuenca a) Taruca-Taruquita y b) Sangoyaco.

Fuente: (Consortio Inypsa et al., 2018)

Los volúmenes estimados bajo la fotointerpretación de acuerdo con el estudio se resumen en la *Tabla 6-1*, se debe aclarar de acuerdo con el estudio que el volumen del 100% no es una situación real, es por ello por lo que fue descartado por los autores.

En la *Tabla 6-1*, la columna N.º 1 del cálculo de área se refiere a la zona identificada como movimiento en masa, considerando espesores observados que varían entre 2 y 5 metros. Estos valores cambian en las demás columnas, siguiendo una calibración realizada y

proyectada a escenarios futuros. Las columnas 2 y 3 corresponden al inventario de eventos de 2017, obtenidos de diversas fuentes para efectos de calibración. La estimación presentada en las columnas 4 y 5 utiliza información previa, basada en una carga máxima de producción posible en la cuenca. Estos datos son presentados como valores de área superficial relacionados con el cauce según la profundidad de falla (Consortio Inypsa et al., 2018).

Porcentaje de área afereente al cauce	Volúmenes estimados de detritos (m ³)			
	2017 (Calibración)		2018 (Escenarios futuros)	
	Prof=5m	Prof=2m	Prof=5m	Prof=2m
25%	780.746,6	312.298,6	646.694,1	258.677,6
50%	821.979,9	328.792,0	713.332,5	273.001,0
75%	878.116,9	351.246,8	779.971,3	311.988,5

Tabla 6-1 Volúmenes estimados de detritos (m³) cuenca Quebrada Taruca.

Fuente:(Consortio Inypsa et al., 2018)

Obtenidos los volúmenes, en el estudio se concluye que el valor calculado por modelaciones geotécnicas obtenido fue entre los 200.000 a 300.000 m³ detonados por lluvias principalmente valores que están de acuerdo con los valores de Profundidades de inestabilidad de 2m según la *Tabla 6-1*.

Dado esto, para efectos de la simulación numérica en YADE para este trabajo se ha tomado un volumen de 200.00 m³, volumen que está dentro del rango dado por el estudio anterior, esto también gobernado por la variabilidad de materiales en cuanto a granulometría en la cuenca y las densidades presentadas. La modelación se llevó a cabo con base en este volumen, empleando 20,000 partículas con un radio de 1.34 metros, de acuerdo con la granulometría especificada en los informes entregados a Ingercivil para el reporte elaborado por el Consortio Inypsa et al (2018).

6.3 Definición de la zona para el análisis

En este estudio se realiza la simulación numérica del movimiento de masa ocurrido específicamente en la cuenca alta de la Quebrada Taruca en Mocoa. La zona denominada “la parte alta de la cuenca” corresponde a la zona de producción donde se alimenta el flujo, por sus altas pendientes las partículas toman mayor velocidad como es mencionado en el capítulo anterior. Es por esto tan importante intentar mitigar el riesgo desde esta zona debido a la alta carga de flujo que puede detonar aguas abajo. El evento para simular fue

caracterizado por medio del contrato de consultoría realizado por Consorcio Inypsa et al., (2018) en escala 1:2000 para la Alcaldía de Mocoa junto a Corpoamazonía. A su vez, este informe fue realizado con apoyo de estudios anteriores, como lo es la obtención de la cartografía regional y local, evaluación de amenaza de inundación y movimientos de masa a escala regional a escala de 1:25000, 1:5000 y por inundación a escala 1:2000. Todo esto fue complementado junto a la recopilación realizada en campo, y su calibración se da por medio de la reconstrucción de los hechos que generaron el movimiento detonante.

Es importante mencionar que, para este caso, se realiza el análisis del flujo de detritos en condiciones secas dado el alto coste computacional que genera combinar los diferentes lenguajes de programación que tendrían que ser utilizados para poder involucrar el agua y porque el interés principal de este trabajo está en el análisis de la influencia de colocar barreras para mitigar el evento del flujo de detritos.

En condiciones húmedas, el material puede experimentar una disminución en su resistencia al corte. En el caso de una avenida torrencial, caracterizada por altas velocidades y pendientes pronunciadas, los materiales pueden perder esta resistencia y deslizarse conjuntamente, lo que resulta en una disminución de la fricción y las tensiones de corte en el plano de estabilidad. Las implicaciones que esto puede tener en los resultados pueden variar; sin embargo, en este caso de análisis, se emplearon ángulos de fricción residuales y picos con el fin de distinguir la resistencia al corte de una partícula cuando está desgastada por el rozamiento, reduciendo así las fuerzas resistentes y teniendo en cuenta en menor medida la influencia del agua.

La zona para estudiar está relacionada en la *Figura 6-6*, plano tomado del archivo público de la Dirección General del Putumayo de Corpoamazonia, específicamente el mozaico de planchas cartográficas 430-II-C4, 430-II-D3, 430-IV-A2 y 430-IV-B1, estudio realizado para el análisis de amenaza y vulnerabilidad geológica para la subcuenca de la Quebrada Taruca y río Sangoyaco en el área urbana (Corpoamazonía, 2005). Se toman 2.0km de la quebrada donde en su zona más baja se une con la Quebrada Taruquita para continuar el flujo generando mayores aportes al flujo total que finalmente fue depositado en la zona urbana de Mocoa.

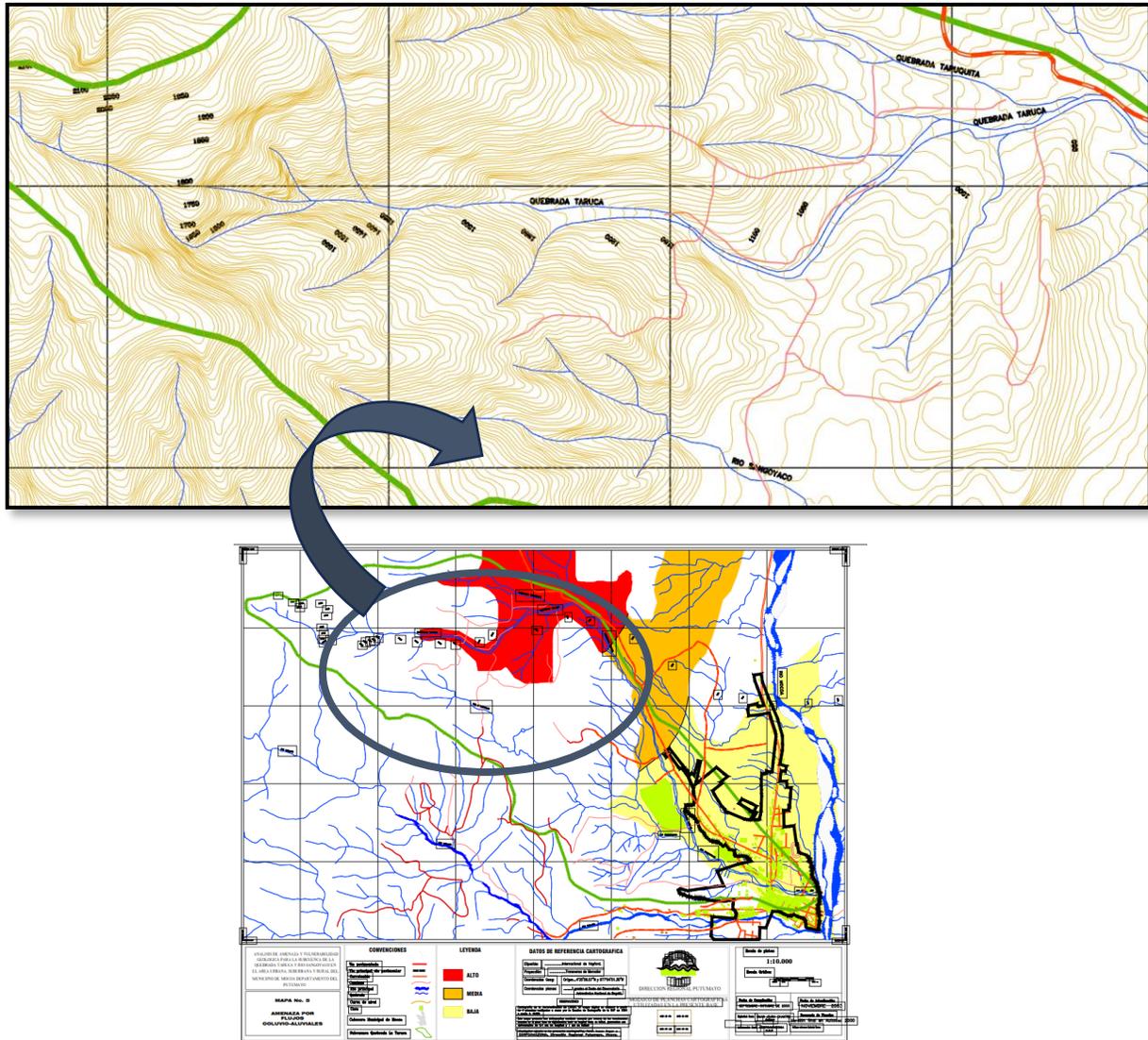


Figura 6-6 Zona estudiada en planta Cuenca Alta de la Quebrada Taruca

Fuente: (Corpoamazonía, 2005)

A continuación, se evidencia el perfil generado por superficie en la herramienta AutoCAD, de la cuenca en la parte delimitada por la zona de estudio para el presente análisis. Se denotan pendientes superiores a los 7° hasta los 49° (Figura 6-7)

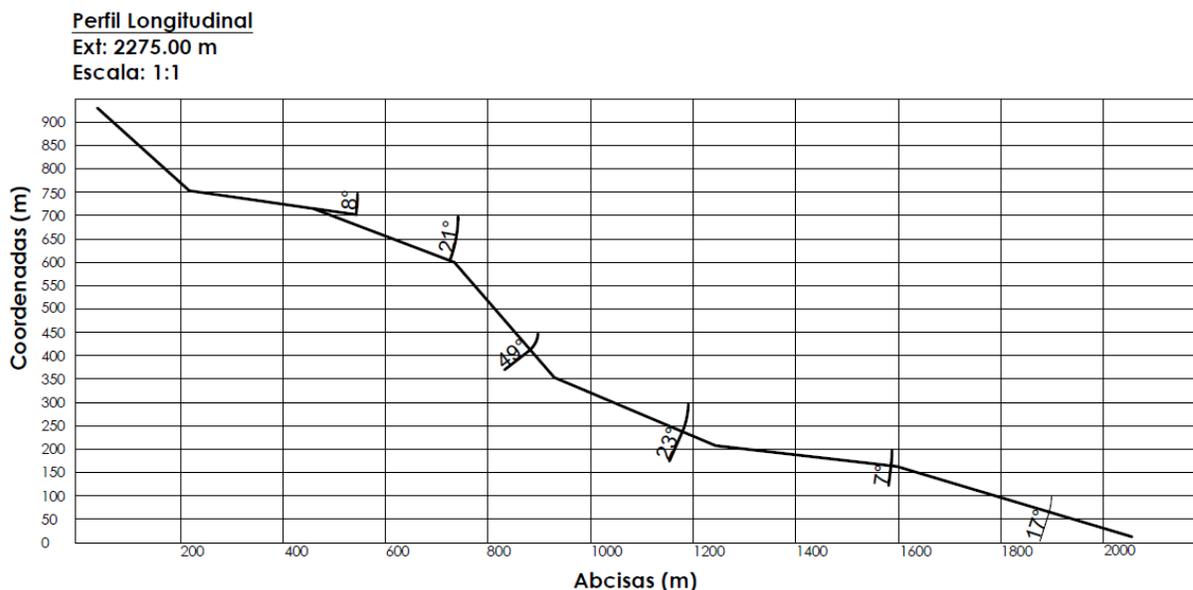


Figura 6-7 Perfil longitudinal de la Quebrada Taruca generado a partir de las abscisas y cotas del Plano de Corpoamazonía.

Fuente: Autor

Este perfil fue generado bajo coordenadas obtenidas del plano real de superficie y fue llevado al programa computacional YADE tomando las pendientes más representativas y manteniendo los 2.0km de longitud intentando buscar la representación más cercana al perfil posible (el final del perfil longitudinal coincide con el punto donde la quebrada se bifurca con la quebrada Taruquita). Al final de la distancia real se agrega 1km adicional para evitar la pérdida de las partículas generadas en el programa y asumir grandes tiempos de análisis en la modelación (*Figura 6-8*).

El análisis se llevó a cabo en un entorno tridimensional (3D), centrándose en el perfil longitudinal que se describe anteriormente mediante las abscisas y coordenadas de la *Figura 6-8*. Además, se ha considerado una sección transversal para examinar el flujo del material. Se optó por mantener una sección uniforme en todo el perfil, con un ancho constante de 100m promedio de las secciones obtenidas para el perfil, –secciones transversales que varían entre 50 y 200m según los planos analizados (Corpoamazonía, 2005)-, con el objetivo de estandarizar las secciones y reducir los tiempos de cálculo. Sin embargo, es importante señalar que, en las cuencas, los anchos varían longitudinalmente, lo que resulta en secciones hidráulicas menores en algunos tramos y mayores en otros,

afectando directamente las velocidades del flujo. Para futuras investigaciones, se sugiere realizar ajustes en las coordenadas del eje "Z" y modificar las secciones para permitir un análisis de flujo variado.

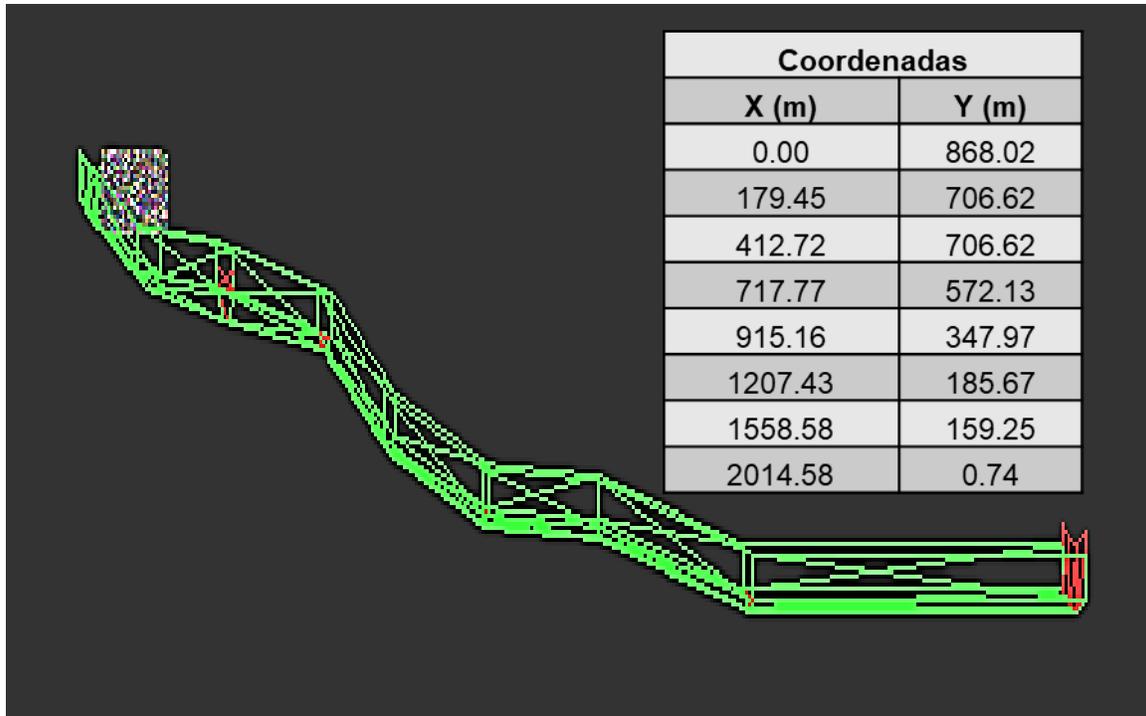


Figura 6-8 Perfil numérico de la Quebrada Taruca generado para el programa computacional YADE por medio de Coordenadas.

Fuente: Autor

Esta distancia de acotamiento del proyecto es de gran importancia ya que será el eje fundamental para poder calibrar el modelo que se generará con los diferentes parámetros geotécnicos de los materiales que se estudiaron en diferentes investigaciones realizadas a la zona. Es de suma importancia que los detritos generados en la parte alta en su mayoría puedan llegar a la distancia final para que el modelo sea finalmente aprobado y esté calibrado, ya que a esta distancia de viaje deberá llegar el volumen aportado por la cuenca Taruca al unirse con la quebrada Taruquita, en color rojo en la *Figura 6-9* se representa la longitud estudiada y la zona donde se unen las quebradas tomando esta distancia como parámetro esencial a cumplir para la validación del modelo. Estos datos fueron estudiados por la Consultoría Consorcio Inypsa et al., (2018), el cual será detallado en el siguiente numeral.

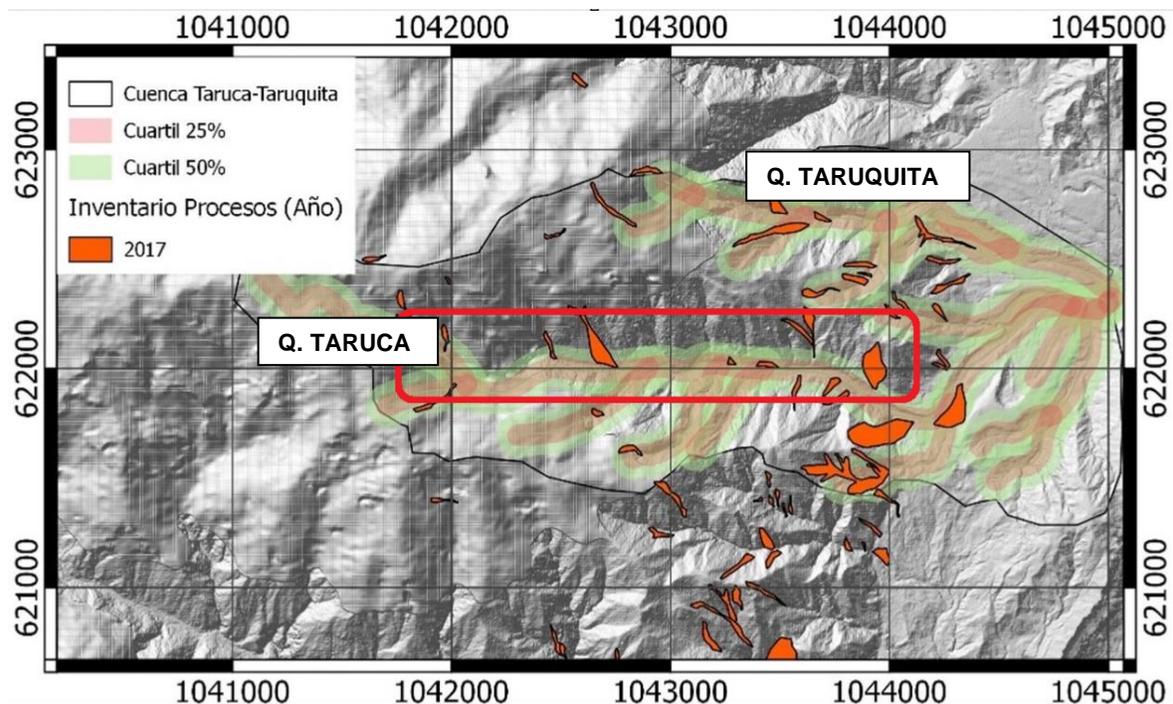


Figura 6-9 Distancia de viaje (buffer) a cada una de las quebradas identificadas a escala 1:25.000 en función de los cuartiles. Recuadro en rojo: Área de estudio en este trabajo.

Fuente: Modificado de (Consortio Inypsa et al., 2018)

6.4 Descripción geológica y geotécnica de los materiales

Para la presente investigación se tuvo en cuenta el estudio realizado por el Consortio Inypsa et al., (2018) y también la caracterización realizada por el Servicio Geológico Colombiano (2018), en el estudio de “Evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el área urbana, periurbana y de expansión del municipio de Mocoa”, realizado a escala 1:5000.

En este estudio, se analizaron las diferentes zonas en cuanto a los materiales presentes en la localización. En la parte alta de la quebrada Taruca, la estudiada en el presente proyecto describen diferentes tipos de materiales.

Se describen materiales de depósitos matriz soportados en proporción 60% matriz y 40% clastos, con bloques de radios promedio de 1.4m y 0.30m. La matriz es una composición de granos de arena gruesa a media no gradada y este material fino puede alcanzar casi los 0.50 m de espesor en las márgenes y 0.20m más próximos al centro del cauce. En la litología descrita por el estudio, se menciona la presencia de granitos en un 85% provenientes del Monzogranito de Mocoa.

El Monzogranito de Mocoa, descrito por el Consorcio son rocas ígneas compuestas por rocas graníticas que pueden variar en su longitud por la cuenca, algunos con presencia de feldespatos y otros con mayor contenido de plagioclasa. (Consorcio Inypsa et al., 2018). Específicamente para la zona de la Quebrada Taruca, el porcentaje en feldespato de los granitos son más altos que en el resto variando de un 30 a 40%.

En cuanto al material transportado por la cuenca, es definido por los estudios como un depósito fluvio-torrencial, en composición 30% matriz y 70% clastos. La matriz se encuentra formada por una arena gruesa de tamaño máximo, presentando consistencia y humedad media (Consorcio Inypsa et al., 2018). Al igual que el material que hace parte de la cuenca en referencia a los clastos que son transportados aguas abajo son de tipo de rocas ígneas como el granito, porcentajes de dioritas y andesitas también.

Dadas las descripciones anteriores, se definen los parámetros geotécnicos de la cuenca que será la superficie por donde deslizará el material y para las partículas que son la simulación de los detritos deslizados. Esto es necesario para realizar el análisis correspondiente en el programa computacional, para ello se requieren propiedades elásticas que son solicitadas bajo el modelo de Contacto Simple propuesto por Cundall (Cundall & Strack, 1979), propiedades como Densidad, módulo de rigidez (dato gobernante para las tensiones tangenciales y paralelas) y fricción del material para el caso de las partículas y para el caso de la cuenca adicional nos solicita la relación de Poisson.

Se realizó la búsqueda de varios autores para materiales como el granito ya que en su mayor proporción está la presencia de este tipo de roca en cuanto a estos valores que son necesarios para los análisis:

De acuerdo con Goodman (1989), para una roca tipo Granito la relación de Poisson varía de 0.18 a 0.22 para una Roca granito en Nevada.

González Vallejo (2002), nos habla de unas relaciones de Poisson para la roca Granito con variabilidad entre 0.1 a 0.4 y unos Módulos de Rigidez (E) entre 1.7 a 7.7×10^6 Pa.

Para el ángulo de rozamiento, Barton (1974), hace unas descripciones de valores para Diorita, granodiorita y rocas porfíricas de valores de 26.5° y para los Granitos con arcilla en los rellenos de falla entre los 25° a 45° . Dado que son materiales fluvio-torrenciales es posible que en las juntas de diaclasamiento estén presentes materiales más finos. Por otro lado, González Vallejo (2002) menciona valores de 24° a los 25° .

Finalmente, en la investigación realizada por Li et al., (2012), con el fin de que la superficie y que las partículas tengan un correcto movimiento acercado a la realidad, se recomienda que los valores utilizados sean valores bajos. Para los coeficientes de fricción se han utilizado valores de 0.25, 0.20 y 0.15 (basados en la tangente del ángulo en grados), según la literatura. Esta información ha sido utilizada para poder determinar el valor correcto en el análisis de sensibilidad en nuestro modelo.

6.5 Parámetros geomécánicos de los materiales para la simulación numérica

Con estos valores de referencia, se determinan los siguientes parámetros para cada una de las zonas, sin embargo, antes es realizado un análisis de sensibilidad para fijar los parámetros. Este análisis de sensibilidad es presentado más adelante en el siguiente capítulo explicando detalladamente los parámetros y de qué manera influyen en las modelaciones realizadas.

Material transportado: deposito fluviotorrencial

Fricción: 21.6°

Módulo de Young: 6.50×10^5 Pa

Densidad: 2400 kg/m³

Material de cuenca: roca granito

Fricción: 11.3°

Módulo de Young para Granito: 3.0×10^9 Pa

Densidad: 2600 kg/m³ de acuerdo con Richard Goodman (1989).

Relación de Poisson: 0.22

Como se puede evidenciar el material roca granito definido para la cuenca tiene parámetros mayores para representar una cierta rigidez en sus paredes y que de esta manera los detritos (las partículas) en la simulación puedan llegar a la distancia requerida.

Como bien es mencionado en el Capítulo anterior del modelo de contacto para las rigideces tangenciales y perpendiculares entre partículas es necesario tener en cuenta el radio de las partículas y así mismo debe ser tenido en cuenta para determinar el volumen final que se obtuvo proveniente de la Quebrada Taruca.

En este caso en los estudios realizados por Ingercivil miembro de la Consultoría Consorcio Inypsa et al. (2018), en el estudio de las granulometrías realizado en la Quebrada Taruca específicamente en la cuenca alta para poder obtener de allí un tamaño equivalente y utilizarlos en las modelaciones realizadas. En 4 de los resultados (puntos marcados en el mapa estudiados por la Consultoría) se obtiene que el porcentaje de Bolos contribuye en un 50% aproximadamente a los tamaños generales en la zona.



Figura 6-10 Puntos estudiados por el Consorcio en cuanto a la granulometría del material caído de la Quebrada Taruca.

Fuente: (Consorcio Inypsa et al., 2018)

Así mismo se evidencia en algunas fotografías el material caído en la cuenca (*Figura 6-11*).



Figura 6-11 Material caído de la Quebrada Taruca.

Fuente: (Consortio Inypsa et al., 2018)

Dadas, las informaciones anteriores se tienen volúmenes de materiales caídos entre los 200.000 a 300.000 m³ y material caído con diámetros desde 0.70m a los 4m.

Para evitar costos computacionales altos en la modelación se tiene en cuenta un agregado de partículas con granulometría homogénea manteniendo un radio de 1.34m, tamaño más evidenciado en la zona.

Para poder obtener el volumen necesario y teniendo en cuenta la ecuación de volumen de una esfera evidenciada en la *Ecuación 6-1*, son creadas 20.000 esferas del mismo tamaño para las modelaciones realizadas.

$$V = \frac{4}{3} \times \pi \times r^3$$

Ecuación 6-1 Volumen de una esfera

Volumen estudiado final: 200.000m³ con radio de 1.34m.

7 Modelación numérica de flujo de detritos y de barreras en la Quebrada Taruca

7.1 Introducción

En el estudio realizado por el Consorcio Inypsa et al., (2018), para obtener el mapa de amenaza por avenida torrencial de la zona; se usaron fotografías aéreas y a partir de trabajo de campo se identificó los índices de torrencialidad bajo criterios geomorfológicos y características geométricas de las cuencas para obtener los criterios para la respectiva zonificación. Bajo estos parámetros, se generaron los mapas de amenaza por avenida torrencial donde se obtuvieron dos insumos, las geoformas de la torrencialidad y el índice de torrencialidad. Por ejemplo, en la quebrada Taruca, se identificaron abanicos y se clasificó la zona como de alta amenaza. Esta área es el objeto de estudio del presente estudio.

“Mediante el análisis multitemporal se aprecia que la quebrada Taruca ha tenido dos eventos fluvio-torrenciales, en los cuales ésta ha desbordado su cauce alimentando la quebrada San Antonio la cual, en respuesta a tales eventos, se bifurca en varios brazos que atraviesan el centro poblado de Guadales, en donde igualmente se ha ido construyendo un abanico fluviotorrencial.” (Consorcio Inypsa et al., 2018)

De acuerdo con estudios anteriores, ellos muestran que la Quebrada Taruca ha tenido depósitos y eventos torrenciales que han causado su desbordamiento. En el año 2003, se afirma que se identificaron cuatro áreas donde las riberas presentaban estrechez y poca profundidad, representado en la *Figura 7-1*, en donde se evidencian los depósitos generados y los cambios de ancho que existe sobre el canal generando una amenaza significativa de desbordamiento. Estas zonas se caracterizan por cambios abruptos en la pendiente, la presencia de grandes volúmenes de material suelto, diversas precipitaciones debido a eventos de alta pluviosidad y la existencia de amplios valles, particularmente en la cuenca baja de las quebradas. (Jojoa, 2003)

En la *Figura 7-1*, también se puede evidenciar la diferencia de materiales que son desplazados por las Quebradas, volúmenes con tamaños considerables y así mismos materiales más finos que según Jojoa (2003), son utilizados en la extracción de arena.



a)

b)

Figura 7-1 Depósitos recientes dejados por las quebradas Taruquita (a) y Taruca (b). Los sedimentos finos, son aprovechados en la extracción de arena. (Jojoa, 2003)

Es por esta razón que, una vez estudiados los volúmenes importantes, las geoformas importantes encontradas en la quebrada Taruca y los índices de torrencialidad que son similares en toda la zona, se escoge los eventos presentados en esta quebrada para análisis y es estudiada bajo modelos por elementos discretos de acuerdo con los parámetros estudiados por informes anteriores y calibrada para obtener unos resultados mayormente cercanos a los reales.

7.2 Descripción del modelo para el flujo de detritos escogido

Los modelos de flujos en este proyecto se han calibrado bajo un volumen y una distancia de viaje determinado, el cual es tomado del estudio realizado por el Consorcio Inypsa et al. (2018). Los volúmenes en el estudio entregado por el Consorcio son contrarrestados con los estudios geotécnicos realizados referenciados en el capítulo anterior por Ingercivil miembro del Consorcio, los cuales varían aproximadamente entre los 200.000 y 300.000m³.

Se ha realizado el modelo de tal manera que las partículas que se han contado en el inicio del movimiento lleguen al punto final con el fin de obtener el volumen aportado por la Quebrada Taruca. (Figura 7-2). La distancia de viaje modelada y objetivo estuvo alrededor de 2000 a 2300 m, coincidiendo con el comportamiento del movimiento.

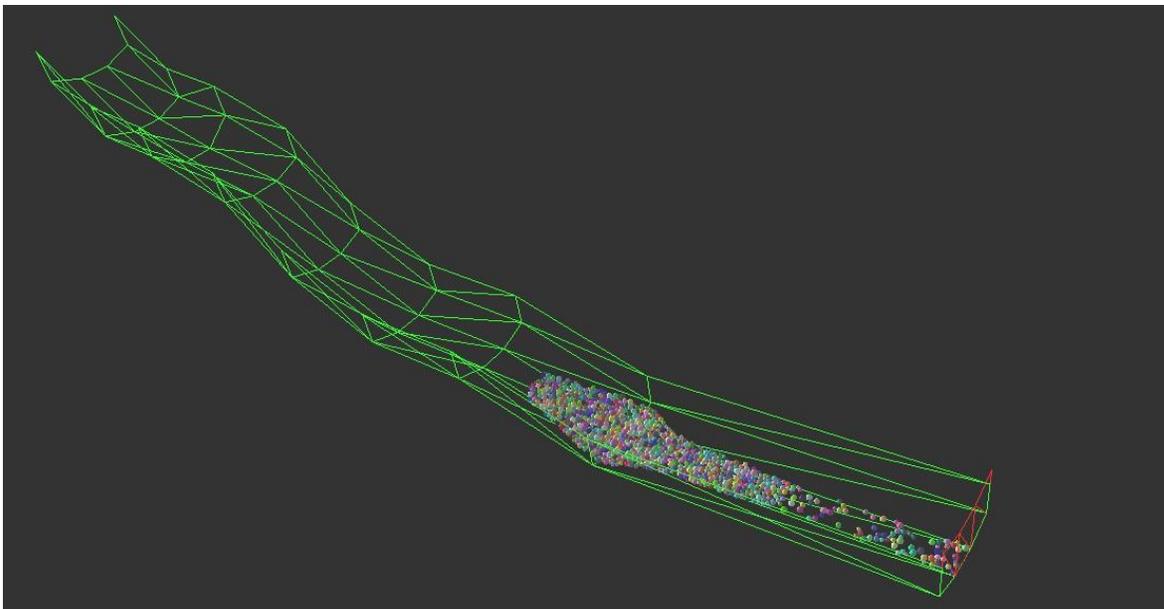


Figura 7-2 Modelo de flujo para Caso de Quebrada Taruca: partículas tramo final.

Fuente: Autor

La calibración del modelo está relacionada directamente con la comparación y el análisis de sensibilidad realizado para distancias de viaje vs el volumen de partículas en cierta distancia.

Se realiza un análisis de sensibilidad que se describe más adelante en la sección 7.5 con el fin de obtener los parámetros geomécánicos numéricos de las partículas y de la cuenca de manera que el modelo del flujo pueda ser computacionalmente viable y se acerque a la realidad de la mejor manera posible. Los valores de los parámetros obtenidos estuvieron muy cercanos a los indicados por la literatura y ensayos geotécnicos de la zona.

7.3 Descripción del código general

Para la modelación numérica del evento, se diseñaron varios códigos en lenguaje Python para que lograra ejecutar todos los valores requeridos en la modelación, utilizando el software de elementos discretos Yade.

Se han desarrollado cinco códigos que comparten una estructura similar, aunque se han realizado modificaciones en algunas líneas para adaptar los resultados a las especificaciones requeridas.

El Código utilizado para el análisis de sensibilidad está en el apartado Anexo A , en el cual se pueden evidenciar los cortes y límites que se tuvieron en cuenta para la medición del

número de partículas a las distancias determinadas, con el fin de cuantificar los volúmenes para la validación frente al evento real.

Para la implementación de las Barreras, se han creado 4 códigos adicionales variando la distribución y ubicación de ellas, detallados en los apartados: Anexo B, Anexo C, Anexo D y Anexo E.

Finalmente, para los cambios de propiedades específicas de las barreras, se han realizado con el código descrito en el Anexo E, para el cual se variaron parámetros de geometría y elasticidad de estas estructuras.

El código general es dividido en 3 secciones principales: en la primera sección se realiza la modelación de los elementos que componen todo el evento como lo son las partículas simulando los detritos caídos y la superficie de deslizamiento simulando de tal manera la cuenca por la que transcurre el flujo de detritos aguas abajo.

El modelo DEM del flujo requiere de los siguientes parámetros:

A. Parámetros de las partículas:

- Coeficiente de fricción.
- Módulo de elasticidad (E).
- Relación de Poisson.
- Densidad.

B. Parámetros de la superficie de deslizamiento:

- Coeficiente de fricción.
- Módulo de elasticidad (E).
- Relación de Poisson.

C. Otros Parámetros numéricos:

- Coeficiente de amortiguamiento.

Para las simulaciones se adjudicaron parámetros a las partículas con las propiedades de los materiales mencionados en el capítulo anterior. Estos parámetros son calibrados y seleccionados para poder obtener los de mejor comportamiento.

El volumen de flujo de detritos ha sido modelado utilizando partículas esféricas de radio uniforme de 1.34 m de acuerdo con el material real del flujo de detritos, partículas rígidas que no se deforman y que interactúan en sus contactos teniendo en cuenta su rigidez y fricción. Se han utilizado 20.000 partículas para simular un volumen de flujo de 200.000m³ similar al caso real.

Luego de haber creado las partículas junto a sus propiedades, se describe la ley de movimiento que se da bajo contacto simple y gravedad pura de los materiales determinados, este es el momento donde se da la caída libre del material a través de la superficie en este caso la cuenca, hasta dejarlas en reposo completamente sobre la superficie (*Figura 7-3*) para que por fricción y por las propiedades mecánicas de los materiales comiencen a deslizar aguas abajo hasta el final de la cuenca.

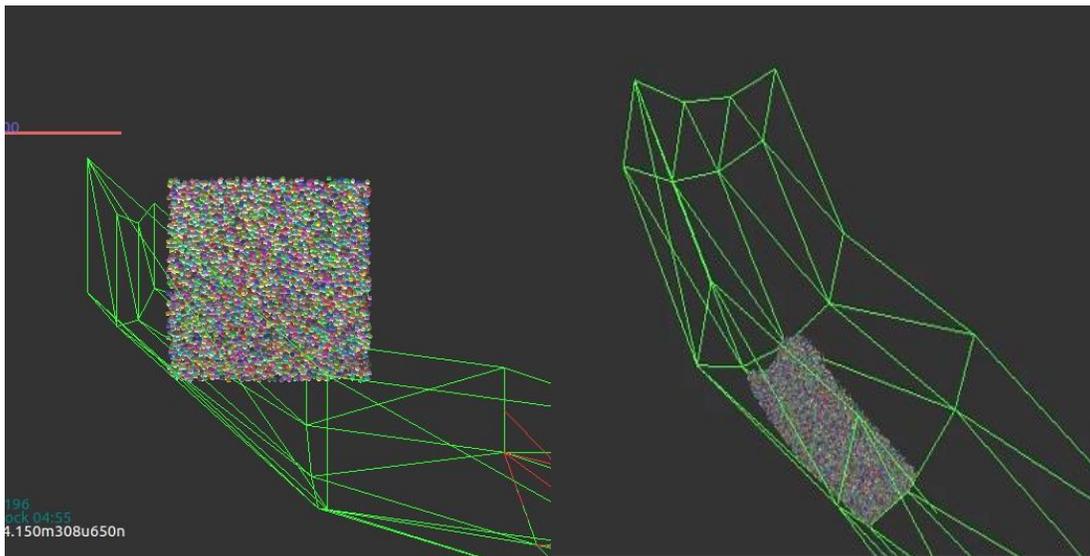


Figura 7-3 Caída Libre hasta el reposo de las partículas. Primer momento del código.

Fuente: Autor

Para este procedimiento se elabora una Barrera la cual va a ser llamada dentro del Código “Barrera Móvil” (*Figura 7-4*) que ayuda a retener los detritos, aguas arriba de la cuenca con respecto a la ciudad de Mocoa, para dejar lista la simulación del inicio del movimiento. Cuando las partículas tienen un movimiento muy bajo, dicha estructura desaparece para darle paso al movimiento de las partículas aguas abajo con respecto a Mocoa, lo que es

denominado el tercer momento de la simulación. Se realizaron diferentes simulaciones del movimiento del flujo variando los parámetros con el fin de realizar el proceso de calibración de los parámetros numéricos y también realizar un análisis de la influencia de estas propiedades.

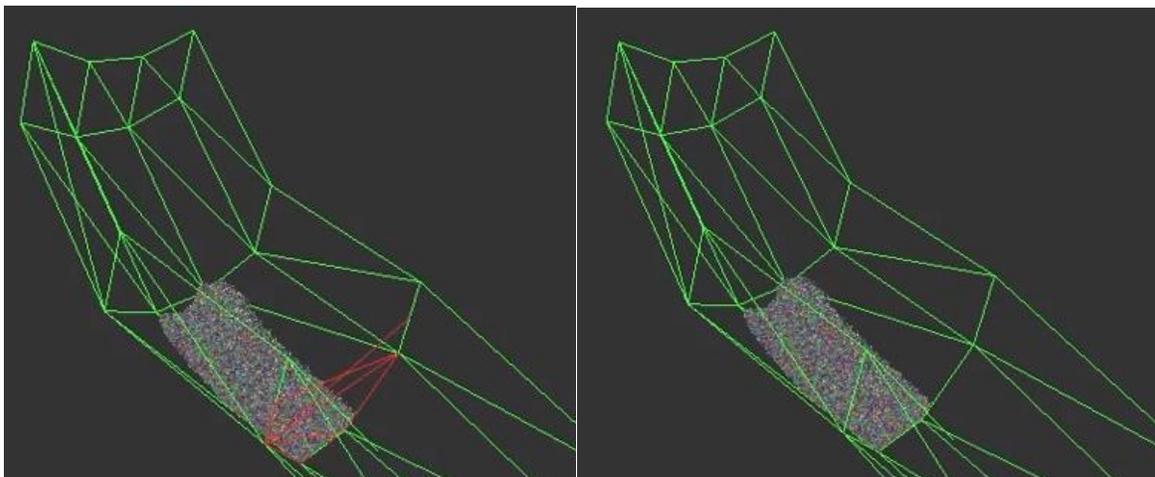


Figura 7-4 Barrera Móvil en interacción con el movimiento de las partículas.

Fuente: Autor

Cuando las partículas deslizan aguas abajo por la superficie en este caso la cuenca, se requieren que lleguen a la distancia de viaje definida para el flujo de detritos real (2000-2300m) para que sea calibrado con el evento ocurrido en 2017. En este caso en un primer momento se varían los parámetros escogidos para los materiales y son calibrados bajo la distancia de viaje requerida. Es decir, que el volumen calculado de partículas debe llegar aguas abajo con los parámetros escogidos para cada una de las simulaciones, los parámetros con los cuales se obtenga una distancia de viaje similar a la real serán los seleccionados para la modelación del flujo de detritos y el análisis del uso de Barreras.

Una vez obtenidos los valores a trabajar para la simulación se determina la intervención del flujo con el posicionamiento de Barreras (paredes tipo Facet) en 3 posiciones para determinar cuál de ellas tiene la mejor retención. Esta retención es evaluada bajo las Fuerzas de impacto que llegan a cada una de las estructuras, cuanto mejor sea disipada esta fuerza de impacto mejor comportamiento tendrán las barreras, este efecto será demostrado más adelante.

Una vez son determinadas las posiciones de las Barreras, se varía la rigidez, Módulo de Young, en sus propiedades para determinar el efecto de flexibilidad en este tipo de estructuras.

7.4 Descripción de los resultados esperados

Para cada uno de los análisis que se van a realizar, se ha buscado en la literatura investigaciones relevantes de simulaciones de movimientos en masa ((Guoqing. et al, 2021); (Song D. , y otros, 2017); (Song, et. al, 2017)) y se han comparado los resultados obtenidos, comprobando que el presente modelo tenga un comportamiento numérico adecuado.

Los análisis de sensibilidad, como es mencionado anteriormente deben ser realizados para poder obtener los modelos más cercanos a la realidad. En la investigación de Guoqing et al. (2021) y otros, se realizó una variación en los materiales deslizados en la cuenca en cuanto a su coeficiente de fricción y así mismo diferentes resistencias de compresión y tracción para simular la influencia de la caída de fuerza del deslizamiento de tierra, con esta variación se determinaron la velocidad media vs un tiempo (número de ciclos dentro de la simulación) y las distancias de viaje representado en la *Figura 7-5*. Se observa una similitud en el comportamiento de todos los materiales; no obstante, se destaca que los parámetros influyen en el movimiento y, por ende, en las distancias de viaje asociadas a cada propiedad.

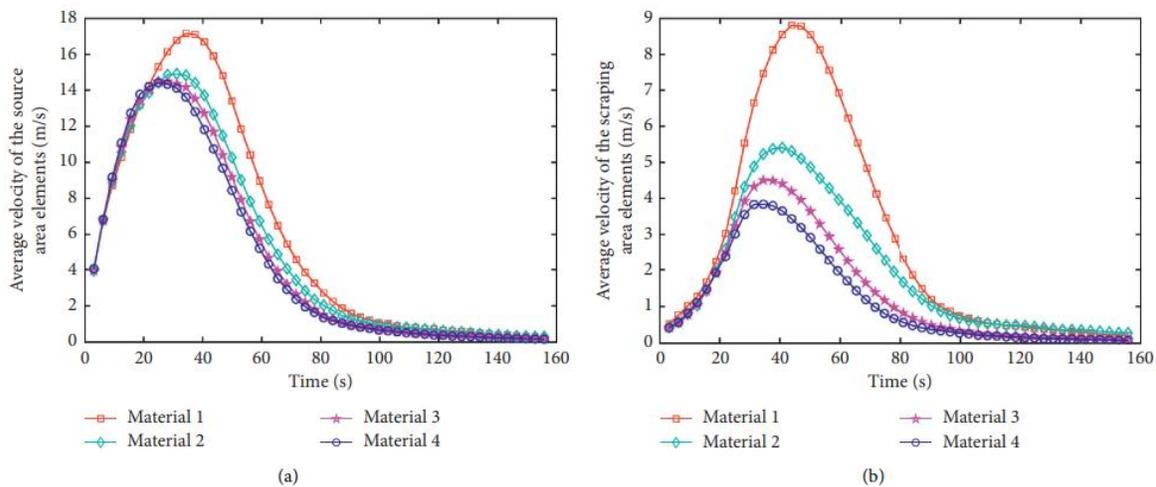


Figura 7-5 Velocidad media vs Tiempo (No. De Ciclos) de diferentes materiales

Fuente: (Guoqing et al., 2021)

Ellos concluyen que “El estudio de los factores que inciden en el movimiento de deslizamientos de tierra es valioso para analizar el alcance de los impactos asociados a estos desastres. Esta información contribuye a una prevención más efectiva y a la reducción de pérdidas de propiedades originadas por deslizamientos de tierra” (Guoqing. et al, 2021).

Así mismo en las investigaciones relacionadas se revisaron las fuerzas de impacto, generadas en Barreras Rígidas o en otro tipo de estructuras que fueran analizadas. Se realizó un estudio de los impactos a una barrera tipo rigida dividida en celdas, las fuerzas fueron medidas en escala en cada celda proporcionando los resultados de las *Figura 7-6* y *Figura 7-7*.

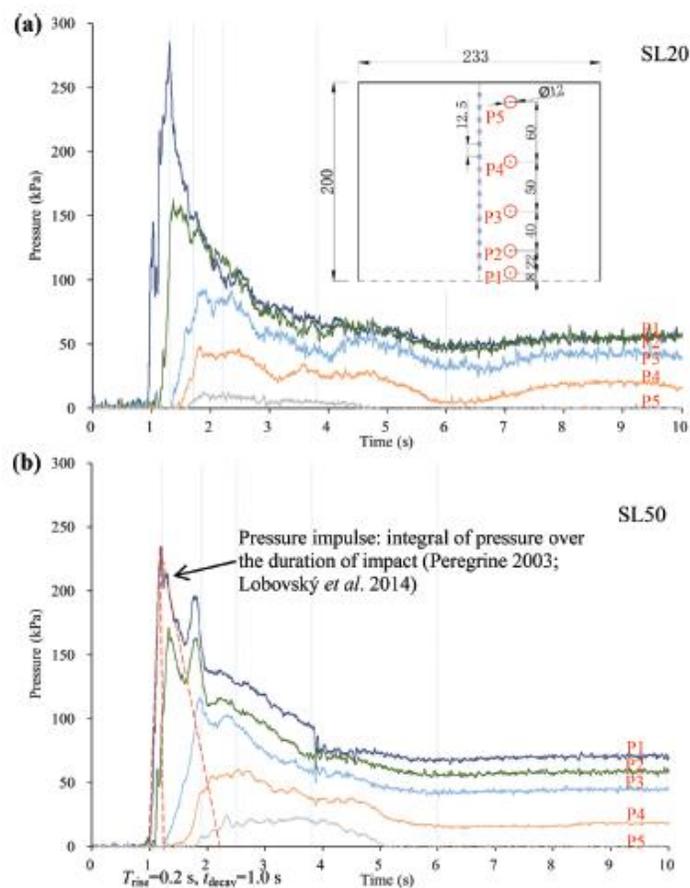


Figura 7-6 Fuerza de Impacto vs Tiempo (No. De Ciclos): (a) Resultados para material SL20: arena de Leighton Buzzard (LB) con variación de fracción sólida de 0.20; (b) Resultados para material SL50: arena de Leighton Buzzard (LB) con variación de fracción sólida de 0.50.

Fuentes: (Song, et. al, 2017)

En la *Figura 7-6*, se representan las Fuerzas de Impacto (kPa) relacionada con el tiempo (s) de diferentes modelos denominados SL, en la que varían condiciones como fracción sólida, radio, número de Froude, número de Bagnold y coeficientes de viscosidad. En este estudio, los flujos del prototipo fueron simplificados como flujos bifásicos ideales. Estos flujos consisten en un fluido poroso viscoso puro y arena uniforme. La fase fluida corresponde a una mezcla de agua y granos finos que fluye libremente entre los granos sólidos. Para el ensamblaje granular, se utilizó arena de fracción C de Leighton Buzzard (LB), la cual se caracteriza por su uniformidad y diámetros de aproximadamente 0.6 mm (Choi et al. 2015).

Se varían la fracción sólida en cada uno de los casos, por ejemplo, para SL20 y SL50, la fracción sólida varía de 0.20 a 0.50. También otras propiedades se tienen en cuenta como, el número de Froude de 6.6 a 3.6, el número de Bagnold de 5 a 11, y los coeficientes de viscosidad de 6.5 a 3.4E-2 correspondientemente. Estos resultados indican que el material SL20 genera una mayor fuerza de impacto, como se muestra en la figura. Se analizan diversas áreas de la barrera y las fuerzas de impacto a lo largo del tiempo con estas variaciones. Para la *Figura 7-6-a* se observan las fuerzas máximas en la base de la barrera, indicadas como P1, especialmente durante los primeros segundos de la simulación. Por otro lado, en la *Figura 7-6-b* se identifica un comportamiento similar, aunque se destaca que la prueba SL50 requiere más tiempo para que la celda de carga superior detecte una respuesta al impacto.

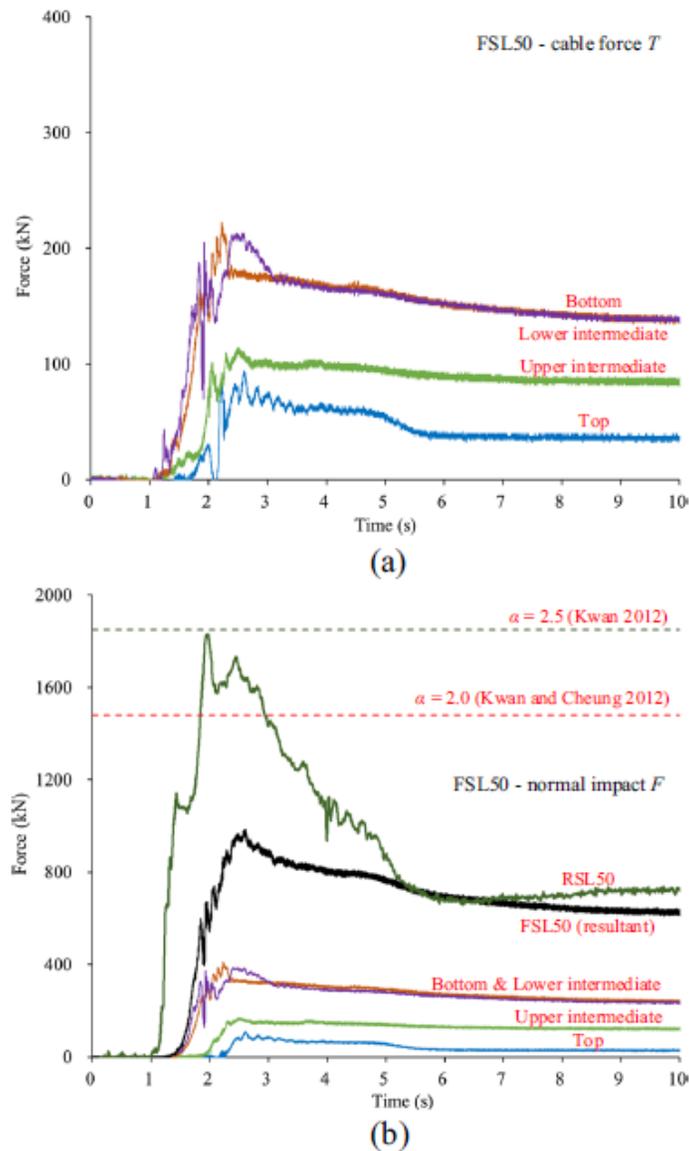


Figura 7-7 Fuerza de Impacto vs Tiempo (No. De Ciclos) para material SL50: arena de Leighton Buzzard (LB) con variación de fracción sólida de 0.50: (a) Fuerzas en los cables; (b) Fuerzas en cables y resultantes.

Fuentes: (Song, et. al, 2017)

En la Figura 7-8, así como en la anterior se representan las Fuerzas de impacto del flujo de los detritos (kPa) relacionada con el tiempo (s), sin embargo, los ensayos de escala son simulados con una “barrera flexible” simulando unos cables junto a una membrana elástica, obteniendo las fuerzas aproximadas en cada uno de los cables dispuestos en la superficie de la estructura.

La fuerza de impacto es entendida como la fuerza ejercida por un fluido, como el agua o un flujo de detritos, contra una estructura de contención, como una pared, un dique o una presa. Esta fuerza es el resultado de la energía cinética del fluido y su peso, y puede ser significativa, especialmente en situaciones de inundaciones, flujos de detritos o corrientes de agua rápidas. La magnitud de la fuerza de impacto depende de varios factores, incluyendo la velocidad y la masa del fluido, así como la altura y el diseño de la barrera. En el caso de una barrera de contención, como una presa o un dique, la fuerza de impacto puede ser crítica para determinar la estabilidad y la seguridad de la estructura, y es importante tenerla en cuenta en el diseño y la ingeniería de tales estructuras.

La *Figura 7-7-a*, evidencia que la fuerza es mayor en las partes inferiores vs la parte superior de la estructura. Por otro lado, para la *Figura 7-7-b*, se representa las mismas fuerzas en cada uno de los cables y adicional la fuerza resultante y la fuerza normal, la resultante se obtiene sumando las componentes de las fuerzas en el sentido horizontal. Este enfoque tiene como objetivo determinar la fuerza de generada por el impacto en la estructura.

En estas dos representaciones gráficas (*Figura 7-6 y Figura 7-7*) se observa claramente cómo, al comienzo de las simulaciones, las partículas experimentan fuerzas de impacto considerables. Estas fuerzas pueden ser atribuidas tanto a las inclinaciones de las cuencas estudiadas como a las elevadas velocidades del flujo. Se destaca cómo estas fuerzas de impacto se disipan a medida que el flujo intercepta estructuras transversales a lo largo de su recorrido.

En ambas investigaciones de la misma manera, se evidencia el impacto que genera la posición y la inclusión de las estructuras transversales en el transcurso de la cuenca.

Se busca en la presente investigación que los resultados se muestren en relaciones de variables que se usan en la literatura con comportamientos numéricos adecuados y obtener modelos significativos para el caso de estudio específico.

7.5 Análisis de sensibilidad para elección de parámetros geomecánicos

La simulación del evento original sin intervención se realiza para poder calibrar el modelo que se ha generado bajo el Código de Python descrito detalladamente en el Anexo A y

poder obtener valores más cercanos al volumen aportado por la cuenca alta de la Quebrada Taruca.

Para ello se realizó un Análisis de Sensibilidad para tres variables importantes en el sistema: Ángulo de fricción o rozamiento de las partículas, Módulo de rigidez o Elasticidad (E) de las partículas, y Ángulo de fricción o rozamiento de la superficie de deslizamiento del canal de la cuenca.

7.5.1 Ángulo de rozamiento para las partículas:

En los capítulos anteriores se menciona que el material deslizado hace referencia un depósito fluvio torrencial con alta presencia de granitos y de acuerdo con varias investigaciones se ha optado por un valor de ángulo de fricción de 21.8°, bajo un análisis de sensibilidad junto con otros 3 valores 11.3°, 16.7° y 26.6°, valores también representativos de tener en un material como el granito. Los valores estudiados para estas modelaciones fueron los mostrados en la *Tabla 7-1*.

En la *Tabla 7-1 (a)*, están los parámetros que se variaron para las partículas y en la *Tabla 7-1 (b)* los parámetros variados para el material de superficie numérica (cuenca).

Partículas		
Coeficiente de fricción (μ)	Ángulo de fricción (°)	Módulo de rigidez E (Grava) (Pa)
0.2	11.3	1.70 x 10 ⁷
0.3	16.7	1.70 x 10 ⁷
0.4	21.8	1.70 x 10 ⁷
0.5	26.6	1.70 x 10 ⁷

(a)

Superficie numérica - Cuenca: Granitos			
Coeficiente de fricción (μ)	Ángulo de fricción ($^{\circ}$)	Módulo de rigidez E (real de la cuenca) (Pa)	Relación de Poisson ν (material roca)
0.2	11.3	3.00×10^9	0.25
0.2	11.3	3.00×10^9	0.25
0.2	11.3	3.00×10^9	0.25
0.2	<u>11.3</u>	3.00×10^9	0.25

(b)

Tabla 7-1 Datos utilizados para la Simulación 1, 2, 3 y 4 variando el ángulo de rozamiento en las partículas. (a) Parámetros para Partículas. (b) Parámetros para la superficie numérica-cuenca

Fuente: Autor

Variando este valor como primer insumo, se obtiene la *Figura 7-9*, donde bajo el código (Anexo A) se cuenta el número de partículas que llegan a cierta distancia y de esta manera se puede obtener cuál es el valor de ángulo de fricción que más se acerca al volumen buscado. El conteo de partículas se lleva a cabo por tramos, lo que implica que el código establece unos límites invisibles que se activan cuando las partículas alcanzan el reposo, permitiendo luego la generación de resultados al determinar el número de partículas por tramo. Los valores seleccionados fueron los que más se aproximaron a obtener la cantidad inicial de partículas cerca de los 2000 metros, es decir el valor que no dejara rezagadas muchas partículas y que tampoco sobrepasaran la distancia, el valor con menor error posible en distancia de viaje.

Como se evidencia en la *Figura 7-9*, aunque el comportamiento es similar para los cuatro valores, el mayor número de partículas a los 2.0 km se encuentra entre los valores de 21.8° y 26.6° . Sin embargo, para el valor más alto, es decir, el de 26.6° , muchas partículas se quedan rezagadas antes de llegar a los 2.0 km. Por esta razón, se eligió y determinó el valor de 21.8° como la fricción de las partículas para las demás simulaciones. Además, para el valor de 21.8° , se observa una mayor concentración de partículas entre los 2000 m y los 2100 m esperados en comparación con los otros valores.

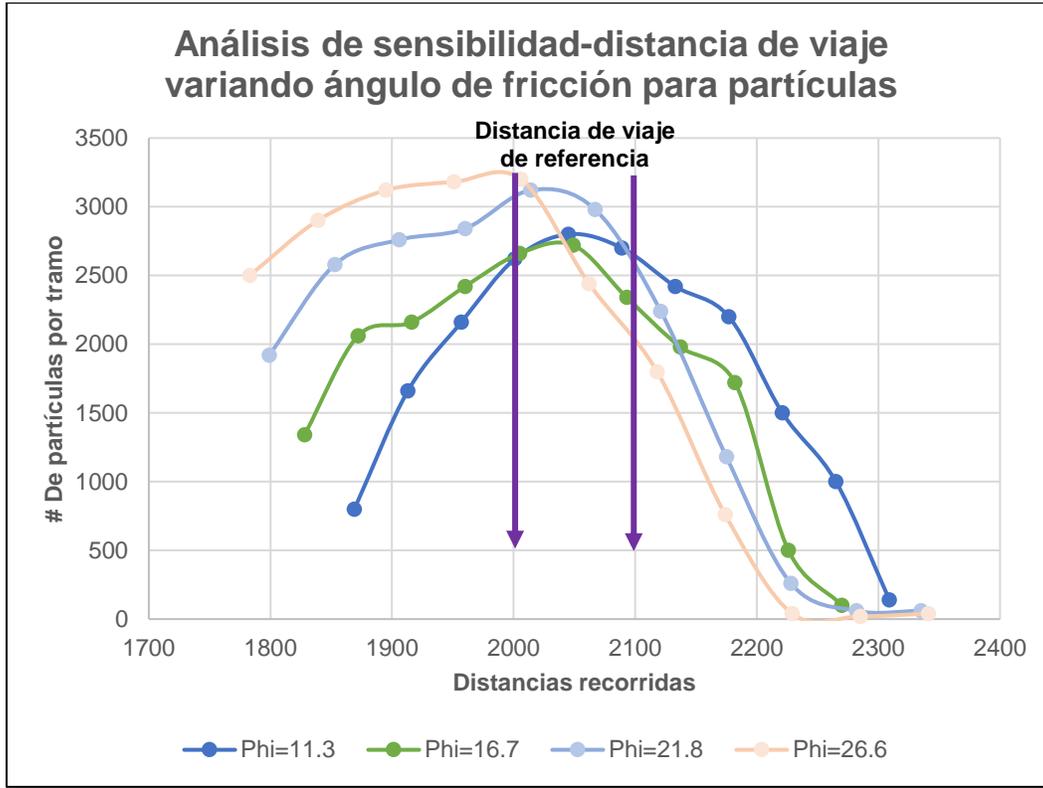


Figura 7-9 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaje variando Fricción en las partículas
Fuente: Autor

Para respaldar la información anterior, se realiza también una representación gráfica de las partículas acumuladas por tramo, partiendo de un total inicial de 20,000 partículas al inicio de la simulación. Con este enfoque, se procede a examinar qué valor de ángulo de fricción se acerca más a la cantidad de partículas simuladas. En la *Figura 7-10*, se evidencia que el comportamiento para el ángulo de fricción de 26.6° es completamente descartado, ya que la mayoría de las partículas quedan rezagadas. Por otro lado, para el ángulo de 16.7° se observa un comportamiento aceptable, aunque aún quedan partículas después de recorrer 2100 metros. Se reafirma una vez más que el parámetro que ofrece el mejor comportamiento es el ángulo de fricción de 21.8°.

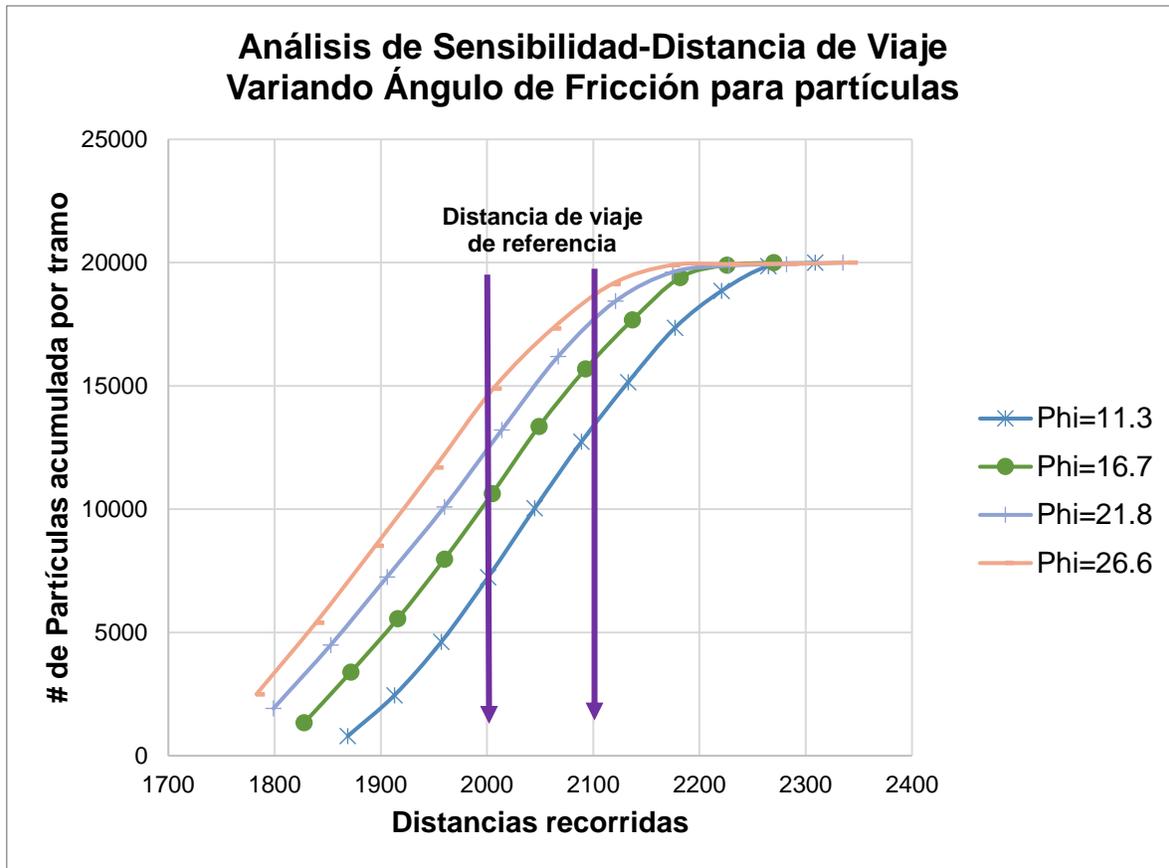


Figura 7-10 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaje variando Fricción en las partículas.

Eje vertical: Número de partículas acumuladas por tramo

Fuente: Autor

7.5.2 Módulo de rigidez para las partículas:

En el capítulo 6, sección 6.4 se menciona que el material deslizado hace referencia un depósito fluvio torrencial con alta presencia de granitos y de acuerdo con varias investigaciones se ha optado por un valor de 6.50×10^5 Pa, bajo un análisis de sensibilidad junto con otros 3 valores, 7.00×10^6 Pa, 1.70×10^7 Pa y 2.70×10^7 Pa, valores también representativos de tener en un material como el granito. Los valores estudiados para esta modelación fueron los mostrados en la *Tabla 7-2*.

En la *Tabla 7-2 (a)*, están los parámetros que se variaron para las partículas y en la *Tabla 7-2 (b)* los parámetros variados para el material de superficie numérica (cuenca).

Partículas		
Coeficiente de fricción (μ)	Ángulo de fricción ($^\circ$)	Módulo de rigidez E (Grava) (Pa)
0.4	21.8	7.00×10^6
0.4	21.8	6.50×10^5
0.4	21.8	1.70×10^7
0.4	21.8	2.70×10^7

(a)

Superficie numérica - Cuenca: Granitos			
Coeficiente de fricción (μ)	Ángulo de fricción ($^\circ$)	Módulo de rigidez E (real de la cuenca) (Pa)	Relación de Poisson ν (material roca)
0.2	11.3	3.00×10^9	0.25
0.2	11.3	3.00×10^9	0.25
0.2	11.3	3.00×10^9	0.25
0.2	11.3	3.00×10^9	0.25

(b)

Tabla 7-2 Datos utilizados para la Simulación 5,6 y 7 variando el Módulo de Young en las partículas. (a) Parámetros para Partículas. (b) Parámetros para la superficie numérica-cuenca

Fuente: Autor

Igual que en el caso anterior, el conteo de partículas se lleva a cabo por tramos, lo que implica que el código establece unos límites invisibles que se activan cuando las partículas alcanzan el reposo, permitiendo luego la generación de resultados al determinar el número de partículas por tramo. Los valores seleccionados fueron los que más se aproximaron a obtener la cantidad inicial de partículas cerca de los 2000 metros, es decir el valor que no dejara regazadas muchas partículas y que tampoco sobrepasaran la distancia, el valor con menor error posible en distancia de viaje.

Ahora, variando este valor, se obtiene la *Figura 7-11*, donde bajo el código descrito en el Anexo A cuenta el número de partículas que llegan a cierta distancia y de esta manera obtener cuál es el Módulo que más se acerca al volumen buscado. Como se evidencia en

la *Figura 7-11*, para un módulo más bajo, el número de partículas que llegan a la distancia de 2.0km es baja considerablemente comparada con los otros dos módulos.

Para el caso del Módulo 1.70×10^7 Pa se dejan rezagadas 15.600 partículas antes de los 2000m, un valor considerable dentro del total, para el módulo 2.70×10^7 Pa es un valor similar 15.140 partículas.

El mayor número de partículas con la mejor distribución depositado a la distancia esperada se obtiene para el valor de Módulo de 6.50×10^5 Pa, valor que deja rezagadas menos partículas que el valor de 7×10^6 Pa.

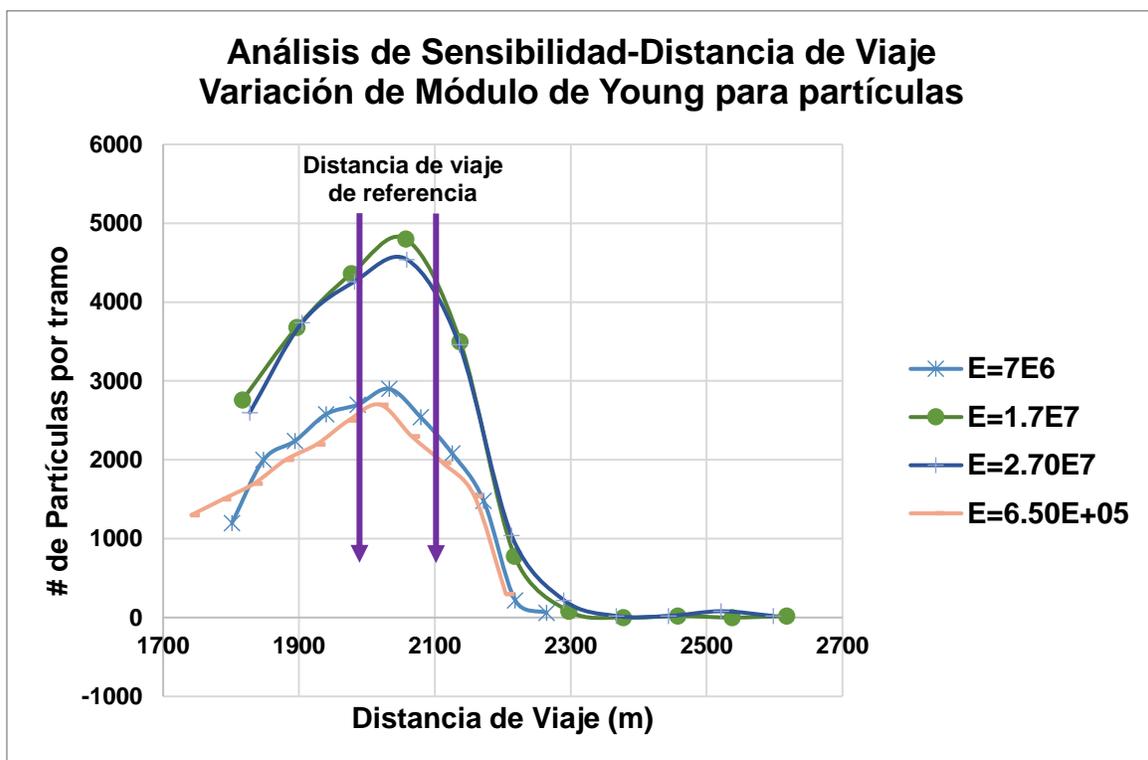


Figura 7-11 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaja variando E partículas. Valores de E en Pa.

Fuente: Autor

Para respaldar la información anterior, se realiza también una representación gráfica de las partículas acumuladas por tramo, partiendo de un total inicial de 20,000 partículas al inicio de la simulación. Con este enfoque, se procede a examinar qué valor de Módulo de Young se acerca más a la cantidad de partículas simuladas. En la *Figura 7-12*, reafirma una vez más que el parámetro que ofrece mejor comportamiento es el valor de Módulo de 6.50×10^5

Pa, dado que el Módulo de Young de los otros valores resulta en una cantidad significativa de partículas que permanecen en posiciones más avanzadas a lo largo de las abscisas.

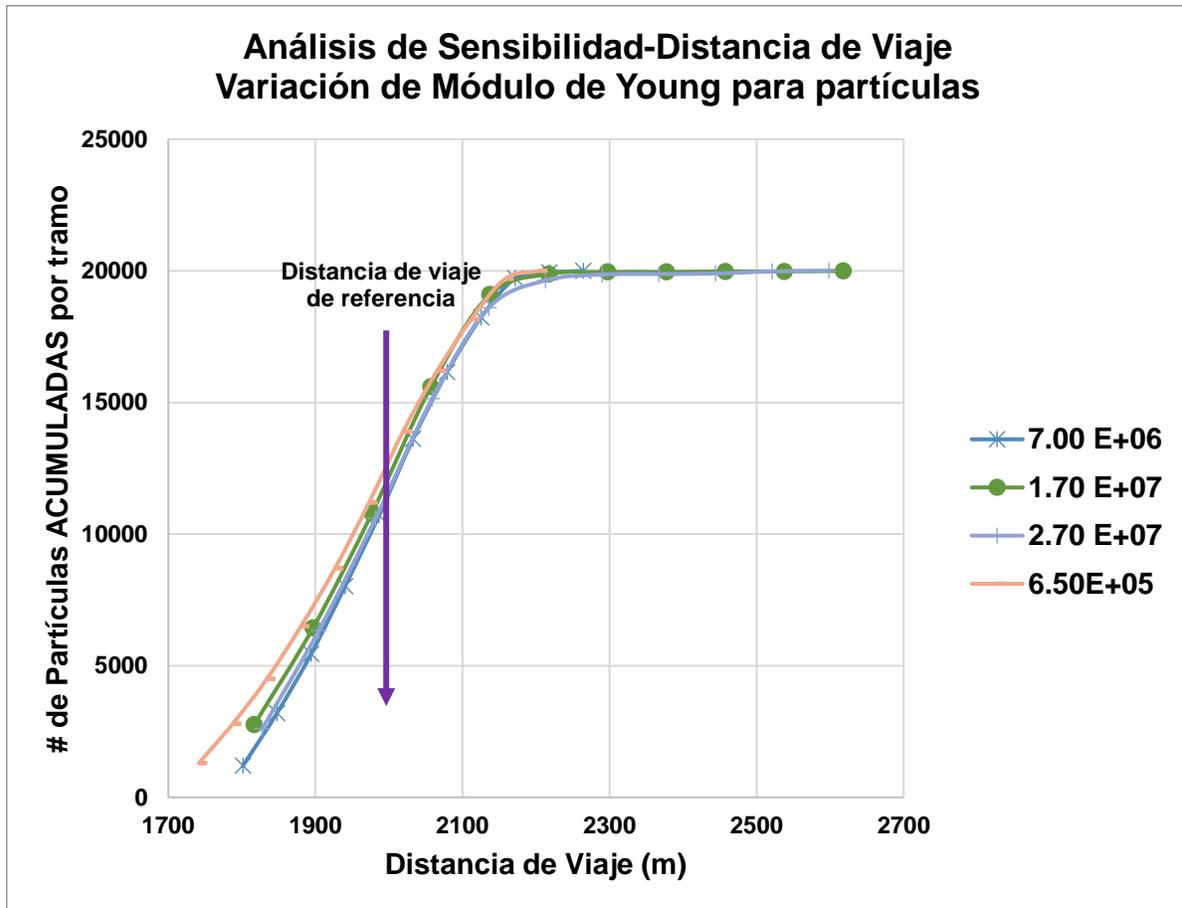


Figura 7-12 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaja variando E partículas
Eje Vertical: Número de partículas acumuladas por tramo. Valores de E en Pa.

Fuente: Autor

7.5.3 Ángulo de rozamiento para el material que conforma la superficie de la cuenca:

En los capítulos anteriores se menciona que el material conformado en la cuenca es una roca de tipo Monzogranito de Mocoa y de acuerdo con varias investigaciones se ha optado por un valor de ángulo de fricción de 25° sin embargo, al ser un material que por el paso de agua y de material grueso pierde rugosidad superficial se han estudiado valores más bajos que pueden corresponder a ángulos de fricción mineral al actuar como superficie de deslizamiento. Se realiza la simulación con el valor de 11.3°, bajo un análisis de sensibilidad junto con otros tres valores 8.5°, 14° y 19.3°, valores también representativos de tener en

un material como el granito más débil en sus superficies. Los valores estudiados para esta modelación fueron los mostrados en la *Tabla 7-3*:

Partículas		
Coefficiente de fricción (μ)	Ángulo de fricción ($^{\circ}$)	Módulo de rigidez E (Grava) (Pa)
0.4	21.8	6.50×10^5
0.4	21.8	6.50×10^5
0.4	21.8	6.50×10^5
0.4	21.8	6.50×10^5

(a)

Superficie numérica - Cuenca: Granitos			
Coefficiente de fricción (μ)	Ángulo de fricción ($^{\circ}$)	Módulo de rigidez E (real de la cuenca) (Pa)	Relación de Poisson ν (material roca)
0.2	11.3	3.00×10^9	0.25
0.15	8.5	3.00×10^9	0.25
0.25	14.0	3.00×10^9	0.25
0.35	19.3	3.00×10^9	0.25

(b)

Tabla 7-3 Datos utilizados para la Simulación 9,10 y 11 variando el Módulo de Young en las partículas. (a) Parámetros para Partículas. (b) Parámetros para la superficie numérica-cuenca

Fuente: Autor

Por último, variando el ángulo de fricción de la superficie numérica del deslizamiento, se obtiene la *Figura 7-13*, donde bajo el código descrito en el Anexo A cuenta el número de partículas que llegan a cierta distancia y de esta manera obtener cual es el valor de ángulo de fricción que más se acerca al volumen buscado. Como se evidencia en la *Figura 7-13*, aunque el comportamiento es similar para los cuatro valores y presenta una uniformidad no tan marcada, se observa que el valor de 11.3° tiende a generar una curva más equilibrada y uniforme, con un total de 15.120 partículas en los tramos estudiados (2013 a 2100

metros). El objetivo principal es asegurar que las partículas superen los 2000 metros y, como segunda condición, que no se excedan los 2100 metros.

Los valores más bajos, como 8.5° , exhiben picos muy pronunciados donde las partículas, al tener un bajo coeficiente de rozamiento, tienden a deslizarse con rapidez y alcanzar más rápidamente el punto de los 2000 metros. Sin embargo, continúan dejando una gran cantidad de partículas después de los 2100 metros. Con un valor de 8.5° , cerca de 3400 partículas sobrepasan los 2100 metros, mientras que para el valor de 11.3° , solo 1500 partículas lo hacen.

Por otro lado, los valores más altos muestran algunas retenciones antes de los 2000 metros, que es la distancia objetivo. El valor de 19.3° muestra un comportamiento notablemente alto en las cotas más alejadas al objetivo, reteniendo antes de los 2000 metros un total de 17,380 partículas, lo que lleva a descartarlo como el primer dato.

Asimismo, el valor de 14° sigue dejando rezagado un gran número de partículas detrás de los 2000 metros, específicamente 10,900 partículas.

Por lo tanto, el comportamiento más cercano y con mejor ajuste para el análisis es el de 11.3° , el cual además ha sido objeto de estudio en varias investigaciones previamente mencionadas para estos tipos de materiales residuales, especialmente bajo la acción del agua y durante el proceso de pulido de la rugosidad debido a la interacción con otras partículas y sedimentos.

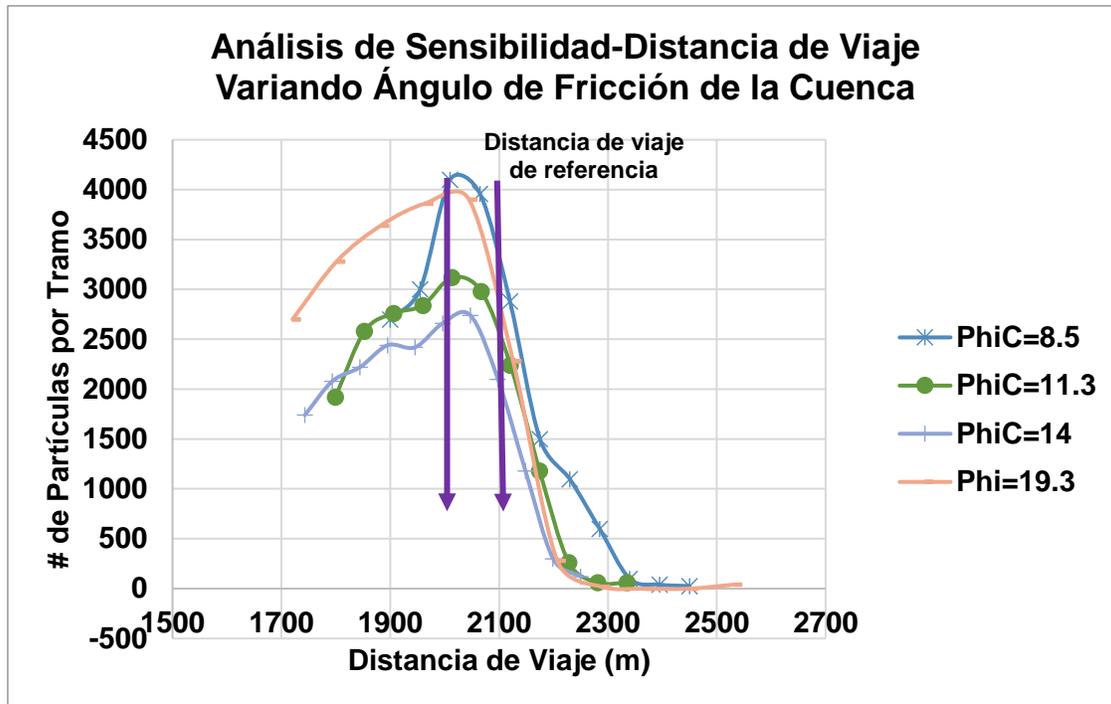


Figura 7-13 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaje variando Fricción de superficie (cuenca).

Fuente: Autor

Para respaldar la información anterior, se realiza también una representación gráfica de las partículas acumuladas por tramo, partiendo de un total inicial de 20,000 partículas al inicio de la simulación. Con este enfoque, se procede a examinar qué valor de ángulo de fricción se acerca más a la cantidad de partículas simuladas. En la *Figura 7-14*, reafirma una vez más que el parámetro que ofrece mejor comportamiento es el ángulo de 11. 3º dado que este valor alcanza los 2000 metros con un número acumulado de partículas cercano a 20,000 sin dejar significativamente rezagadas ni adelantadas.

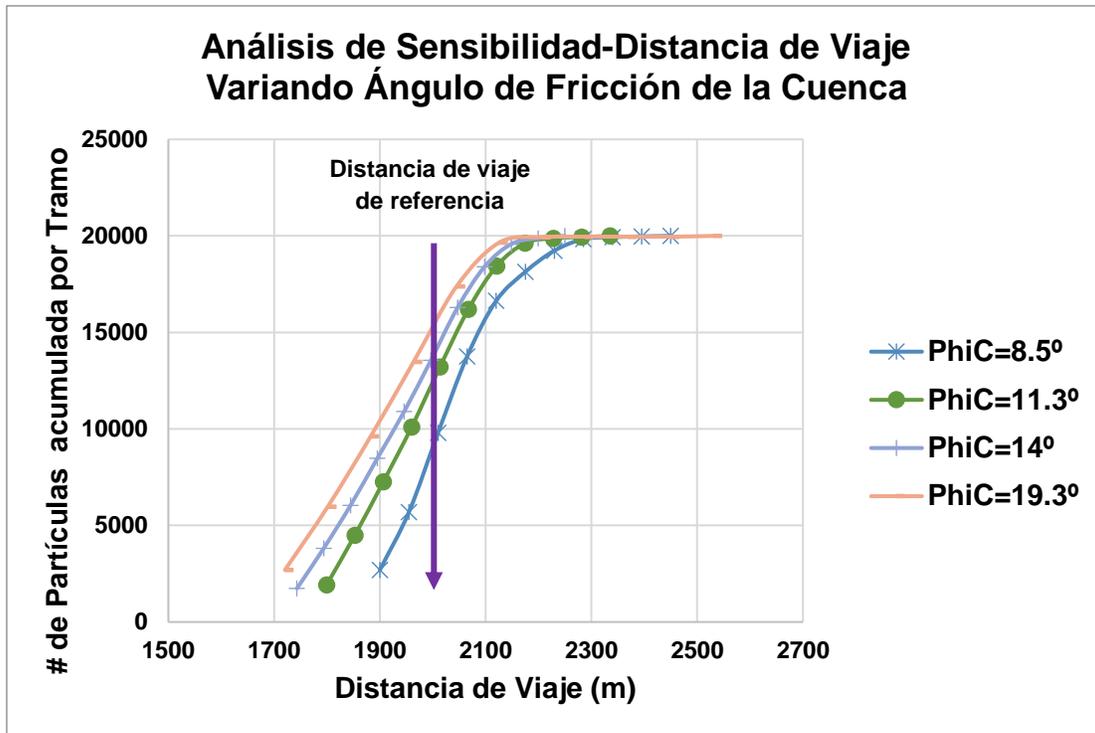


Figura 7-14 Análisis de Sensibilidad-Distancia de viaje variando Fricción de superficie (cuenca).

Eje Vertical: Número de partículas acumuladas por tramo

Fuente: Autor

7.6 Validación del modelo frente al evento real

En las gráficas anteriores, solo observamos un comportamiento en el tramo específico de 2000 a 2100 metros, primero teniendo en cuenta el número de partículas rezagadas y luego el número de partículas con una alta velocidad.

Para la correcta validación frente al evento real, con los análisis de sensibilidad realizados, se evaluó el volumen para cada parámetro y fueron escogidos los finales con el fin de evaluar la intervención de las estructuras transversales.

El volumen que se requiere llegar es 200.000m³ en los 2.0km que se han elegido, de acuerdo con lo explicado anteriormente. Dado esto, se valida que los valores escogidos anteriormente se acerquen al volumen designado y dentro del código se contabiliza las partículas desde ciertos puntos para poder así medir el volumen que se obtiene. A continuación, serán detallados para cada parámetro la contabilización de los volúmenes entre las abscisas que se han tenido en cuenta en el código.

Para Ángulo de Fricción de las partículas:

El volumen fue medido para las abscisas superiores a 1924 m, evidenciado en la *Tabla 7-4*. Para el ángulo de fricción de las partículas al ser el parámetro más homogéneo en resultados se elige el parámetro más cercano a los ensayos realizados (*Figura 7-15*) por el Consorcio Inypsa et al. (2018), en los estudios dado que los parámetros analizados tienen un comportamiento bastante similar.

Ángulo de Fricción de Partículas (°)	Volumen acumulado después de los 2000m (m³)
11.3	195,645
16.7	192,345
21.8	190,504
26.6	184,393

Tabla 7-4 Volumen entre abscisas 1924 a >2000 m para Parámetro Fricción de partículas(°).

Fuente: Autor

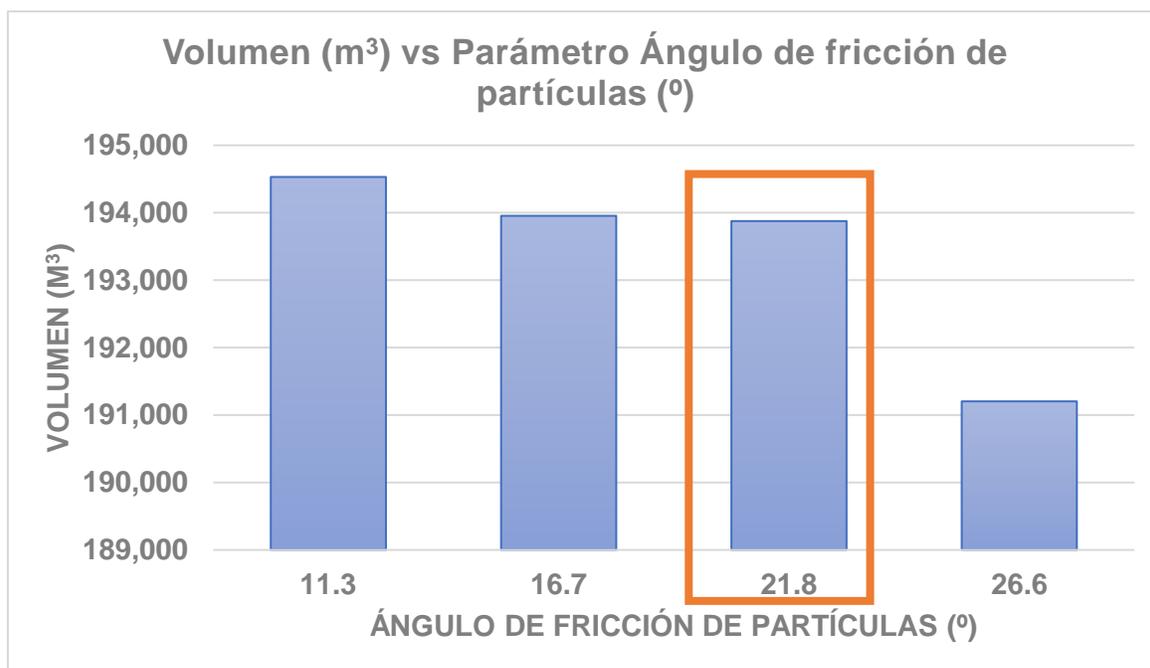


Figura 7-15 Volumen entre abscisas 1924 a >2000 m para Parámetro Fricción de partículas(°).

Fuente: Autor

Para Módulo de Elasticidad en las partículas:

Para este caso, el volumen fue medido entre las abscisas 1870 m y valores mayores a 2000 m evidenciados en la *Tabla 7-5*, en la cual se evidencia el mejor comportamiento para las partículas con el Módulo de 6.50×10^5 Pa (*Figura 7-16*).

E (Módulo de Young) Pa	Volumen (m ³) acumulado después de los 2000m
6.50×10^5	201,573
7.00×10^6	169,322
1.70×10^7	136,667
2.70×10^7	137,675

Tabla 7-5 Volumen entre abscisas 1870 a >2000 m para Parámetro E(Pa) de las partículas.

Fuente: Autor

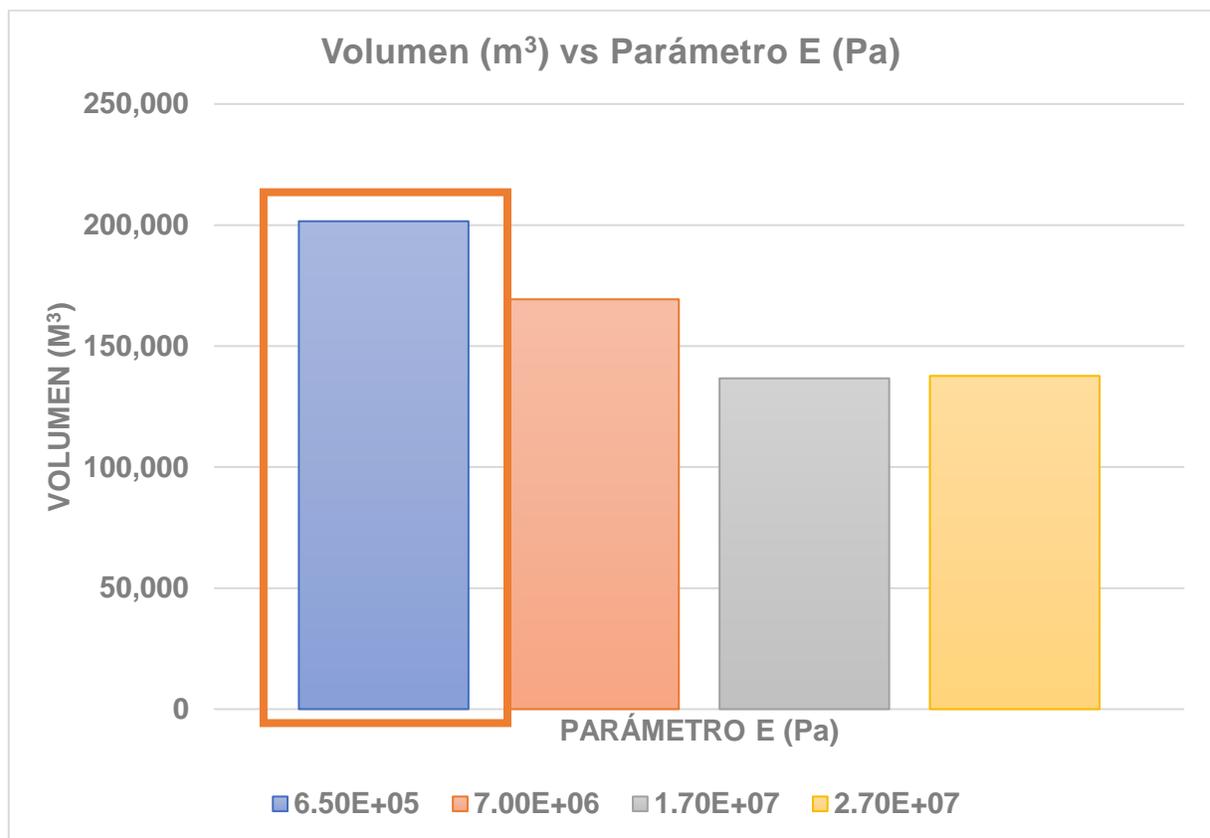


Figura 7-16 Volumen entre abscisas 1870 a >2000 m para Parámetro E(Pa) de las partículas.

Fuente: Propia

Para Ángulo de Fricción de la superficie (cuenca):

Para este caso, el volumen fue medido entre las abscisas 1886 m a las mayores a 2000 m, en la cual se evidencia el mejor comportamiento para el deslizamiento de las partículas sobre la cuenca con un ángulo de fricción de: 11.3° (Tabla 7-6 y Figura 7-17).

Ángulo de Fricción de Partículas (°)	Volumen acumulado después de los 2000m (m³)
8.5	150,679
11.3	190,504
14	121,383
19.3	109,371

Tabla 7-6 Volumen entre abscisas 1886 a >2000 m para Parámetro Fricción de Cuenca(°).

Fuente: Autor

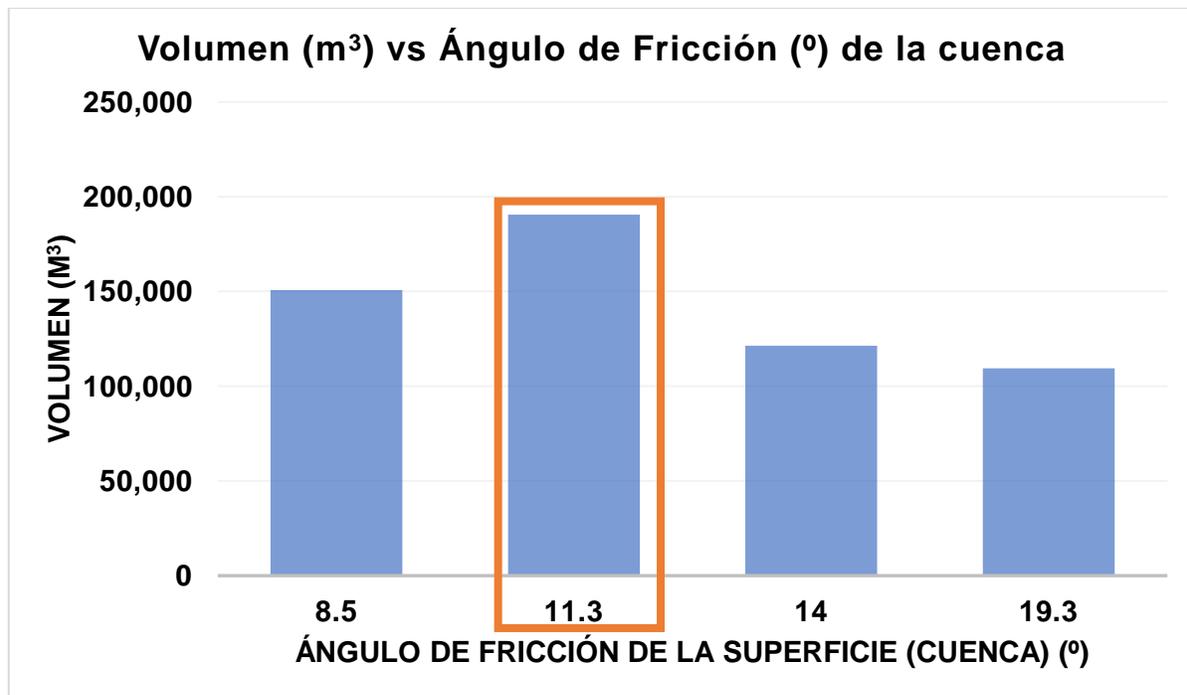


Figura 7-17 Volumen entre abscisas 1886 a >2000 m para Parámetro Fricción de Cuenca(°).

Fuente: Autor

7.7 Modelo final escogido

De acuerdo con el Análisis de Sensibilidad realizado anteriormente, los valores seleccionados para la simulación numérica del flujo son los siguientes:

A. Parámetros de las partículas:

- Coeficiente de fricción: 0.4
- Módulo de elasticidad (E): 6.50×10^5 Pa
- Relación de Poisson: 0.50
- Densidad: 2650 kg/m^3

B. Parámetros de la superficie de deslizamiento:

- Coeficiente de fricción: 0.2
- Módulo de elasticidad (E): 3.00×10^9 Pa
- Relación de Poisson: 0.25

C. Otros Parámetros numéricos:

- Coeficiente de amortiguamiento: 0.4

Estos valores seleccionados, respaldados por el análisis de sensibilidad en cuanto a la distancia de viaje, concuerdan con los hallazgos previamente investigados en la literatura (González Vallejo, 2002), (Barton et al., 1974) (Consortio Inypsa et al., 2018) y (Goodman, 1989)).

Con estos valores elegidos, se procede a realizar las siguientes simulaciones variando la posición de las Barreras y evaluando el efecto que hace la imposición de cada una de ellas sobre el recorrido.

7.8 Simulación del evento con intervención de Barreras

Después de haber elegido los parámetros mecánicos de los materiales tanto de partículas como de la superficie, se realizan las intervenciones colocando paredes simulando Barreras transversalmente sobre el movimiento de los detritos en diferentes posiciones (*Figura 7-18*). Para ello son utilizados los códigos detallados en los Anexo B, Anexo C, Anexo D y Anexo E.

Dentro del código, estas barreras son del tipo Facet, para lo cual se consideran ciertos parámetros, incluido el módulo de Young, un parámetro que será variable más adelante una vez se seleccione la posición ideal para este deslizamiento de detritos modelado.

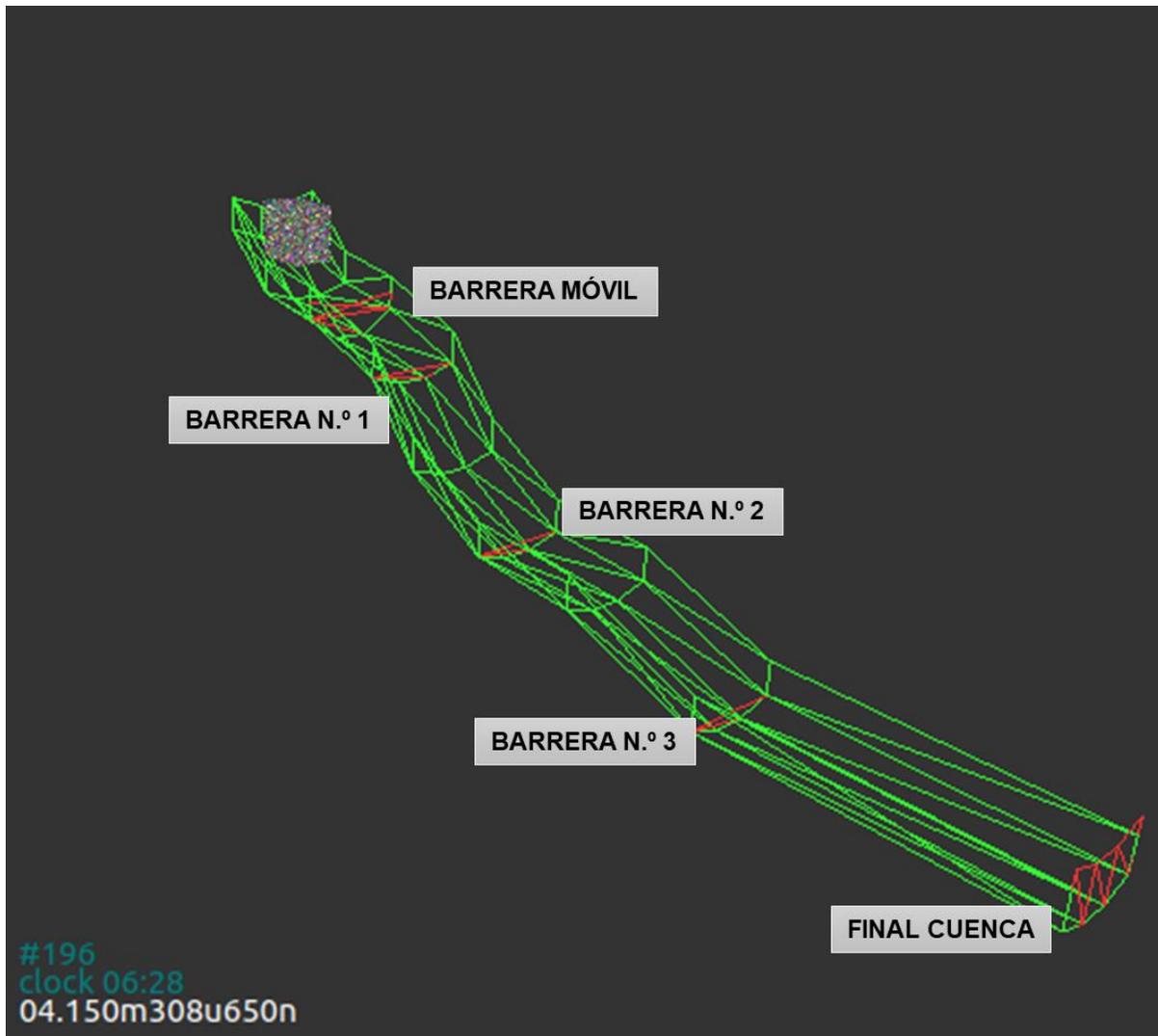


Figura 7-18 Posición de las Barreras perpendicularmente propuestas al movimiento de detritos.

Fuente: Autor

7.8.1 Descripción General de parámetros físicos y mecánicos para las barreras:

Para efectos de la simulación y de los modelos en este trabajo, en el Yade como bien es mencionado en el capítulo 5, sección 5.4 se analizan cuerpos que pueden ser esferas que representan los sedimentos del flujo y cuerpos que restringen los movimientos en este caso las barreras, para las cuales se utilizaron elementos tipo Facet, elementos planos que las partículas

no pueden traspasar. Estos cuerpos son analizados dentro de la presente investigación, se calculan fuerzas y desplazamientos estudiando el efecto que ejercen las partículas sobre ellos.

Para ello para los cuerpos tipo Facet en este caso las barreras, es necesario definir características para el estudio que se requiere realizar. Los parámetros para las barreras son: Módulo de elasticidad, relación de Poisson, densidad y el ángulo de fricción. A continuación, se presentan los valores asumidos para estos parámetros:

- Ángulo de fricción: 50°
- Módulo de elasticidad (E): 3.00×10^8 Pa
- Relación de poisson: 0.3
- Densidad: 2.650 kg/m^3

Estos datos, son utilizados inicialmente y tomados como si tuviéramos una pared conformada por un material granular con una alta rigidez. Los parámetros en general son valores referencia tomados de la investigación aportada por (Dos Santos Junior, 2018), donde se evaluó numéricamente la influencia de jaulas metálicas con material granular en su interior (tipo gaviones). En dicha investigación, los valores utilizados para el módulo de elasticidad variaron entre 6×10^7 y 13.10×10^{10} Pa. Se ha optado por un valor intermedio en este estudio con la intención de investigar más a fondo la influencia de estos valores en etapas posteriores. No obstante, cabe destacar que en este caso no se ha analizado la estructura como un elemento en 3D; simplemente se han asignado propiedades a la estructura plana tipo Facet para simular la implementación de este tipo de estructuras.

7.8.2 Efecto de intervención de Barrera 1:

La barrera 1, está ubicada a 717 metros desde el inicio de la superficie. (*Figura 7-19-A*) Se ubicó antes de la mayor pendiente que se tiene dentro del recorrido con el fin de evaluarla, sabiendo algunas restricciones que esto traería constructivamente en el caso real, puesto que dificultaría los trabajos en alturas muy elevadas. En la simulación realizada se evidenció otro factor y es que está la posibilidad que las partículas sobrepasen la altura de la barrera, algo que no mitigaría en su totalidad los detritos y nos conllevaría a proponer algunas otras. (*Figura 7-19-B*)

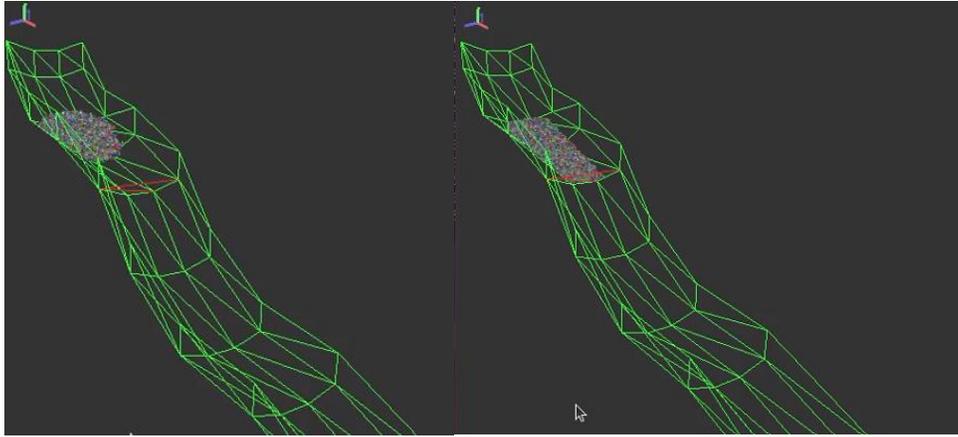


Figura 7-19 (A) Posición de la Barrera 1 en la superficie, (B) Movimiento de Partículas sobre la Barrera 1 en la superficie.

Fuente: Autor

En cada análisis de la disposición de las barreras, se generaron gráficos para entender las fuerzas de impacto que alcanzarían cada una, así como la energía cinética de las partículas hasta el momento en que impactan con la barrera. El código (Anexo B) fue diseñado para calcular la Fuerza de Impacto versus el número de ciclos, entendidos como una medida de tiempo, a medida que los detritos caen, y el código termina de ejecutarse cuando las partículas alcanzan la estabilización, es decir, cuando sus velocidades son mínimas. Además, se calculó la energía cinética en cada escenario. En este estudio, la Fuerza de Impacto se considera como una fuerza por unidad de área.

En el caso de la Barrera 1 (B1) (*Figura 7-20*), se observa un número reducido de ciclos en comparación con las otras barreras (cuyos resultados se presentarán posteriormente). Esta diferencia se atribuye a que la barrera se encuentra al inicio del recorrido de las partículas. Así, cuando las partículas alcanzan la barrera y esta estructura reduce su movimiento, disminuyendo las velocidades, el código se detiene y genera los resultados como una fuerza por unidad de área.

Las fuerzas de impacto iniciales se pueden tener desde los 2000 ciclos con magnitudes de 5000 kN/m^2 , allí va aumentando hasta llegar a los $4.50 \text{ E } 4 \text{ kN/m}^2$ a los 3600 ciclos representado en la *Figura 7-20*.

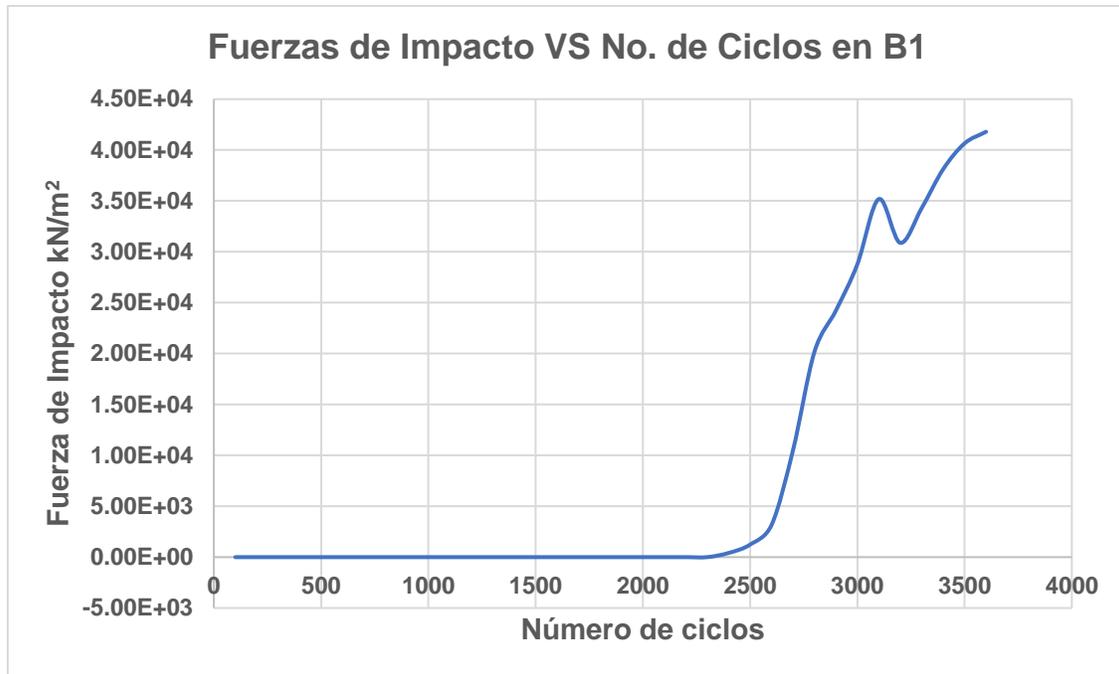


Figura 7-20 Fuerza de Impacto en la B1 vs el No. de ciclos

Fuente: Autor

En cuanto a la energía cinética de las partículas representado en la *Figura 7-21* hay una reducción significativa de la energía cinética en los detritos cuando estos impactan con la barrera. En otras palabras, a medida que la barrera retiene las partículas, la energía cinética disminuye, permitiendo detener completamente o mitigar el efecto. En este caso específico, la energía se reduce considerablemente en aproximadamente 200 ciclos.

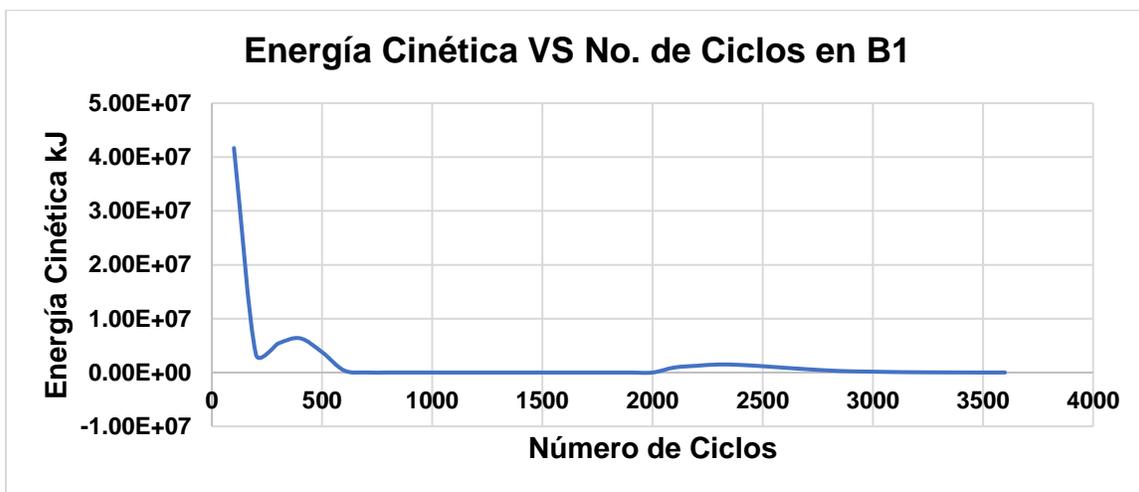


Figura 7-21 Energía Cinética en la B1 vs el No. de ciclos

Fuente: Autor

7.8.3 Efecto de intervención de Barrera 2:

La barrera 2, está ubicada a 1207 metros desde el inicio de la superficie. (*Figura 7-22-A*) Se ubicó la barrera justo después de la pendiente más pronunciada en el trayecto con el propósito de evaluarla, ya que se anticipaba que en este tramo se encontrarían las mayores energías de las partículas. Sin embargo, debido a estas altas energías, similar a lo observado en la Barrera 1, las partículas logran superar la altura de la barrera, pero con una energía aún mayor. Esto implica que la barrera no sería completamente efectiva en mitigar los detritos, por lo que sería necesario considerar otras alternativas. (*Figura 7-22-B*)

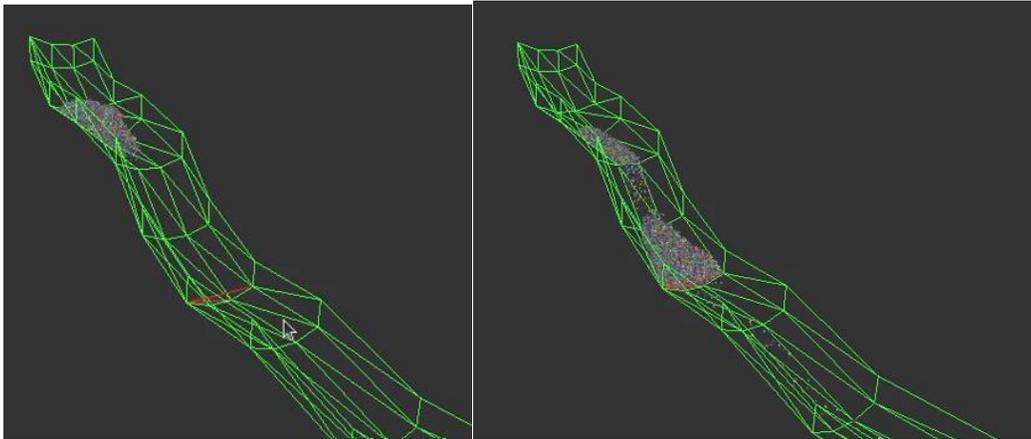


Figura 7-22 (A) Posición de la Barrera 2 en la superficie, (B) Movimiento de Partículas sobre la Barrera 2 en la superficie.

Fuente: Autor

El código para este caso (Anexo C) fue diseñado para calcular la Fuerza de Impacto versus el número de ciclos, entendidos como una medida de tiempo, a medida que los detritos caen, y el código termina de ejecutarse cuando las partículas alcanzan la estabilización, es decir, cuando sus velocidades son mínimas. Además, se calculó la energía cinética en cada escenario. En este estudio, la Fuerza de Impacto se considera como una fuerza por unidad de área.

Para el caso Barrera 2 (B2) (*Figura 7-23*), se observa un número de ciclos significativamente mayor en comparación con la Barrera 1 (B1), cerca de 10 veces más. Esta diferencia se atribuye al hecho de que la Barrera 2 se posiciona en la mitad del trayecto de las partículas, lo que implica que el código requiere más tiempo para recopilar información a medida que las partículas impactan con la barrera y esta reduce su movimiento, disminuyendo las velocidades y generando los resultados para su análisis.

Las fuerzas de impacto iniciales se pueden tener desde los 2000 ciclos con magnitudes de $1 \text{ E } 4 \text{ kN/m}^2$, allí va aumentando hasta llegar a los $2.25 \text{ E } 5 \text{ kN/m}^2$ a los 65000 ciclos.

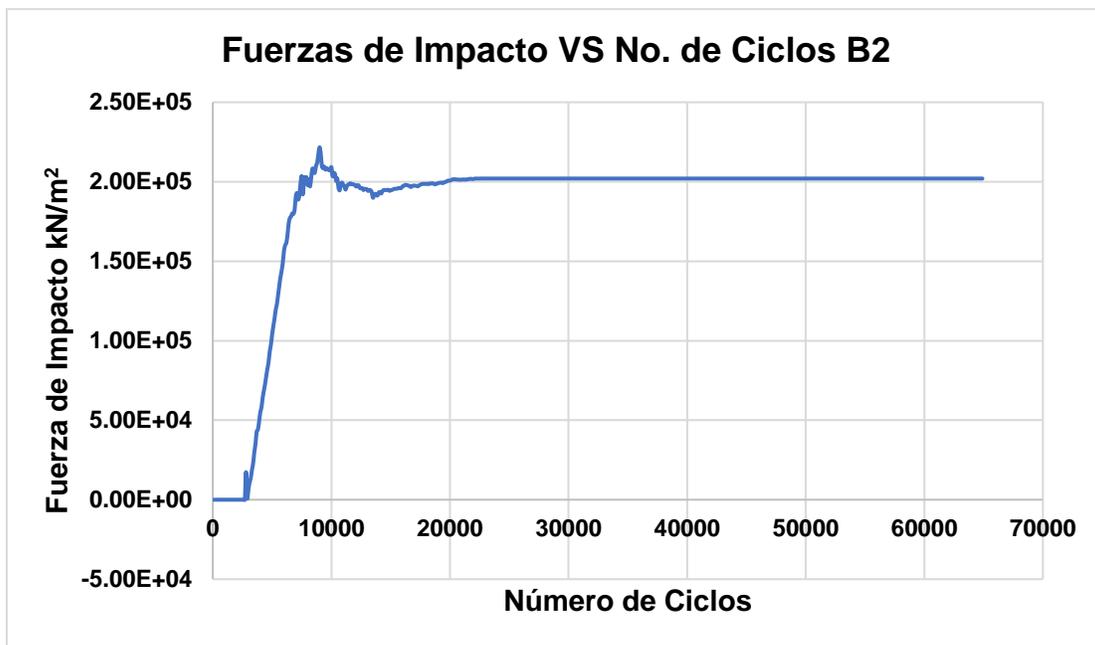


Figura 7-23 Fuerza de Impacto en la B2 vs el No. de ciclos

Fuente: Autor

En lo que respecta a la energía cinética representada en la *Figura 7-24* de las partículas, se observa una reducción notable cuando estas impactan contra la barrera. Esto indica que a medida que la barrera retiene las partículas, la energía cinética en los detritos disminuye lo suficiente como para detener por completo o mitigar el efecto. En este caso particular, la energía se reduce aproximadamente en los primeros 2000 ciclos y muestra una magnitud inferior en comparación con las obtenidas en la Barrera 1.

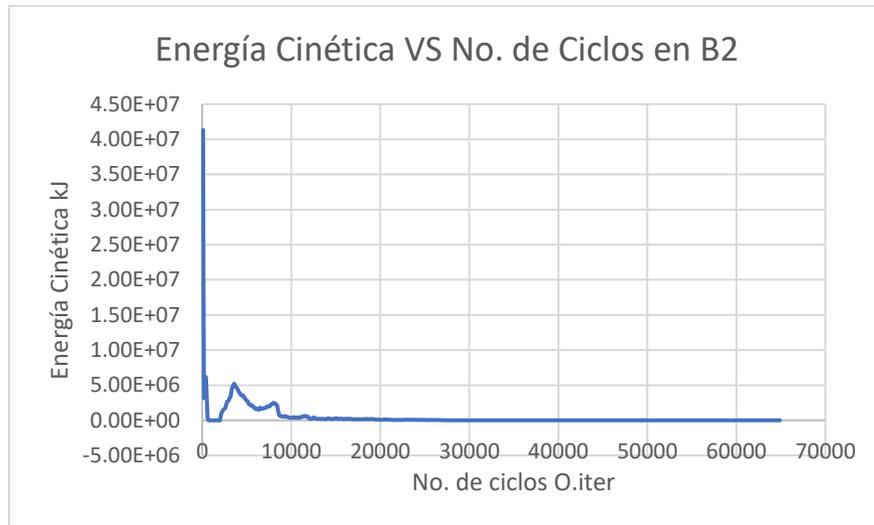


Figura 7-24 Energía Cinética en la B2 vs el No. de ciclos

Fuente: Autor

7.8.4 Efecto de intervención de Barrera 3:

La barrera 3, está ubicada a 2014 metros desde el inicio de la superficie. (Figura 7-25-A). Fue ubicada al final del recorrido con el propósito de evaluar las fuerzas que alcanzan ese punto, anticipando que las mayores energías de las partículas se concentrarían en el tramo anterior y podrían disiparse en el trayecto debido a los cambios de pendiente. En este escenario, solo un pequeño número de partículas logra superar las barreras, mitigando completamente el evento; no obstante, las fuerzas obtenidas son considerablemente elevadas. (Figura 7-25-B)

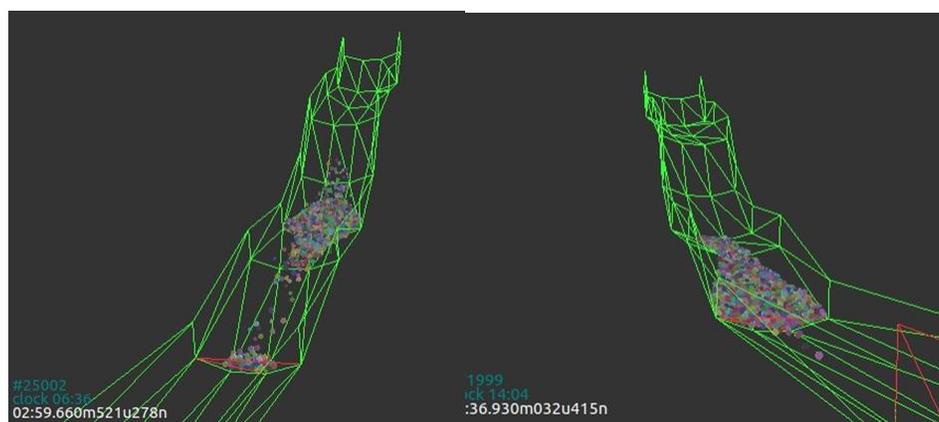


Figura 7-25 (A) Posición de la Barrera 3 en la superficie, (B) Movimiento de Partículas sobre la Barrera 3 en la superficie.

Fuente: Autor

El código, en este caso detallado en el Anexo D, fue escrito para que calcule la Fuerza de Impacto versus el número de ciclos, entendidos como una medida de tiempo, a medida que los detritos caen, y el código termina de ejecutarse cuando las partículas alcanzan la estabilización, es decir, cuando sus velocidades son mínimas. Además, se calculó la energía cinética en cada escenario. En este estudio, la Fuerza de Impacto se considera como una fuerza por unidad de área.

Para el caso Barrera 3 (B3) (*Figura 7-26*), se observa un número de ciclos mayor en comparación con la Barrera 1 (B1) y similar al de la Barrera 2 (B2). Esto se debe a que la barrera se ubica al final del trayecto de las partículas, lo que implica que el código requiere más tiempo para recopilar información mientras las partículas impactan con la barrera y esta reduce su movimiento, disminuyendo las velocidades y generando los resultados para su análisis.

Las fuerzas de impacto iniciales se pueden tener desde los 500 ciclos con magnitudes de $1 \text{ E } 4 \text{ kN/m}^2$, allí va aumentando hasta llegar a los $5.8 \text{ E } 4 \text{ kN/m}^2$ a los 42000 ciclos.

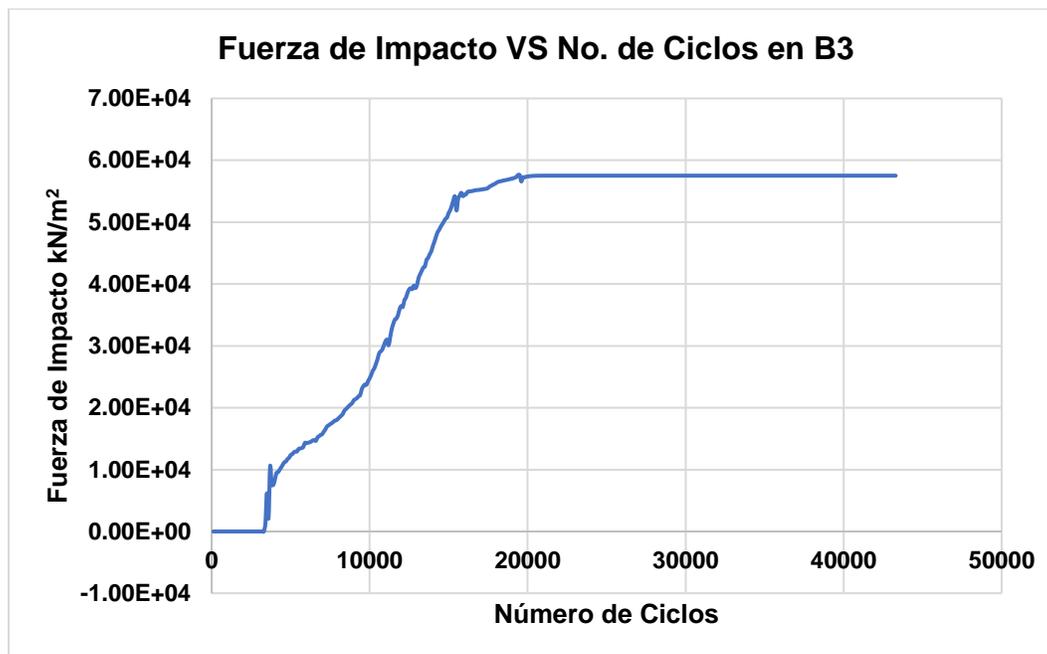


Figura 7-26 Fuerza de Impacto en la B3 vs el No. de ciclos

Fuente: Autor

En lo que respecta a la energía cinética de las partículas representada en la *Figura 7-27*, se evidencia una reducción cuando estas entran en contacto con la barrera, así como en los casos anteriores. Esto significa que a medida que la barrera retiene las partículas, la

energía cinética en los detritos disminuye lo suficiente como para detener por completo o atenuar el efecto. En este caso en particular, la energía se reduce aproximadamente en los primeros 500 ciclos y presenta una magnitud inferior en comparación con las obtenidas en la Barrera 1.

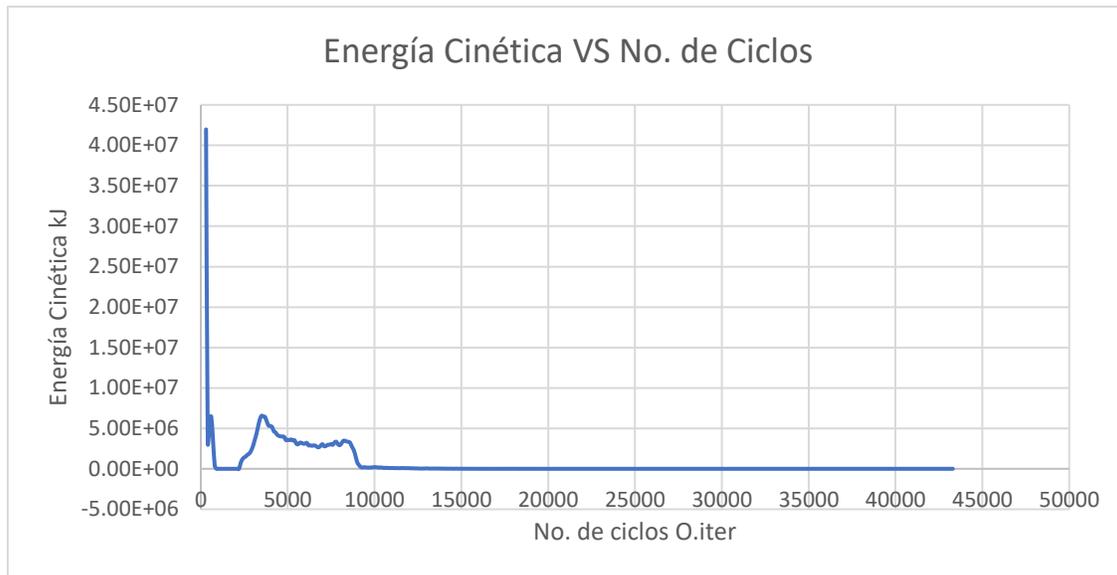


Figura 7-27 Energía Cinética en la B3 vs el No. de ciclos

Fuente: Autor

7.8.5 Efecto de intervención de Barrera 2 y 3:

Se lleva a cabo una última simulación modificando las posiciones de las barreras con el fin de obtener resultados y evaluar la opción más efectiva. Por esta razón, se inicia revisando la fuerza de impacto en las barreras, colocando simultáneamente los datos en una única gráfica para explorar otras alternativas.

En la *Figura 7-28*, Se registran las fuerzas de impacto en cada una de las barreras en función del número de ciclos ejecutados en las simulaciones. Se observa claramente que las Barreras 2 y 3 son las que experimentan las fuerzas de impacto más elevadas, requiriendo un mayor número de ciclos para que el código logre equilibrar las fuerzas a niveles mínimos.

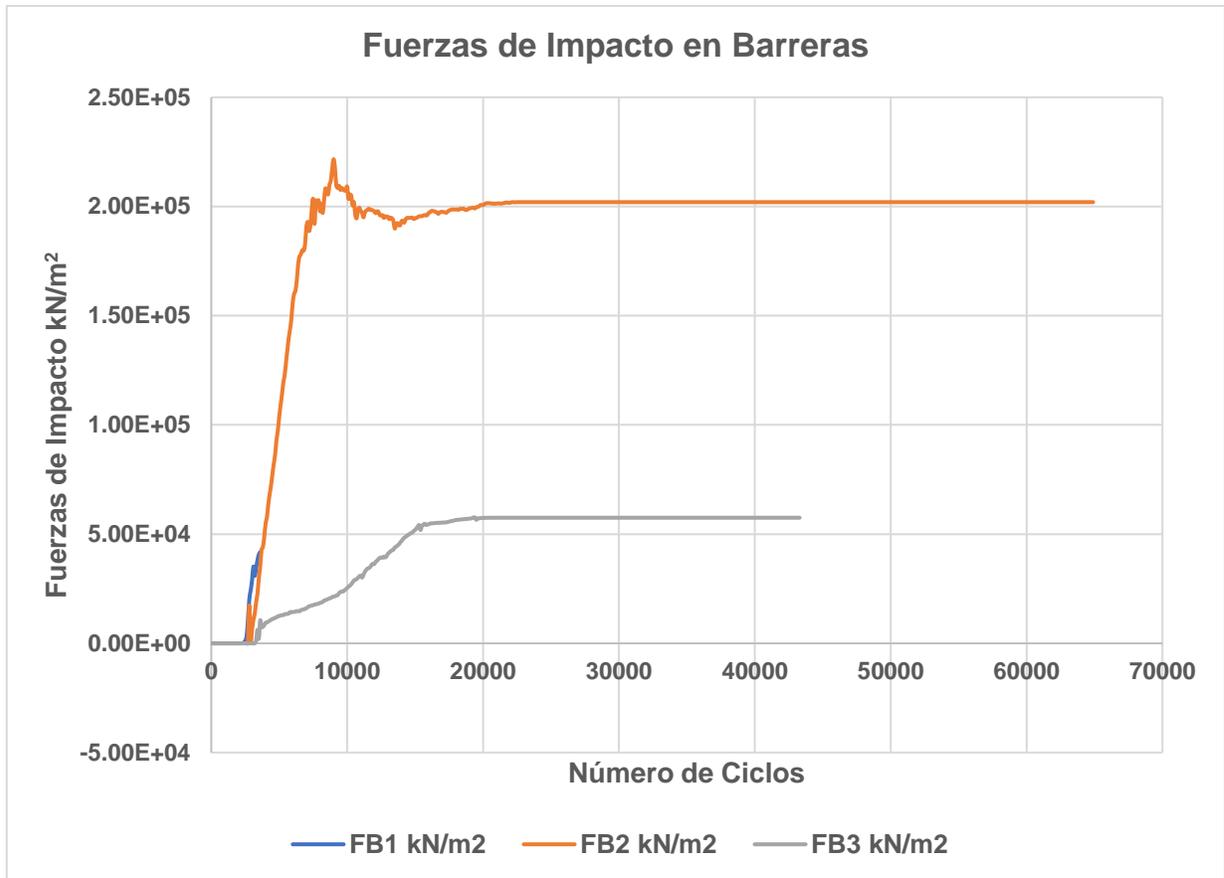


Figura 7-28 Comparación de las Fuerzas de Impacto en las tres Barreras si vs el Número de ciclos

Fuente: Propia

No obstante, considerando que la construcción de la Barrera 1 presenta dificultades y que un número considerable de partículas supera su altura, se evaluó la opción de posicionar dos barreras para mitigar el movimiento de las partículas. En este escenario, se contempla colocar la Barrera 2 a 1207 metros y la Barrera 3 a 2014 metros, calculados desde el inicio de la superficie (Figura 7-29).

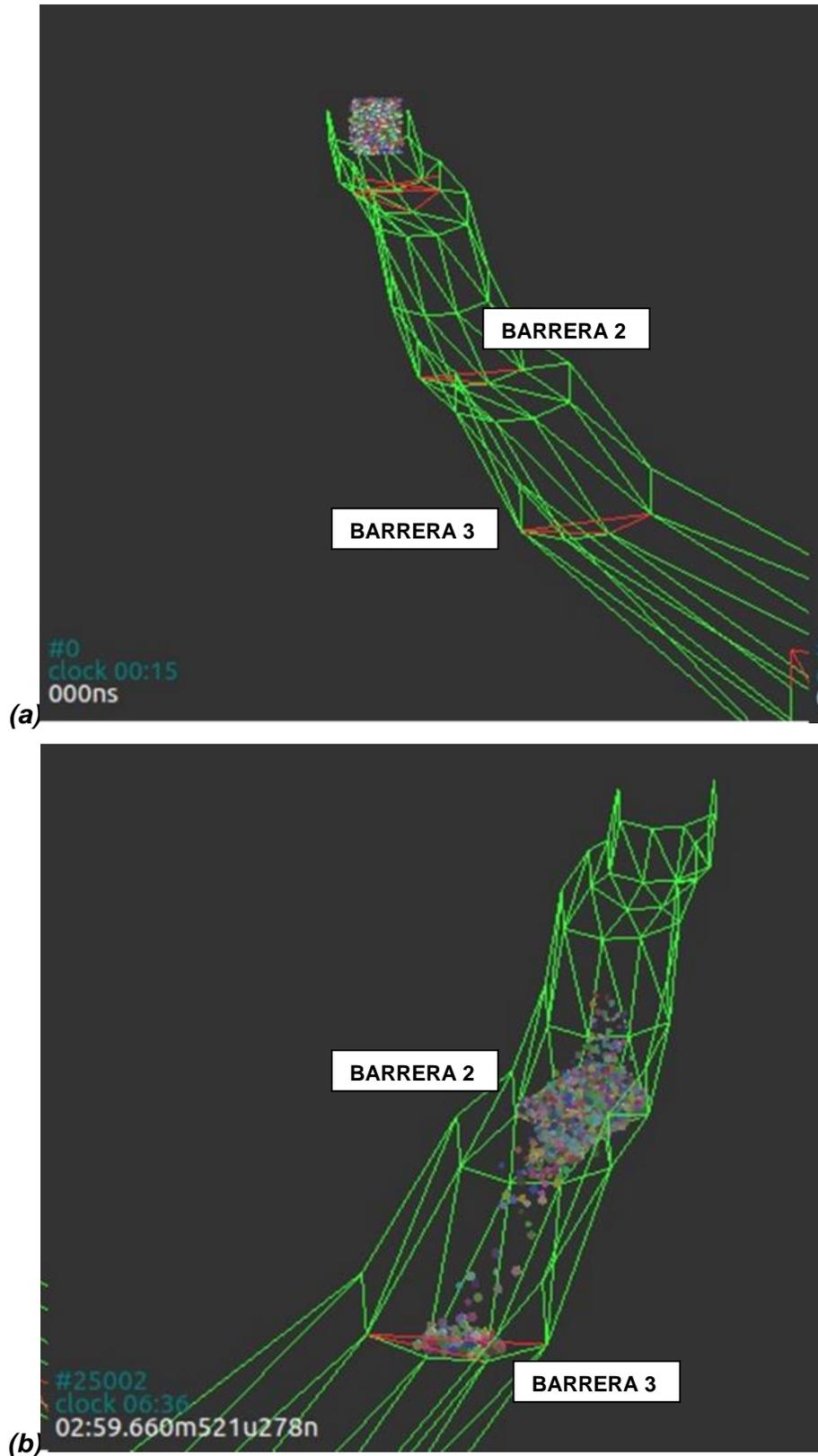


Figura 7-29 Posicionamiento de las Barreras 2 y 3 (a) sin flujo y (b) en el curso del flujo

Fuente: Autor

Se evidencia en la *Figura 7-30*, que la Barrera 2 deberá soportar la fuerza de impacto más significativa, dado el cambio de pendiente que se encuentra inmediatamente detrás de su posición. Sin embargo, a pesar de este desafío, la Barrera 2 contribuye de manera efectiva a mitigar y reducir la energía de las partículas. Así, las partículas que logran superarla en altura son detenidas completamente por la Barrera 3, aunque en menor proporción debido a las magnitudes de impacto que cada una de ellas detiene.

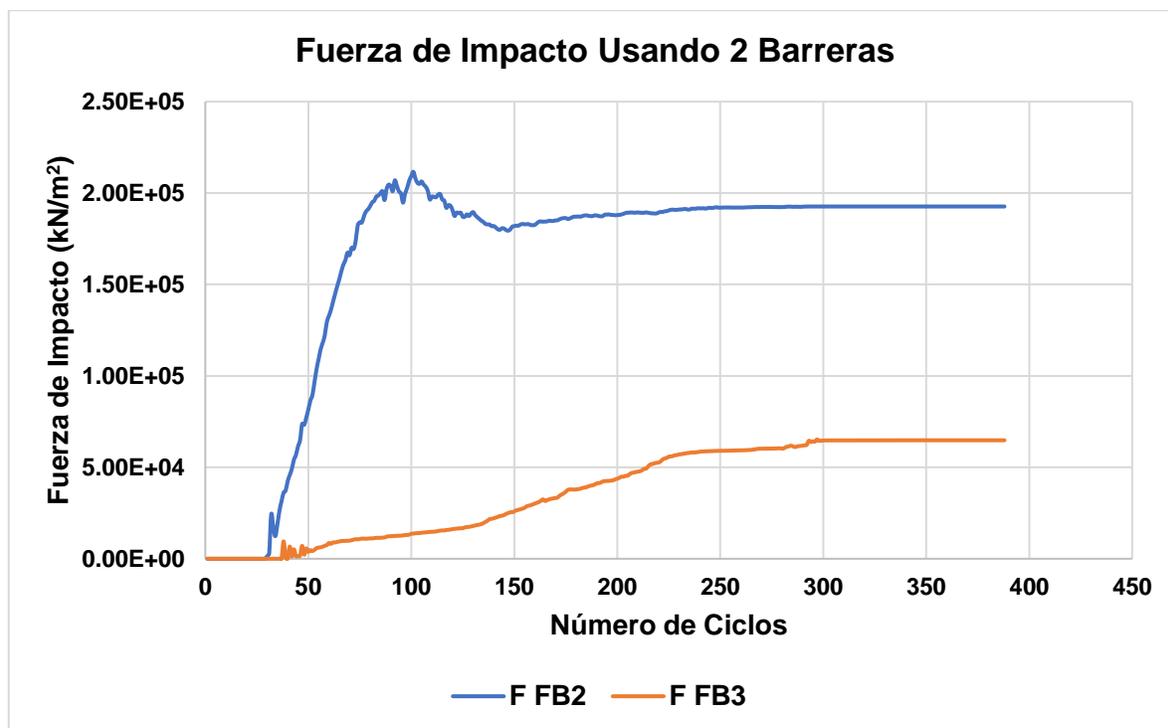


Figura 7-30 Fuerza de Impacto proponiendo las 2 Barreras B2 y B3.

Fuente: Autor

7.9 Elección de barreras

Con base en los resultados de impacto en cada una de las barreras y al realizar las evaluaciones correspondientes para mitigar y detener de manera efectiva las partículas, evitando que lleguen aguas abajo de la cuenca, se sugiere la utilización conjunta de las Barreras 2 y 3. Esta elección se fundamenta en la idoneidad de la zona para la construcción, caracterizada por pendientes más reducidas que facilitan el transporte de materiales y personal. Además, esta opción permite combinar diversas geometrías con el objetivo de disminuir el riesgo de manera integral.

Al optar por esta estrategia de mitigación, se procederá a examinar el impacto de variar la rigidez de las barreras mediante cuatro simulaciones, llevando a cabo un análisis de sensibilidad.

7.10 Simulación y efecto de variación de rigidez en las barreras

Para determinar qué impacto tiene la rigidez de las barreras sobre el flujo se varía el módulo de Young dentro de los materiales especificados para las barreras.

Como es mencionado en el capítulo anterior los parámetros utilizados para las barreras son tomados como si tuviéramos una pared conformada por un material granular con una alta rigidez. Los parámetros en general son valores referencia tomados de la investigación aportada por (Dos Santos Junior, 2018), donde se evaluó numéricamente la influencia de jaulas metálicas con material granular en su interior. La variabilidad buscada está en los rangos propuestos en su investigación, teniendo variabilidad entre: 6×10^7 y 13.10×10^{10} Pa. Así mismo estos valores de Módulo fueron tomados teniendo en cuenta que las barreras fueran constituidas con material pétreo como lo son las piedras, así que se han tomado valores referencia de Piedra Caliza, las cuales pueden estar en un rango aproximado entre 1.5 a 9.0×10^7 Pa de acuerdo con Gonzalez de Vallejo (2002).

De acuerdo con esto se modela y se ejecuta el código con tres valores de Módulo de Young:

- $E=2.5 \times 10^7$ Pa
- $E=3.0 \times 10^8$ Pa
- $E=4.0 \times 10^8$ Pa

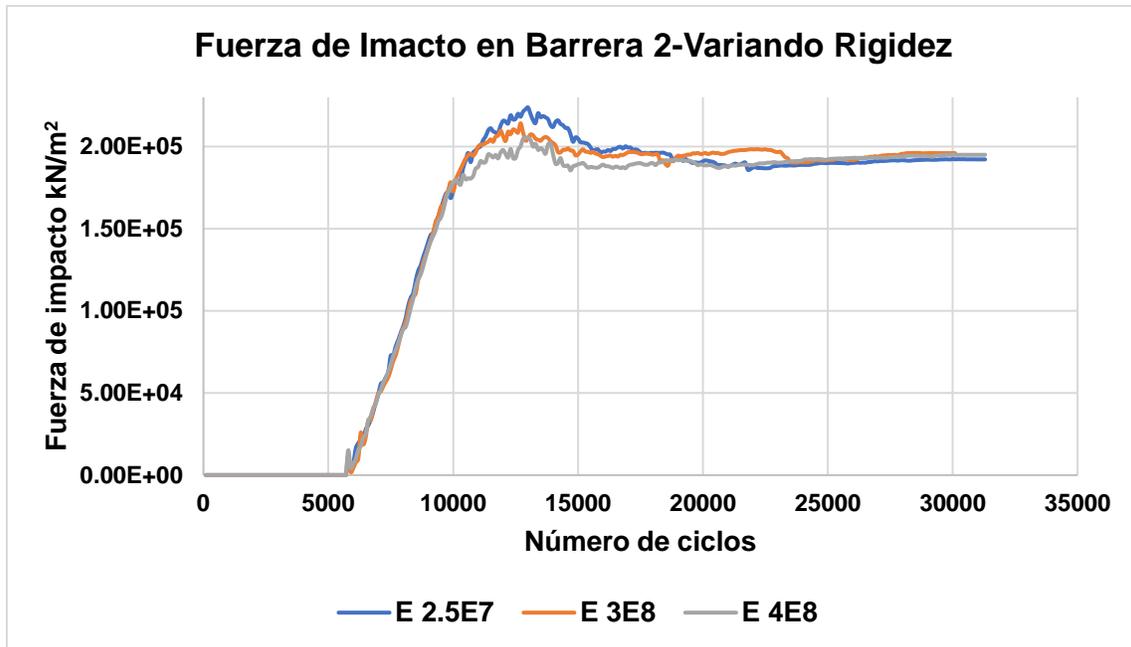


Figura 7-31 Fuerzas de Impacto en Barrera 2-Variando Rigidez VS Número de Ciclos. Valores de E en Pa.
Fuente: Autor

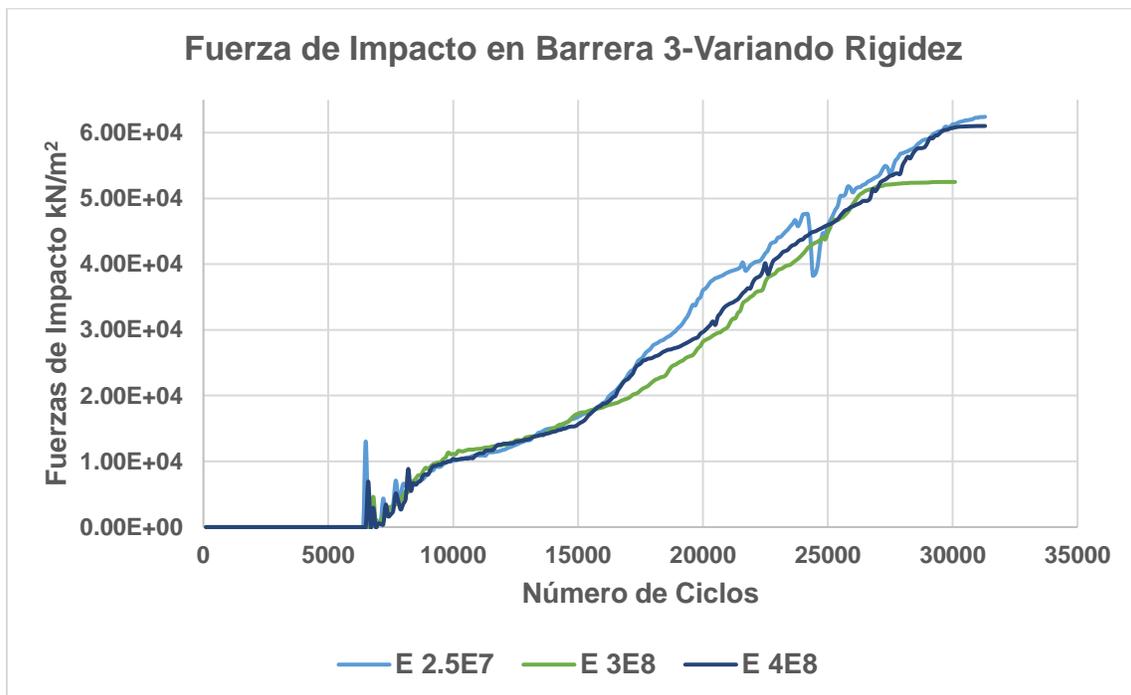


Figura 7-32 Fuerzas de Impacto en Barrera 3-Variando Rigidez VS No. de Ciclos. Valores de E en Pa.
Fuente: Autor

Al variar las rigideces en las barreras como se evidencia en las *Figura 7-31* y *Figura 7-32*, Las fuerzas de impacto son más intensas cuando la barrera tiene menor rigidez. Esta observación nos lleva a la conclusión de que, en presencia de una barrera menos rígida, las partículas no colisionan con una superficie rígida, evitando el efecto rebote que podría incrementar su velocidad y potencialmente ocasionar que rebasen la barrera. Esta dinámica se evidencia en ambas barreras, tanto en las fuerzas de impacto registradas en la Barrera 2 como en la Barrera 3.

Cuando se emplea un elemento flexible en general, este tiene la capacidad de absorber energía mediante su deformación, según la teoría. En este escenario, observamos que las fuerzas de impacto son más pronunciadas, indicando una acumulación mayor de detritos en las barreras de menor rigidez. A pesar de esto, la flexibilidad proporciona una mejor disipación del movimiento, evitando alteraciones significativas en la trayectoria de las partículas que podrían surgir debido a la rigidez al chocar con la superficie.

Las barreras flexibles han sido utilizadas en varios estudios realizados en la academia, en algunos han utilizado en sus investigaciones un sistema de “barreras de red de anillos”, con una serie de cables y anclajes (*Figura 7-33*), por otro lado, se ha optado por utilizar terrenos compactados, como terraplenes, donde la absorción de la energía generada por el impacto se disipa a través de la deformación del suelo, mostrando, en mi opinión, un comportamiento flexible. A lo largo de los años, las barreras con gaviones también han sido implementadas en las cuencas, siendo consideradas soluciones flexibles y de fácil construcción. Estas alternativas han demostrado un buen rendimiento frente a impactos.

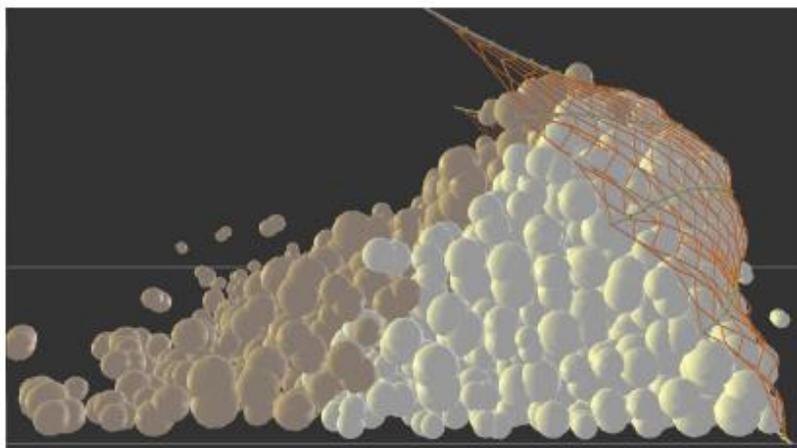


Figura 7-33 Red de Anillos como barrera flexible analizada por DEM.

Fuente: (Albaba, 2016)

Las barreras flexibles se destacan por su eficacia en la contención de flujos de escombros, gracias a su alta capacidad de deformación y permeabilidad al agua, como se indica en estudios como Guasti et al., (2011). En comparación con estructuras rígidas, estas barreras distribuyen la energía del impacto a lo largo de una duración mayor, lo que resulta en una reducción de la fuerza máxima del impacto, según hallazgos como los de Boetticher et al., (2011). Además, presentan ventajas adicionales como tiempos de construcción más cortos y facilidad de instalación, especialmente en terrenos de difícil acceso.

7.11 Simulación y efecto de variación de geometría en las barreras

Teniendo en cuenta que las estructuras iniciales simuladas simplemente han sido evaluadas para analizar la mejor posición en la que podrían mitigar de una manera más adecuada el flujo, hay otro factor que es importante evaluar en este tipo de estructuras y es su geometría.

Para las modelaciones a continuación se realiza el análisis con valores de Rigidez de 3×10^8 Pa.

Para las primeras evaluaciones se tuvieron en cuenta barreras (paredes) ajustadas a la cuenca de tal manera que estuvieran cubriendo a la totalidad el área transversal de ésta, con estas barreras fueron evaluadas las fuerzas de impacto, energías y así mismo la retención que podrían tener. En esta fase final, se realiza una evaluación de la opción seleccionada en términos de la disposición de las barreras, específicamente la Barrera 2 y 3, variando su altura.

Esto se lleva a cabo con el propósito de analizar la variabilidad que se presenta al utilizar estructuras de dimensiones más reducidas. Estos resultados servirán como base para un análisis más detallado, donde se podrán explorar diversas combinaciones tanto en altura como en posicionamiento de las barreras seleccionadas.

Se tuvieron en cuenta para la evaluación cuatro alturas diferentes, iguales para las dos barreras, se tuvieron en cuenta alturas de: 10, 15, 20 y 32 metros. Esta última altura de 32m fue la considerada en los anteriores análisis.

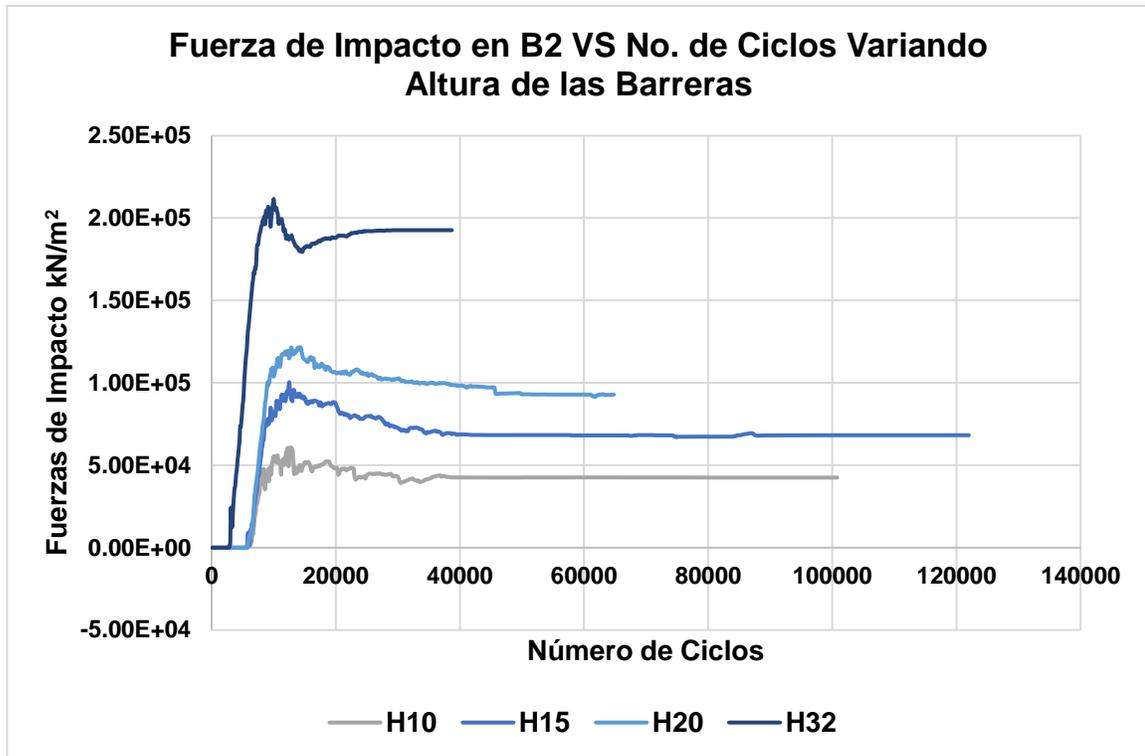


Figura 7-34 Fuerzas de Impacto en Barrera 2-Variando Alturas VS No. de Ciclos. Alturas H en m.

Fuente: Autor

Para la barrera 2, se puede evidenciar en la *Figura 7-34* que entre mayor sea la altura de la Barrera mayores fuerzas de impacto va a retener y así mismo menores número de ciclos requiere el código para mantener en equilibrio las partículas.

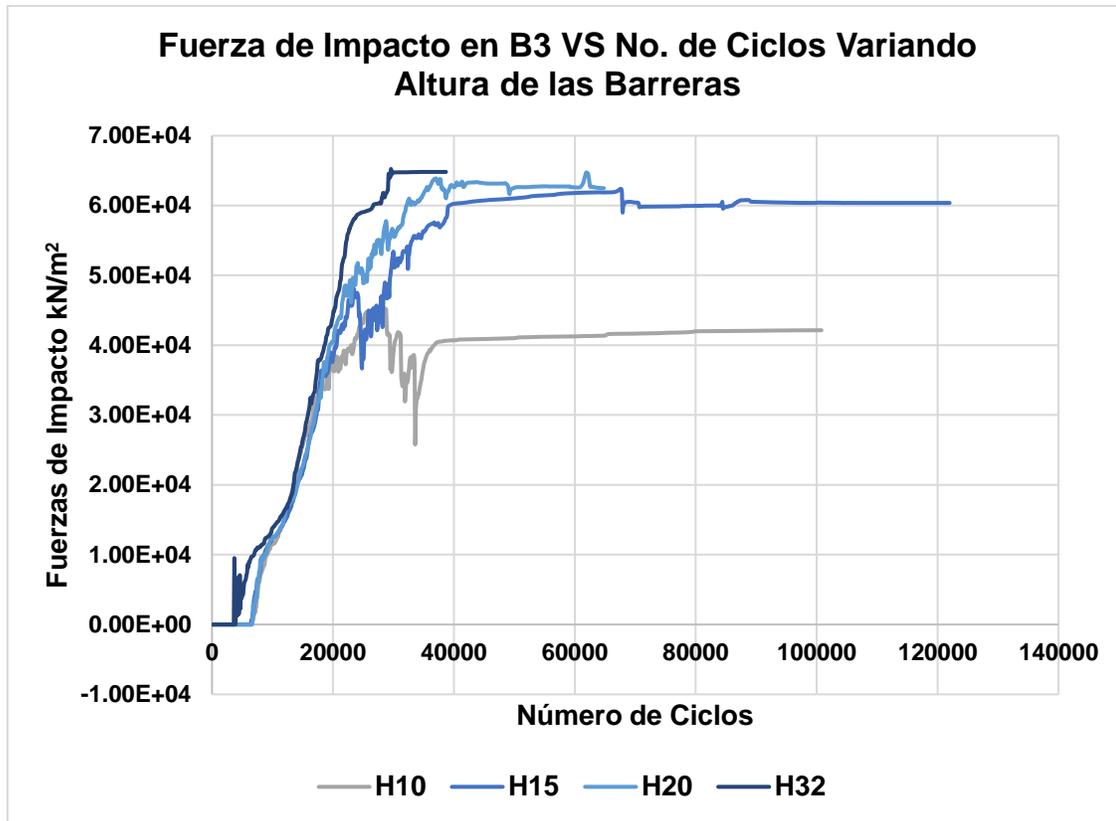


Figura 7-35 Fuerzas de Impacto en Barrera 3-Variando Alturas VS No. de Ciclos. Alturas H en m.

Fuente: Autor

Para la barrera 3, se puede evidenciar en la *Figura 7-35*, una situación muy similar a la presentada en la Barrera 2, sin embargo, las magnitudes no son tan diferentes dado que las mayores fuerzas son captadas en la Barrera 2 dado que es la primera en posición.

Se puede concluir que las barreras de mayor altura experimentarán fuerzas de impacto más elevadas, ya que retendrán un mayor volumen de partículas. Sin embargo, la construcción de una barrera de 32 metros de altura presenta desafíos significativos. El diseño de estructuras transversales debe considerar factores de seguridad geotécnicos cruciales, y las cargas transmitidas al suelo podrían no ser adecuadas. En última instancia, existe el riesgo de agregar peso adicional a la cuenca y, en resumen, de introducir material deslizable en la misma.

Es crucial considerar alturas que se ajusten al dimensionamiento, cumpliendo con los factores de seguridad establecidos por la geotecnia y siendo factibles desde el punto de vista constructivo. En este contexto, se observa que alturas de 10 metros tienden a capturar

la menor fuerza de impacto. A pesar de requerir un mayor número de ciclos para disipar y reducir la velocidad entre las partículas hasta alcanzar el equilibrio, teniendo en cuenta la influencia de ambas barreras, el tiempo necesario es mayor en comparación con otras alturas de barrera. No obstante, se logra con una estructura que es realizable tanto desde el punto de vista constructivo como de diseño geotécnico.

Así mismo, es posible considerar barreras de menor altura, siempre y cuando se aumente su número y se varíe su posición. El objetivo de este estudio es analizar el impacto de estas estructuras transversales y evaluar en qué medida pueden reducir los movimientos de este tipo.

7.12 Comparativos de modelo sin Flujo y modelo con la intervención de Barreras

En adición a los análisis previamente efectuados, respecto a los estudios de sensibilidad generados, el código se analiza finalmente en tres componentes. Primero, se aborda la disposición de las partículas (los detritos), seguido por la caída del material en la cuenca, regulada por la ley de gravedad y el contacto simple entre partículas. La tercera parte se enfoca en la intervención de las barreras para medir las fuerzas y energías manifestadas en el movimiento.

A continuación, se presenta una última gráfica en la que se muestra la energía cinética de las partículas del Flujo sin barreras (SB), y el flujo teniendo en cuenta los cuatro posicionamientos de las barreras consideradas: B1, B2, B3 y B2B3 (*Figura 7-36*).

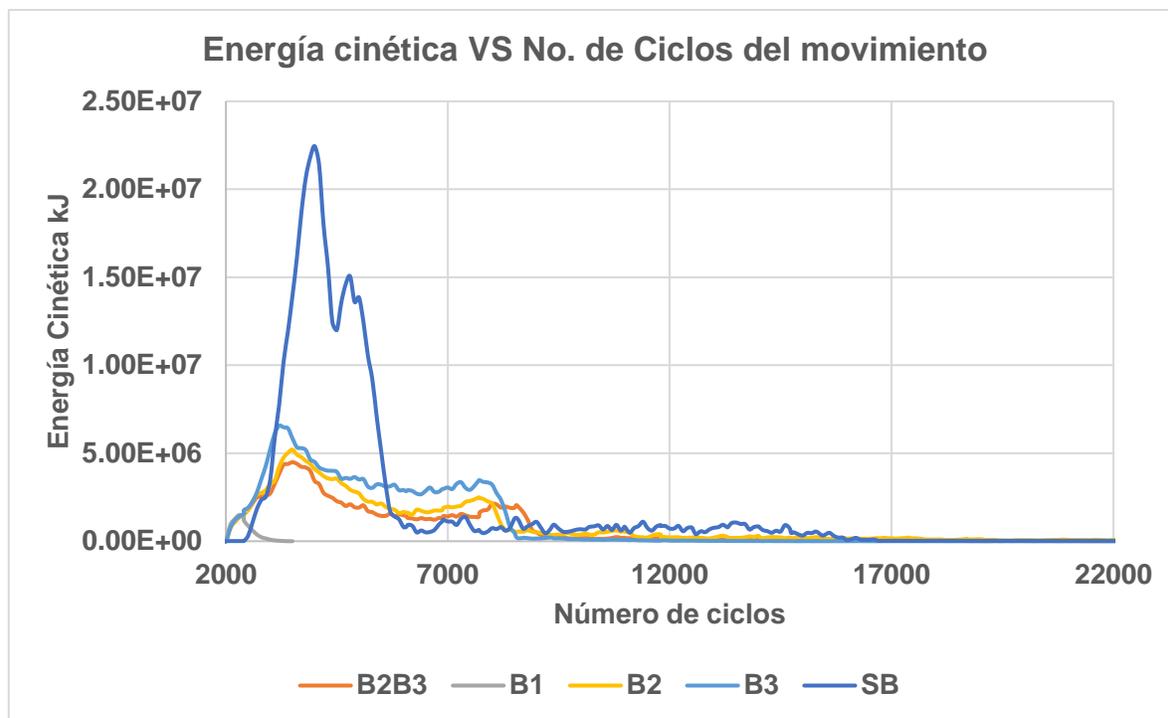


Figura 7-36 Evolución de la Energía Cinética a lo largo del trayecto del flujo de partículas durante ciclos de cálculo para diferentes sistemas de barreras: Sin Barreras (SB), B1, B2, B3 y B2B3.

Fuente: Autor

La energía cinética registrada durante el flujo de detritos a lo largo de la cuenca, sin la presencia de barreras (curva SB), alcanza su punto máximo específicamente en los 4000 número de ciclos (tiempo), como se observa en la *Figura 7-36*. Al introducir barreras transversales (casos de barreras B1, B2, B3 y B2B3), se evidencia una significativa disminución en la magnitud de la energía. Estas estructuras están diseñadas con el propósito de detener el movimiento de las partículas. Para comparar la eficacia en la disipación de la energía, la *Tabla 7-7* presenta los valores de energía cinética en cada caso analizado para el ciclo número 4100, junto con los porcentajes de reducción de energía con respecto a los valores máximos registrados en el movimiento sin intervención de barrera en dicho ciclo.

Intervención	Energía Cinética kJ	Porcentaje de Reducción (%) en el número de ciclo 4100
Sin barrera	2.14×10^7	
B1	0.00×10^00	Ya se había detenido
B2	3.91×10^6	82%
B3	4.20×10^6	80%
B2 y B3	3.25×10^6	85%

Tabla 7-7 Porcentaje de reducción en la energía cinética comparando el flujo sin intervención y con las 4 intervenciones.

Fuente: Autor

En el caso de la Barrera 1, no se observa una reducción de energía, ya que los ciclos determinados por el código para detener el flujo con la intervención de esta barrera fueron inferiores a los ciclos de máxima energía cinética en el movimiento. Sin embargo, para las demás barreras, se destaca un considerable porcentaje de reducción, alcanzando casi el 85% cuando se utilizan las estructuras B2 y B3 en conjunto.

Además, el análisis revela que para que el código logre el equilibrio de las partículas sin la intervención de las barreras, se requieren más ciclos en comparación con el uso de barreras. En la gráfica, se ha ampliado la zona de intervención de las barreras, pero los ciclos necesarios para detener el movimiento sin la intervención de barreras se sitúan alrededor de los 150,000, mientras que con las barreras este número se reduce a aproximadamente 20,000 ciclos.

8 Conclusiones

En conclusión, la mitigación de riesgos en Colombia ha cobrado importancia en los últimos años debido a la gran diversidad de accidentes geográficos del país. La presencia de cadenas montañosas divide el territorio en una región montañosa al occidente y una región plana al oriente, lo que influye en la ocurrencia de eventos geológicos como los flujos de detritos. Estos flujos han sido históricamente significativos en Colombia, como lo demuestran las grandes pérdidas sufridas en Mocoa en 2017. Este estudio ha revisado varios puntos cruciales para el análisis de este tipo de flujo, destacando la necesidad de enfoques detallados y específicos para mejorar la gestión y mitigación de riesgos asociados.

La implementación del proyecto mediante la metodología de elementos discretos ha permitido discernir la variabilidad originada por las interacciones entre partículas y el efecto resultante en los sedimentos frente a las estructuras transversales en la cuenca. Además, se ha simulado el evento que tuvo lugar en la cuenca alta de la Quebrada Taruca, incorporando factores como la topografía y las propiedades mecánicas y geotécnicas del material examinado en la región. Esto ha permitido aproximar el modelo al proceso en masa real que ocurrió en el año 2017.

Los parámetros fueron ajustados mediante un análisis de sensibilidad, lo que permitió afinar el modelo para reflejar con mayor precisión el evento real. Aunque no se logró obtener el volumen total en la distancia de viaje referenciada, se buscó recopilar el mayor número posible de partículas que contribuyeran al volumen, con el fin de asemejarse al evento real de esta investigación. Para futuras investigaciones, se recomienda utilizar una herramienta computacional que permita analizar una mayor cantidad de partículas, con el objetivo de obtener valores más precisos y con menores variaciones. Esta aproximación más ajustada contribuyó a obtener resultados que se asemejan notablemente a datos provenientes de investigaciones y estudios previos en la región, especialmente en términos de la distancia de viaje analizada. Los parámetros numéricos seleccionados después de la calibración realizada son similares a los parámetros geotécnicos de los materiales en estudio.

La realización de los análisis de sensibilidad y variabilidad de los parámetros de los materiales resalta la importancia del ángulo de rozamiento, la rigidez de las partículas y la naturaleza de la superficie de la cuenca. En este contexto, se destaca que la presencia de

materiales granulares y angulares en los escombros transportados por el flujo conlleva a velocidades menores, ya que el rozamiento con la superficie aumenta. Así mismo, se observa que, a menor ángulo de rozamiento y apoyo, se facilita el transporte del sedimento aguas abajo.

Con base en las investigaciones citadas en el documento, se puede concluir que las barreras utilizadas en diversas pruebas son efectivas para reducir la velocidad del flujo de escombros, lo que a su vez disminuye el impacto potencial sobre la población. Esta efectividad se confirma al observar la disposición de las barreras en relación con el flujo examinado. Al ubicarlas en diferentes posiciones, se evidencia cómo las fuerzas varían en función de la morfología del talud, la geometría y la cantidad de partículas, y cómo estas fuerzas pueden influir en el punto final de la cuenca.

Al modificar la posición de las barreras, se llegó a la conclusión de que cuanto más elevada y cercana al punto de impacto de las partículas, mayores son las fuerzas, pudiendo superar la altura de las estructuras. Esto se ilustra claramente en el caso de la Barrera 2, donde el cambio en la pendiente permite que las partículas ganen velocidad, resultando en una fuerza que no es mitigada por la barrera y que, por ende, la sobrepasa. Por esta razón, se recomienda el uso de dos barreras con una ubicación adecuada y con alturas que sean constructivamente viables y así se puedan dividir y distribuir las fuerzas de manera equitativa, logrando así reducir las fuerzas y mitigar el riesgo de manera más efectiva.

Es crucial destacar que el diseño de este tipo de barrera debe adecuarse a los volúmenes específicos que se pretenden contener. Como se observa en los gráficos a lo largo de la investigación, a medida que transcurre el tiempo, las fuerzas que deben soportar las barreras aumentan significativamente. En este estudio, se han considerado las mediciones realizadas en investigaciones previas en la cuenca de Mocoa. Sin embargo, es muy importante adaptar estos métodos a análisis de cuencas particulares que presenten necesidades específicas.

La alteración en la geometría de las barreras puede ocasionar cambios en los porcentajes de retención y en la reducción de escombros. Sin embargo, es esencial considerar esto de manera específica para cada caso que se pretenda modelar, ya que los materiales transportados no pueden generalizarse en situaciones particulares. Al modificar las alturas, como se hizo en este caso, se destaca la importancia absoluta de emplear varias barreras

que puedan detener y reducir la velocidad de las partículas, utilizando sistemas que sean factibles desde el punto de vista constructivo.

La colocación de barreras en el curso del flujo puede tener un impacto significativo, reduciendo hasta un 85% la energía cinética de las partículas en comparación con el evento de 2017, un porcentaje considerable para las áreas que se buscan proteger. Además, como se mencionó anteriormente, el tiempo se revela como un factor crucial para lograr el equilibrio de las partículas. En situaciones donde no hay intervención con barreras, este tiempo es notablemente mayor en comparación con la intervención de barreras, sin tener en cuenta las limitaciones de cotas en esta investigación. En un escenario real, el deslizamiento sin la intervención de barreras podría llegar aguas abajo, tal como ocurrió en el incidente de 2017, afectando a la población.

9 Recomendaciones

El flujo analizado en el proyecto es un flujo de detritos seco, no ha sido considerado la fase fluida. La presencia del agua influye en una gran participación del movimiento la afectación especialmente cuando el flujo es viscoso y tiene la combinación con materiales más finos dentro del flujo. Esta combinación puede ser modelada bajo DEM, utilizando CFD lo cual demanda un alto coste computacional. Existe una posibilidad también de analizar este tipo de flujo y puede ser bien representado bajo una modelación SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), incluyendo los dos análisis la discretización de las partículas bajo un medio fluido.

A mayor detalle, el análisis de las fuerzas se podría hacer a microescala, ya que en el desarrollo de estas detrás de la pared en el medio granular podrían cuantificarse en 3D, calculando longitudes y número de cadenas y contactos formados entre las partículas vinculándolos a la fuerza total, analizando así mismo la distribución de cada una de las fuerzas que llegan a la pared.

Para investigaciones futuras, se sugiere llevar a cabo el estudio implementando estructuras completas, como terrenos compactados, redes de anillos o gaviones, que son elementos ampliamente utilizados en construcción y han sido sometidos a pruebas, lo que permitiría calibrar los modelos generados. Además, sería beneficioso evaluar las deformaciones que puedan surgir en las barreras al incorporar elementos flexibles. Esto facilitaría la realización de análisis de servicio para futuros diseños que puedan ser necesarios.

10 Bibliografía

- A Bianchini Ingeniero SA / Maccaferri Group . (2002). *RockFall-Barreras contra flujo de Escombros* . Obtenido de RockFall-Barreras contra flujo de Escombros : <https://abianchini.es/rockfall-barreras-contra-flujo-de-escombros-debris-flow/>
- A Fakhimi, F. C. (2002). Simulation of failure around a circular opening in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(4), 507-515.
- Albaba, A. (2016). *Discrete element modeling of the impact of granular debris flows on rigid and flexible structures (PhD Thesis)*. Saint Martin d'Hères: Université Grenoble Alpes.
- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches*, 6, 189-236. doi:10.1007/BF01239496
- Boetticher, A., Hubl, J., Wendeler, C., & Volkwein, A. (2011). Modeling the impact of shallow landslides on flexible protection barriers. *Math. Geosci. Crossroads Theory Pract*, 659-670.
- Butlanska, J., Arroyo, M., & Gens, A. (2009). Homogeneity and symmetry in DEM models of cone penetration. (G. C. (AIP), Ed.) *International Conference on the Micromechanics of Granular Media. "6th International Conference on the Micromechanics of Granular Media"*, 1145, 425-428. doi:10.1063/1.3179952
- Calvetti, F., Pisco, C., & Nova, R. (2008). Experimental and Numerical Analysis of Soil–Pipe Interaction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 1292-1299. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1292)
- Conforth, D. (2005). *Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*. Inglaterra: Professional Development.
- Consortio Inypsa-Argea-Acceptan-Ur. (2018). *Producto 4. Estudios detallados (Escala 1:2000) en suelo urbano y de expansión urbana. Hito 7. Modelamiento avenidas torrenciales*. Mocoa.
- Corpoamazonía. (2005). *Mapa general Departamento del Putumayo*. Corpoamazonía. Putumayo: Sistemas de Servicios de Información Ambiental georeferenciada de Corpoamazonia.
- Corpoamazonía. (4 de Abril de 2017). *Geospatial*. Obtenido de Geospatial: <http://www.geospatial.com.co/mocoa/compareOne.html>

- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, 27–29. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Cruden, D., & Varnes, D. (1996). Landslide Types and Processes. *Special Report 247 Landslides Investigation and Mitigation*. Turner, A. K. and Schuster R. L. (eds.) TRBNRC, National Academy Press, 247, 36-75.
- Cundall, P., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 29, 47-65.
- Di Pietro, P., Morassutti, G., & Fracassi, G. (2000). *Hazard mitigation measures after catastrophic debris flows (the case of Vargas State, Venezuela)*. EEUU: Flood Prevention and remediation.
- Diccionario de Geotecnia. (2005). *Diccionario de Geotecnia*. Obtenido de <https://www.diccionario.geotecnia.online/diccionario/licuefaccion-espontanea/#:~:text=P%C3%A9rdida%20s%C3%BAbita%20de%20la%20resistencia,en%20los%20poros%20del%20suelo>.
- Dos Santos Junior, P. J. (2018). *Gaviones y Estructuras de almacenamiento: Análisis teórico-numérico-experimental de comportamiento mecánico*. (Tesis de doctorado). Campinas: Unicamp.
- Duncan, J. &. (2005). *Soil Strength and Slope Stability. Chapter 2: Examples and Causes of Slope Failure*. New York: Wiley: John Wiley & Sons, INC.
- Duran, J. (2000). *Sands, Powders, and Grains. An introduction to the Physics of Granular Materials*. New York: Springer.
- Gajjar, P., Johnson, C., Carr, J., Chrispeels, K., Gray, J., & Withers, P. (2011). Size segregation of irregular granular materials captured by time-resolved 3D imaging. *Scientific Reports*, 11, 8352. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-021-87280-1>
- García Amaya, B. G. (2018). *Simulación de las fuerzas de impacto de flujos granulares contra obstáculos, variando su contenido de sólidos y velocidad*. (Trabajo de grado). Universidad de los Andes, Cundinamarca. Bogotá: Universidad de los Andes.
- García Reyes, C. E. (2013). *Paralelización del Método de Elementos Discretos para el Análisis de Daño Después de una Explosión* (Tesis de Maestría). Guanajuato: Centro de Investigación en Matemáticas, A.C. CIMAT.
- García Yagüe , A. (1988). Clasificación tipológica de los movimientos de laderas. *II Simp. Nac. Sobre taludes y laderas inestables.*, I, 152-160.
- García-Delgado, H., Medina Bello, E., & Machuca, S. (2018). *Caracterización del Movimiento en masa tipo flujo del 31 de Marzo de 2017 en Mocoa-Putumayo*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. doi:10.13140/RG.2.2.18803.43045

- Geologiaweb. (2017). *Geología, ciencias de la tierra, sus ramas y aplicaciones*. Obtenido de <https://geologiaweb.com/riesgos-naturales/deslizamientos/>
- Giraud, R. (2005). *Guidelines for the Geologic Evaluation of Debris Flow Hazards on Alluvial Fans in Utah* (Vol. I). Santaquin, Utah, United State of America: Utah Geological Survey.
- Gonzalez Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. España: Pearson Education.
- Goodman, R. (1989). *Introduction to Rock Mechanics. 2nd Edition*. New York: John Wiley & Sons Ltd.
- Guasti, G., Volkwein, A., & Wendeler, C. (2011). Design of flexible debris flow barriers. *5th International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment*, 1093-1100. doi:10.4408/IJEGE.2011-03.B-118
- Guoqing, X., Chun, L., Chong, X., & Tiancheng, L. (2021). *Dynamic Analysis of the High-Speed and Long-Runout Landslide Movement Process Based on the Discrete Element Method: A Case Study of the Shuicheng Landslide in Guizhou, China*. Nanjing: Hidawi.
- He, S., & Li, X. (2014). Prediction of impact force of debris flows bases on distribution and size of particles. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-14. doi:10.1007/s12665-015-5180-2
- Hernandez Bonilla, J. (17 de Abril de 2017). ¿Es posible prevenir catástrofes similares a la de Mocoa? *El Espectador*, pág. 6. Obtenido de <https://www.elespectador.com/economia/es-posible-prevenir-catastrofes-similares-a-la-de-mocoa-article-689277/>
- Hu, K., Wei, F., & Li, Y. (2011). Real-time measurement and preliminary analysis of debris-flow impact force at jiangjia ravine, china. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(9), 1268-1278. doi:10.1002/esp.2155
- Hübl, J., Suda, J., Proske, D., Kaitna, R., & Scheidl, C. (2009). Debris Flow Impact Estimation. *International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, 1, A59, 137-148.
- Hungr, O. (1995, August). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. (C. G. Journal, Ed.) *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 610-623. doi:10.1139/t95-063
- Hungr, O., Evans, S., Bovis, M., & Hutchinson, J. (2001). Review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3), 221-238. doi:10.2113/gseegeosci.7.3.221

- Hutchinson, J. (1988). Genral Report morphological and geotechnical parameters on landslides in relation to geology and hydrogeology. *C. Bonnard (ed., Proceedings of the 5th International Symposium on landslides, 5 (4), 3-35.*
- IDIGER. (28 de 11 de 2019). *Instituto distrital de gestión de riesgos y cambio climático.* Obtenido de Instituto distrital de gestión de riesgos y cambio climático: <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
- Iverson, R. M. (1997). The Physics of Debris Flow. *Geophysics, 35 (3), 245-292.* doi:<https://doi.org/10.1029/97RG00426>
- Jean, M. (2011). Contact Dynamic Method. *Radjai, F., Dubois, F. (Eds.), Discrete-Element Modeling of Granular Materials ISTE Ltd; John Wiley & Sons, Inc., 346 (3), 247-262.* doi:<https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.12.009>
- Jojoa, O. A. (2003). *Análisis de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada taruca y sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de la población de mocoa departamento del putumayo.* Mocoa: Omar Antonio Jojoa.
- Kwon, S.-K. C.-M.-H. (2017). Effect of slit-type barrier on characteristics of water-dominant debris flows: small-scale physical modeling. *Landslides, 15 (1), 1-12.* doi:10.1007/s10346-017-0853-4
- Law, R. P., Choi, C. E., & Ng, C. W. (2015). Discrete-element investigation of influence of granular debris flow baffles on rigid barrier impact. *Canadian Geotechnical Journal, 53 (1), 1-12.* doi:10.1139/cgj-2014-0394
- Li, W., Li, H., Dai, F., & Lee, L. (2012). Discrete element modeling of a rainfall-induced flowslide. *Engineering Geology, 149–150, 22-34.* doi:10.1016/j.enggeo.2012.08.006
- Lo, D. (2000). *Review of natural terrain in landslide debris-resisting barrier design.* Hong Kong: GEO Report.
- Maccaferri. (2021). *Manual de Referencia de diseño MacRa.* Jundai: Maccaferri.
- Montero Olarte, J. (2017). *Clasificación de movimiento sen masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia.* Bogotá: Libros del Servicio Geológico Colombiano. doi:<https://doi.org/10.32685/9789585978218>
- Muñoz Muñoz, A. A. (2018). *Metodología para evaluar la amenaza de los flujos de detritos utilizando un análisis jerárquico de procesos y el software RAMMS, con aplicación en la cuenca del estero San Alfonso, Región Metropolitana. (Tesis de grado para Geología).* Santiago de Chile: Universidad de Chile. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152982>
- O'Sullivan, C. (2011). *Particulate Discrete Element Modelling. A Geomechanics perspective.* Oxon, UK: Spon Press, Taylor & Francis Group, Abingdon.

- Peñas, V. (2017). La catástrofe de Mocoa (Colombia): Un desastre anunciado previsible que podía haberse evitado. *Agencia Vasca del Agua. Bilbao. España*, 1-3.
- Popescu, M. E. (2002). Landslide Causal Factors and Landslide remedial options. *Illinois Institute of Technology*, 1-21.
- Ramirez, X. (02 de Abril de 2017). Más de 11 millones de metros cúbicos de lodo cubrieron Mocoa ¿tragedia anunciada? *Catorce* 6, pág. 3. Obtenido de <https://www.catorce6.com/denuncia/11662-mas-de-11-millones-de-metros-cubicos-de-lodo-cubrieron-mocoa-tragedia-anunciada>
- Salciarini, D., & Tamagnini, C. (2009, June 6). Discrete element modeling of debris-avalanche impact on earthfill barriers. *El Sevier*, 35, 172-181. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.05.002>
- Segalini, A., & Vagnon, F. (2016). Debris flow impact estimation on a rigid barrier. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 16, 1691–1697. doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-16-1691-2016>, 2016.
- Servicio Geológico Colombiano SGC. (2018). *Evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el área urbana, periurbana y de expansión del municipio de Mocoa - Putumayo, escala 1:5.000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano SGC.
- Sharpe, C. (1938). *Landslide and Related Phenomena: Columbia University Press, New York*.
- Sharpe, C. (1955). *R. Schultz and A. B. Cleaves*, 280-305.
- Šmilauer, V. (2021). *Yade Documentation 3rd ed. The Yade Project*. doi:DOI:10.5281/zenodo.5705394.
- Sociedad Colombiana de Ingenieros. (2020). Informe del análisis de la inestabilidad del kilómetro 58, vía Bog-V/cio. *SCI*, 12.
- Song, D., Ng, C., & Zhou, G. (2017). Geophysical flows impacting a flexible barrier: effects of solid-fluid interaction. *Landslides*, 15, 1-13. doi:10.1007/s10346-017-0856-1
- Song, D., Ng, C., Choi, C., Zhou, G., Kwan, J., & Koo, R. (2017). Influence of debris flow solid fraction on rigid barrier impact. *Canadian Geotechnical Journal*, 54, 1-14. doi:10.1139/cgj-2016-0502
- Stiny, J. (1910). *Die Muren: Versuch einer Monographie mit besonderer berücksichtigung der verhältnisse in Den Tiroler Alpen*. Innsbruck: Wagner.
- Tapias Camacho, M. A. (2016). *Particle model for crushable aggregates which includes size,time and relative humidity effects. (PhD Thesis)*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of landslides*. Cambridge: Harvard University.

- UNGRD. (23 de 04 de 2020). *Gestión del Riesgo*. Obtenido de Unidad Nacional para la gestión del riesgo de desastres: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Colombia-un-pais-con-multiples-amenazas-geologicas-pero-por-que-sucede-esto-en-la-UNGRD-se-lo-explicamos.aspx>
- UNGRD, U. d., & Pontificia Universidad Javeriana. (2018). *Diagnóstico Socioterritorial de las microcuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco y las quebradas la Taruca y Taruquita del municipio de Mocoa-Putumayo*. Bogotá: Gobierno de Colombia.
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2018). *Impactos de los eventos recurrentes y sus causas en Colombia*. Bogotá: ISBN Digital 978-958-5509-07-8 .
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo, Pontificia Universidad Javeriana. (2017). *Definición de umbrales de precipitación que generen deslizamientos*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Vagnon, F., & Segalini, A. (2016). Debris flow impact estimation on a rigid barrier. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 1691–1697. doi:<https://doi.org/10.5194/nhess-16-1691-2016>, 2016.
- Varnes, D. (1976). Landslides, causes and effect. *Geologie de l'ingenieur, Bulletin IAEG No. 14*, 205-214.
- Varnes, D. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Special Report 1976: Landslides Analysis and control (R. L. Schuster and R. J. Krizec, eds)*, 176, 11-33.
- Varnes, D. J. (1958). Landslide Types and Processes. *Special Report 29: Landslides and Engineering Practice (E.B. Ecke, ed.) HBR, National Research Council*, 247, 20-47.
- Volkwein, A. (2014). *Flexible debris flow barriers Design and application*. Swiss: Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, CH-8903 Birmensdorf.

A.Anexo A: Código de la simulación de evento original sin intervención de Barreras

```

#creación de paquete de esferas
# default values are used if not run from batch
readParamsFromTable(rMean=1.34, NumParticulas=20000, angfriccion=21.8,
Eparticulas= 6.50e5)# make rMean, rRelFuzz, maxLoad accessible directly
as variables later
from yade.params.table import *

from yade import pack, plot, geom

### PARAMETERS ###
#####
phi=11.3 #0.2 en radianes
E=3*10e9
color=[0,255,0]
r=0.005

### MATERIAL CUENCA ###
#####
O.materials.append(
FrictMat(young=E,poisson=0.25,density=2650,frictionAngle=radians(phi),
label='pFacetMat' ) ) # material for general interactions

#pared arriba
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,968,100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,868,0),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,1000,200),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(0,868,100),(0,900,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,968,0),(0,900,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,900,-100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA CENTRAL yade hacer la cuenca se utiliza facet varios, cambiamos los vertices. Luego asigno materiales.

O.bodies.append(facet([(0,868,0),(0,868,100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(179,706,0),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,706,0),(179,706,100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))

```

```
O.bodies.append(facet([(179,706,100),(412,635,0),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,635,0),(412,635,100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,100),(717,572,0),(717,572,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,572,0),(717,572,100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,100),(915,347,0),(915,347,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,347,0),(915,347,100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,347,100),(1207,185,0),(1207,185,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1207,185,100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,100),(1558,159,0),(1558,159,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(1558,159,100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,100),(2014,1,0),(2014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(2014,1,100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL IZQUIERDO
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(0,900,200),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(179,706,100),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(0,1000,200),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(179,738,200),(179,838,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,706,100),(179,738,200),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(412,635,100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(179,838,200),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,838,200),(412,706,200),(412,806,200)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(412, 635, 100), (412, 706, 200), (717, 572, 100)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(412, 706, 200), (717, 572, 100), (717, 604, 200)], material='pFacetMat', color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412, 706, 200), (412, 806, 200), (717, 604, 200)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(412, 806, 200), (717, 604, 200), (717, 704, 200)], material='pFacetMat', color=color))

O.bodies.append(facet([(717, 572, 100), (717, 604, 200), (915, 347, 100)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(717, 604, 200), (915, 347, 100), (915, 379, 200)], material='pFacetMat', color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717, 604, 200), (717, 704, 200), (915, 379, 200)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(717, 704, 200), (915, 379, 200), (915, 479, 200)], material='pFacetMat', color=color))

O.bodies.append(facet([(915, 347, 100), (915, 379, 200), (1207, 185, 100)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(915, 379, 200), (1207, 185, 100), (1207, 217, 200)], material='pFacetMat', color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915, 379, 200), (915, 479, 200), (1207, 217, 200)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(915, 479, 200), (1207, 217, 200), (1207, 317, 200)], material='pFacetMat', color=color))

O.bodies.append(facet([(1207, 185, 100), (1207, 217, 200), (1558, 159, 100)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(1207, 217, 200), (1558, 159, 100), (1558, 191, 200)], material='pFacetMat', color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207, 217, 200), (1207, 317, 200), (1558, 191, 200)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(1207, 317, 200), (1558, 191, 200), (1558, 291, 200)], material='pFacetMat', color=color))

O.bodies.append(facet([(1558, 159, 100), (1558, 191, 200), (2014, 1, 100)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(1558, 191, 200), (2014, 1, 100), (2014, 33, 200)], material='pFacetMat', color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558, 191, 200), (1558, 291, 200), (2014, 33, 200)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(1558, 291, 200), (2014, 33, 200), (2014, 133, 200)], material='pFacetMat', color=color))

O.bodies.append(facet([(2014, 1, 100), (2014, 33, 200), (3014, 1, 100)], material='pFacetMat', color=color))
O.bodies.append(facet([(2014, 33, 200), (3014, 1, 100), (3014, 33, 200)], material='pFacetMat', color=color))
```

```
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(2014,133,200),(3014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,133,200),(3014,33,200),(3014,133,200)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL DERECHA
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(0,868,0),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,0),(179,738,-100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,900,-100),(179,838,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(179,838,-100),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(179,706,0),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,706,0),(412,706,-100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,838,-100),(179,738,-100),(412,806,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(412,806,-100),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(412,635,0),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,0),(717,604,-100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412,806,-100),(412,706,-100),(717,704,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(717,704,-100),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(717,572,0),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,0),(915,379,-100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717,704,-100),(717,604,-100),(915,479,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(915,479,-100),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(915,347,0),(1207,217,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,347,0),(1207,217,-100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915,479,-100),(915,379,-100),(1207,317,-100)],material='pFacetMat',color=color))
```

```

O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(1207,317,-100),(1207,217,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1207,185,0),(1558,191,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1558,191,-100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207,317,-100),(1207,217,-100),(1558,291,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1558,291,-100),(1558,191,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(1558,159,0),(2014,33,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(2014,33,-100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558,291,-100),(1558,191,-100),(2014,133,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(2014,133,-100),(2014,33,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(2014,1,0),(3014,33,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(3014,33,-100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,133,-100),(2014,33,-100),(3014,133,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(3014,133,-100),(3014,33,-100)],material='pFacetMat',color=color))

#BARRERA MÒVIL
Barrera1 = O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(412,706,200),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera2 = O.bodies.append(facet([(412,706,200),(412,635,0),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera3 = O.bodies.append(facet([(412,756,-100),(412,706,200),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera4 = O.bodies.append(facet([(412,756,200),(412,706,-100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))

####material para barreras

### PARAMETERS ###
phib=50
Eb=3.*1e8
colorb=[255,0,0]
rb=0.005

```

```

### MATERIAL para barrera ###
O.materials.append(FrictMat(
young=E,poisson=1,density=2650,frictionAngle=radians(phib),label='pFacetBarrera'))

#PARED ABAJO
P1=O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,151,100),(3014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
P2=O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,183,200),(3014,1,100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,183,200),(3014,1,100),(3014,33,200)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,183,-100),(3014,151,0),(3014,33,-100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,33,-100),(3014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

O.materials.append(FrictMat(
density=2650,young=
Eparticulas,poisson=1,frictionAngle=radians(angfriccion),label='materialsph'))

global amort
amort = 0.7
# create box with free top, and ceate loose packing inside the box
sp = pack.SpherePack()
sp.makeCloud((220,1020,120),(50,850,-10),rMean=rMean,num=NumParticulas)
sp.toSimulation(material='materialsph')
NumParticles=NumParticulas

#Definición de los motores de calculo

O.engines=[
ForceResetter(),
InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(),Bo1_Facet_Aabb()]),
InteractionLoop(
# handle sphere+sphere and facet+sphere collisions
[Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(),Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],
[Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],
[Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()
]),
NewtonIntegrator(gravity=(0,-9.81,0),damping=amort),
# call the checkUnbalanced function (defined below) every 2 seconds
PyRunner(command='checkUnbalanced()',realPeriod=2,
label='checker')
]

```

```

# set timestep to a fraction of the critical timestep
# the fraction is very small, so that the simulation is not too fast
# and the motion can be observed
O.dt = .8 * PWaveTimeStep()

O.trackEnergy = True

# if the unbalanced forces goes below .1, the packing
# is considered stabilized, therefore we stop collected
# data history and stop
def checkUnbalanced():
    if O.iter < 5000 :
        return

#cuando las fuerzas se desbalancen
if unbalancedForce() < 0.05:
    amort = 0
    Fz12= O.forces.f(Barrera1)
    Fz13= O.forces.f(Barrera2)
    Fz14= O.forces.f(Barrera3)
    Fz15= O.forces.f(Barrera4)
    Fzb=Fz12+Fz14+Fz13+Fz14

    O.bodies.erase(Barrera1)
    O.bodies.erase(Barrera2)
    O.bodies.erase(Barrera3)
    O.bodies.erase(Barrera4)
    #O.pause()

    plot.addData(Fzb=Fzb,i=O.iter, unbalanced=unbalancedForce())
    checker.command='perfiles()'

def perfiles():

    global Max_max
    Max_max=max([b.state.pos[0] for b in O.bodies if
isinstance(b.shape, Sphere)])
    global Min_min
    Min_min=min([b.state.pos[0] for b in O.bodies if
isinstance(b.shape, Sphere)])

    global a
    a=50
    global Particulas_in_x
    Particulas_in_x=[]
    global DivisionesX
    DivisionesX=[]
    global m
    m=0
    global time_
    time_=1
    NumIntervalos= round(1+log(NumParticles)/log(2))

```

```

if Max_vel <0.02 or O.time>40
    time_=O.time
    #DivisionesX(NumIntervalos)
    m=(Max_max-Min_min)/(NumIntervalos)
    for Interv in range(NumIntervalos):
        DivisionesX.append(Min_min+Interv*m)      #limite
izquierdo
        Particulas_in_x.append(0)

    for b in O.bodies:
        if isinstance(b.shape, Sphere):
            a=0
            for Interv in reversed(range(NumIntervalos)):
                if b.state.pos[0] >=
DivisionesX[Interv] and a==0:
                    Particulas_in_x[Interv]=
Particulas_in_x[Interv]+1 #agrega particulas al intervalo
                    a=1

            plot.addData(i=O.iter,The_time_=O.time,
Plot_Umbalanced=unbalancedForce())

        for Interv in range(NumIntervalos-1):

            plot.addData(Limite1=DivisionesX[Interv],Limite2=DivisionesX[I
nterv+1] , Px=Particulas_in_x[Interv])

            plot.addData(Limite1=DivisionesX[-1],Limite2= Max_max,
Px=Particulas_in_x[-1])

            #cuando se midan fuerzas
            #checker.command = 'Fuerzasenz()'

def Fuerzasenz():
    Fz1= O.forces.f(P1)
    Fz2= O.forces.f(P2)
    Fz=Fz1+Fz2
    print(Fz)
    plot.addData(Fz=Fz,i=O.iter, unbalanced=unbalancedForce(),
**O.energy )

plot.saveDataTxt(O.tags['d.id'] + '_' +str(time_)+ 'Seg_'+'.txt')
    O.pause()

plot.plots = {'The_time_': ('Maxvel', None, 'L_inicial', 'L_final')}

# show the plot on the screen, and update while the simulation runs
plot.plot()

O.run()waitIfBatch()

```

B.Anexo B: Código de la simulación de evento original con intervención de Barrera 1

```
#creación de paquete de esferas
# default values are used if not run from batch
readParamsFromTable(rMean=1.34, NumParticulas=20000, angfriccion=21.8,
Eparticulas= 6.50e5)# make rMean, rRelFuzz, maxLoad accessible directly
as variables later
from yade.params.table import *

from yade import pack, plot, geom

### PARAMETERS ###
#####
phi=11.3 #0.2 en radianes
E=3*10e9
color=[0,255,0]
r=0.005

### MATERIAL CUENCA ###
#####
O.materials.append(
FrictMat(young=E,poisson=0.25,density=2650,frictionAngle=radians(phi),
label='pFacetMat' ) ) # material for general interactions

#pared arriba
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,968,100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,868,0),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,1000,200),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(0,868,100),(0,900,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,968,0),(0,900,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,900,-100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA CENTRAL yade hacer la cuenca se utiliza facet varios, cambiamos los vertices. Luego asigno materiales.

O.bodies.append(facet([(0,868,0),(0,868,100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(179,706,0),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(179,706,0),(179,706,100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,706,100),(412,635,0),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,635,0),(412,635,100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,100),(717,572,0),(717,572,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,572,0),(717,572,100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,100),(915,347,0),(915,347,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,347,0),(915,347,100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,347,100),(1207,185,0),(1207,185,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1207,185,100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,100),(1558,159,0),(1558,159,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(1558,159,100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,100),(2014,1,0),(2014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(2014,1,100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL IZQUIERDO
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(0,900,200),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(179,706,100),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(0,1000,200),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(179,738,200),(179,838,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,706,100),(179,738,200),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(412,635,100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(179,838,200),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(179,838,200),(412,706,200),(412,806,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,635,100),(412,706,200),(717,572,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(717,572,100),(717,604,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(412,806,200),(717,604,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,806,200),(717,604,200),(717,704,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,572,100),(717,604,200),(915,347,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,604,200),(915,347,100),(915,379,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717,604,200),(717,704,200),(915,379,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,704,200),(915,379,200),(915,479,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,347,100),(915,379,200),(1207,185,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,379,200),(1207,185,100),(1207,217,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915,379,200),(915,479,200),(1207,217,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,479,200),(1207,217,200),(1207,317,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,185,100),(1207,217,200),(1558,159,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1558,159,100),(1558,191,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1207,317,200),(1558,191,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,317,200),(1558,191,200),(1558,291,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,159,100),(1558,191,200),(2014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,191,200),(2014,1,100),(2014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558,191,200),(1558,291,200),(2014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,291,200),(2014,33,200),(2014,133,200)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(2014,1,100),(2014,33,200),(3014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(3014,1,100),(3014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(2014,133,200),(3014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,133,200),(3014,33,200),(3014,133,200)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL DERECHA
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(0,868,0),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,0),(179,738,-100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,900,-100),(179,838,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(179,838,-100),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(179,706,0),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,706,0),(412,706,-100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,838,-100),(179,738,-100),(412,806,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(412,806,-100),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(412,635,0),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,0),(717,604,-100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412,806,-100),(412,706,-100),(717,704,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(717,704,-100),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(717,572,0),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,0),(915,379,-100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717,704,-100),(717,604,-100),(915,479,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(915,479,-100),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(915,347,0),(1207,217,-100)],material='pFacetMat',color=color))
```

```

O.bodies.append(facet([(915,347,0),(1207,217,-
100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915,479,-100),(915,379,-100),(1207,317,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(1207,317,-100),(1207,217,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1207,185,0),(1558,191,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1558,191,-
100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207,317,-100),(1207,217,-100),(1558,291,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1558,291,-100),(1558,191,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(1558,159,0),(2014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(2014,33,-
100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558,291,-100),(1558,191,-100),(2014,133,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(2014,133,-100),(2014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(2014,1,0),(3014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(3014,33,-
100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,133,-100),(2014,33,-100),(3014,133,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(3014,133,-100),(3014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

#BARRERA MÒVIL
Barrera1 = O.bodies.append(facet([(412,706,-
100),(412,706,200),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera2 =
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(412,635,0),(412,635,100)],materi
al='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera3 =O.bodies.append(facet([(412,756,-
100),(412,706,200),(412,706,-
100)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera4 =O.bodies.append(facet([(412,756,200),(412,706,-
100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))

####material para barreras

### PARAMETERS ###

```

```
phib=50
Eb=3.*1e8
colorb=[255,0,0]
rb=0.005

### MATERIAL para barrera ###
O.materials.append(FrictMat(
young=E,poisson=0.3,density=2650,frictionAngle=radians(phib),label='pF
acetBarrera'))

#PARED ABAJO
O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,151,100),(3014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,183,200),(3014,1,100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,183,200),(3014,1,100),(3014,33,200)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,183,-100),(3014,151,0),(3014,33,-100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,33,-100),(3014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

#creación de barreras

#barrera 1
Barrier1 = O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(717,604,200),(717,572,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
barrier1=
O.bodies.append(facet([(717,604,200),(717,572,0),(717,572,100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

O.materials.append(FrictMat(
density=2650,young=1e7,poisson=0.5,frictionAngle=0.3,label='materialsp
h'))

global amort
amort = 0.7
# create box with free top, and ceate loose packing inside the box
sp = pack.SpherePack()
sp.makeCloud((220,1020,120),(50,850,-10),rMean=rMean,
num=NumParticulas)
sp.toSimulation(material='materialsp')
NumParticles=NumParticulas

#Definición de los motores de calculo

O.engines=[
```

```

ForceResetter(),
InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(),Bo1_Facet_Aabb()]),
InteractionLoop(
    # handle sphere+sphere and facet+sphere collisions
    [Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(),Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],
    [Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],
    [Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()]
),
NewtonIntegrator(gravity=(0,-9.81,0),damping=amort),
# call the checkUnbalanced function (defined below) every 2 seconds
PyRunner(command='checkUnbalanced()',realPeriod=2,
label='checker')

]

# set timestep to a fraction of the critical timestep
# the fraction is very small, so that the simulation is not too fast
# and the motion can be observed
O.dt = .8 * PWaveTimeStep()

O.trackEnergy = True

# if the unbalanced forces goes below .1, the packing
# is considered stabilized, therefore we stop collected
# data history and stop
def checkUnbalanced():
    if O.iter < 5000 :
        return

#cuando las fuerzas se desbalanceen
if unbalancedForce() < 0.05:
    O.bodies.erase(Barrera1)
    O.bodies.erase(Barrera2)
    O.bodies.erase(Barrera3)
    O.bodies.erase(Barrera4)
    O.pause()
    plot.saveDataTxt('tesis')
    plot.saveDataTxt('Fuerzab', vars= ('i','Fz'))

def addPlotData():
    # each item is given a names, by which it can be the used
    in plot.plots
    # the **O.energy converts dictionary-like O.energy to
    plot.addData arguments
    Fz1= O.forces.f(Barrier1)
    Fz2= O.forces.f(barrier1)
    Fz=Fz1+Fz2
    print(Fz)
    plot.addData(Fz=Fz,i=O.iter,          unbalanced=unbalancedForce(),
**O.energy)

plot.plots = {'i': ('unbalanced', None, O.energy.keys)}
plot.plot()

```

C.Anexo C: Código de la simulación de evento original con intervención de Barrera 2

```
#creación de paquete de esferas
# default values are used if not run from batch
readParamsFromTable(rMean=1.34, NumParticulas=20000, angfriccion=21.8,
Eparticulas= 6.50e5)# make rMean, rRelFuzz, maxLoad accessible directly
as variables later
from yade.params.table import *

from yade import pack, plot, geom

### PARAMETERS ###
#####
phi=11.3 #0.2 en radianes
E=3*10e9
color=[0,255,0]
r=0.005

### MATERIAL CUENCA ###
#####
O.materials.append(
FrictMat(young=E,poisson=0.25,density=2650,frictionAngle=radians(phi),
label='pFacetMat' ) ) # material for general interactions

#pared arriba
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,968,100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,868,0),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,1000,200),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(0,868,100),(0,900,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,968,0),(0,900,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,900,-100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA CENTRAL yade hacer la cuenca se utiliza facet varios, cambiamos los vertices. Luego asigno materiales.

O.bodies.append(facet([(0,868,0),(0,868,100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(179,706,0),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(179,706,0),(179,706,100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,706,100),(412,635,0),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,635,0),(412,635,100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,100),(717,572,0),(717,572,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,572,0),(717,572,100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,100),(915,347,0),(915,347,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,347,0),(915,347,100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,347,100),(1207,185,0),(1207,185,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1207,185,100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,100),(1558,159,0),(1558,159,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(1558,159,100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,100),(2014,1,0),(2014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(2014,1,100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL IZQUIERDO
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(0,900,200),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(179,706,100),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(0,1000,200),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(179,738,200),(179,838,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,706,100),(179,738,200),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(412,635,100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(179,838,200),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(179,838,200),(412,706,200),(412,806,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,635,100),(412,706,200),(717,572,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(717,572,100),(717,604,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(412,806,200),(717,604,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,806,200),(717,604,200),(717,704,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,572,100),(717,604,200),(915,347,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,604,200),(915,347,100),(915,379,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717,604,200),(717,704,200),(915,379,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,704,200),(915,379,200),(915,479,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,347,100),(915,379,200),(1207,185,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,379,200),(1207,185,100),(1207,217,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915,379,200),(915,479,200),(1207,217,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,479,200),(1207,217,200),(1207,317,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,185,100),(1207,217,200),(1558,159,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1558,159,100),(1558,191,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1207,317,200),(1558,191,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,317,200),(1558,191,200),(1558,291,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,159,100),(1558,191,200),(2014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,191,200),(2014,1,100),(2014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558,191,200),(1558,291,200),(2014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,291,200),(2014,33,200),(2014,133,200)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(2014,1,100),(2014,33,200),(3014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(3014,1,100),(3014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(2014,133,200),(3014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,133,200),(3014,33,200),(3014,133,200)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL DERECHA
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(0,868,0),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,0),(179,738,-100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,900,-100),(179,838,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(179,838,-100),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(179,706,0),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,706,0),(412,706,-100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,838,-100),(179,738,-100),(412,806,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(412,806,-100),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(412,635,0),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,0),(717,604,-100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412,806,-100),(412,706,-100),(717,704,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(717,704,-100),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(717,572,0),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,0),(915,379,-100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717,704,-100),(717,604,-100),(915,479,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(915,479,-100),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(915,347,0),(1207,217,-100)],material='pFacetMat',color=color))
```

```

O.bodies.append(facet([(915,347,0),(1207,217,-
100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915,479,-100),(915,379,-100),(1207,317,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(1207,317,-100),(1207,217,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1207,185,0),(1558,191,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1558,191,-
100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207,317,-100),(1207,217,-100),(1558,291,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1558,291,-100),(1558,191,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(1558,159,0),(2014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(2014,33,-
100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558,291,-100),(1558,191,-100),(2014,133,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(2014,133,-100),(2014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(2014,1,0),(3014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(3014,33,-
100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,133,-100),(2014,33,-100),(3014,133,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(3014,133,-100),(3014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

#BARRERA MÒVIL
Barrera1 = O.bodies.append(facet([(412,706,-
100),(412,706,200),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera2 =
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(412,635,0),(412,635,100)],materi
al='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera3 =O.bodies.append(facet([(412,756,-
100),(412,706,200),(412,706,-
100)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera4 =O.bodies.append(facet([(412,756,200),(412,706,-
100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))

####material para barreras

### PARAMETERS ###

```

```

phib=50
Eb=3.*1e8
colorb=[255,0,0]
rb=0.005

### MATERIAL para barrera ###
O.materials.append(
    FrictMat(
    young=E,poisson=0.3,density=2650,frictionAngle=radians(phib),label='pF
acetBarrera')

#PARED ABAJO
O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,151,100),(3014,1,0)],material
l='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material
l='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,183,200),(3014,1,100)],mat
erial='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,183,200),(3014,1,100),(3014,33,200)],mate
rial='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,183,-100),(3014,151,0),(3014,33,-
100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,33,-
100),(3014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

#creación de barreras

#barrera 2
Barrier2 = O.bodies.append(facet([(1207,217,-
100),(1207,217,200),(1207,185,0)],material='pFacetBarrera',color=color
b))
barrier2=
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1207,185,0),(1207,185,100)],mat
erial='pFacetBarrera',color=colorb))

global amort
amort = 0.7
# create box with free top, and ceate loose packing inside the box
sp = pack.SpherePack()
sp.makeCloud((220,1020,120), (50, 850, -10), rMean=rMean,
num=NumParticulas)
sp.toSimulation(material='materialsph')
NumParticles=NumParticulas

#Definición de los motores de calculo

O.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(),Bo1_Facet_Aabb()]),
    InteractionLoop(
        # handle sphere+sphere and facet+sphere collisions

```

```

        [Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(), Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],
        [Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],
        [Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()]
    ),
    NewtonIntegrator(gravity=(0, -9.81, 0), damping=amort),
    # call the checkUnbalanced function (defined below) every 2 seconds
    PyRunner(command='checkUnbalanced()', realPeriod=2,
label='checker')
]

# set timestep to a fraction of the critical timestep
# the fraction is very small, so that the simulation is not too fast
# and the motion can be observed
O.dt = .8 * PWaveTimeStep()

O.trackEnergy = True

# if the unbalanced forces goes below .1, the packing
# is considered stabilized, therefore we stop collected
# data history and stop
def checkUnbalanced():
    if O.iter < 5000 :
        return

#cuando las fuerzas se desbalanceen
if unbalancedForce() < 0.05:
    O.bodies.erase(Barrera1)
    O.bodies.erase(Barrera2)
    O.bodies.erase(Barrera3)
    O.bodies.erase(Barrera4)
    O.pause()
    plot.saveDataTxt('tesis')
    plot.saveDataTxt('Fuerzab', vars= ('i', 'Fz'))

def addPlotData():
    # each item is given a names, by which it can be the used
    in plot.plots
    # the **O.energy converts dictionary-like O.energy to
    plot.addData arguments
    Fz1= O.forces.f(Barrier2)
    Fz2= O.forces.f(barrier2)
    Fz=Fz1+Fz2
    print(Fz)
    plot.addData(Fz=Fz, i=O.iter, unbalanced=unbalancedForce(),
**O.energy)

plot.plots = {'i': ('unbalanced', None, O.energy.keys)}
plot.plot()

```

D.Anexo D: Código de la simulación de evento original con intervención de Barrera 3

```
#creación de paquete de esferas
# default values are used if not run from batch
readParamsFromTable(rMean=1.34, NumParticulas=20000, angfriccion=21.8,
Eparticulas= 6.50e5)# make rMean, rRelFuzz, maxLoad accessible directly
as variables later
from yade.params.table import *

from yade import pack, plot, geom

### PARAMETERS ###
#####
phi=11.3 #0.2 en radianes
E=3*10e9
color=[0,255,0]
r=0.005

### MATERIAL CUENCA ###
#####
O.materials.append(
FrictMat(young=E,poisson=0.25,density=2650,frictionAngle=radians(phi),
label='pFacetMat' ) ) # material for general interactions

#pared arriba
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,968,100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,868,0),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,1000,200),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(0,868,100),(0,900,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,968,0),(0,900,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,900,-100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA CENTRAL yade hacer la cuenca se utiliza facet varios, cambiamos los vertices. Luego asigno materiales.

O.bodies.append(facet([(0,868,0),(0,868,100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(179,706,0),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(179,706,0),(179,706,100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,706,100),(412,635,0),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,635,0),(412,635,100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,100),(717,572,0),(717,572,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,572,0),(717,572,100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,100),(915,347,0),(915,347,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,347,0),(915,347,100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,347,100),(1207,185,0),(1207,185,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1207,185,100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,100),(1558,159,0),(1558,159,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(1558,159,100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,100),(2014,1,0),(2014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(2014,1,100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL IZQUIERDO
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(0,900,200),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(179,706,100),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(0,1000,200),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(179,738,200),(179,838,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,706,100),(179,738,200),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(412,635,100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(179,838,200),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(179,838,200),(412,706,200),(412,806,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,635,100),(412,706,200),(717,572,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(717,572,100),(717,604,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(412,806,200),(717,604,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,806,200),(717,604,200),(717,704,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,572,100),(717,604,200),(915,347,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,604,200),(915,347,100),(915,379,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717,604,200),(717,704,200),(915,379,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,704,200),(915,379,200),(915,479,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,347,100),(915,379,200),(1207,185,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,379,200),(1207,185,100),(1207,217,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915,379,200),(915,479,200),(1207,217,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,479,200),(1207,217,200),(1207,317,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,185,100),(1207,217,200),(1558,159,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1558,159,100),(1558,191,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1207,317,200),(1558,191,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,317,200),(1558,191,200),(1558,291,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,159,100),(1558,191,200),(2014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,191,200),(2014,1,100),(2014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558,191,200),(1558,291,200),(2014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,291,200),(2014,33,200),(2014,133,200)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(2014,1,100),(2014,33,200),(3014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(3014,1,100),(3014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(2014,133,200),(3014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,133,200),(3014,33,200),(3014,133,200)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL DERECHA
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(0,868,0),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,0),(179,738,-100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,900,-100),(179,838,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(179,838,-100),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(179,706,0),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,706,0),(412,706,-100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,838,-100),(179,738,-100),(412,806,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(412,806,-100),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(412,635,0),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,0),(717,604,-100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412,806,-100),(412,706,-100),(717,704,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(717,704,-100),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(717,572,0),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,0),(915,379,-100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717,704,-100),(717,604,-100),(915,479,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(915,479,-100),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(915,347,0),(1207,217,-100)],material='pFacetMat',color=color))
```

```

O.bodies.append(facet([(915,347,0),(1207,217,-
100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915,479,-100),(915,379,-100),(1207,317,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(1207,317,-100),(1207,217,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1207,185,0),(1558,191,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1558,191,-
100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207,317,-100),(1207,217,-100),(1558,291,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1558,291,-100),(1558,191,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(1558,159,0),(2014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(2014,33,-
100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558,291,-100),(1558,191,-100),(2014,133,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(2014,133,-100),(2014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(2014,1,0),(3014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(3014,33,-
100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,133,-100),(2014,33,-100),(3014,133,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(3014,133,-100),(3014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

#BARRERA MÒVIL
Barrera1 = O.bodies.append(facet([(412,706,-
100),(412,706,200),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera2 =
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(412,635,0),(412,635,100)],materi
al='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera3 =O.bodies.append(facet([(412,756,-
100),(412,706,200),(412,706,-
100)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera4 =O.bodies.append(facet([(412,756,200),(412,706,-
100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))

####material para barreras

### PARAMETERS ###

```

```

phib=50
Eb=3.*1e8
colorb=[255,0,0]
rb=0.005

### MATERIAL para barrera ###
O.materials.append(                                     FrictMat(
young=E,poisson=0.3,density=2650,frictionAngle=radians(phib),label='pF
acetBarrera'))

#PARED ABAJO
O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,151,100),(3014,1,0)],material
l='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material
l='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,183,200),(3014,1,100)],mat
erial='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,183,200),(3014,1,100),(3014,33,200)],mate
rial='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,183,-100),(3014,151,0),(3014,33,-
100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,33,-
100),(3014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

#creación de barreras

#barrera 3
Barrier3 = O.bodies.append(facet([(2014,33,-
100),(2014,33,200),(2014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
barrier3 =
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(2014,1,0),(2014,1,100)],material
='pFacetBarrera',color=colorb))

global amort
amort = 0.7
# create box with free top, and ceate loose packing inside the box
sp = pack.SpherePack()
sp.makeCloud((220,1020,120),(50,850,-10),rMean=rMean,
num=NumParticulas)
sp.toSimulation(material='materialsph')
NumParticles=NumParticulas

#Definición de los motores de calculo

O.engines=[
ForceResetter(),
InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(),Bo1_Facet_Aabb()]),
InteractionLoop(
# handle sphere+sphere and facet+sphere collisions
[Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(),Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],

```

```

        [Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],
        [Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()]
    ),
    NewtonIntegrator(gravity=(0,-9.81,0),damping=amort),
    # call the checkUnbalanced function (defined below) every 2 seconds
    PyRunner(command='checkUnbalanced()',realPeriod=2,
label='checker')
]

# set timestep to a fraction of the critical timestep
# the fraction is very small, so that the simulation is not too fast
# and the motion can be observed
O.dt = .8 * PWaveTimeStep()

O.trackEnergy = True

# if the unbalanced forces goes below .1, the packing
# is considered stabilized, therefore we stop collected
# data history and stop
def checkUnbalanced():
    if O.iter < 5000 :
        return

#cuando las fuerzas se desbalanceen
if unbalancedForce() < 0.05:
    O.bodies.erase(Barrera1)
    O.bodies.erase(Barrera2)
    O.bodies.erase(Barrera3)
    O.bodies.erase(Barrera4)
    O.pause()
    plot.saveDataTxt('tesis')
    plot.saveDataTxt('Fuerzab', vars= ('i','Fz'))

def addPlotData():
    # each item is given a names, by which it can be the used
    in plot.plots
    # the **O.energy converts dictionary-like O.energy to
    plot.addData arguments
    Fz1= O.forces.f(Barrier3)
    Fz2= O.forces.f(barrier3)
    Fz=Fz1+Fz2
    print(Fz)
    plot.addData(Fz=Fz,i=O.iter,          unbalanced=unbalancedForce(),
**O.energy)

plot.plots = {'i': ('unbalanced', None, O.energy.keys)}
plot.plot()

```

E.Anexo E: Código de la simulación de evento original con intervención de Barrera 2 y 3

```
#creación de paquete de esferas
# default values are used if not run from batch
readParamsFromTable(rMean=1.34, NumParticulas=20000, angfriccion=21.8,
Eparticulas= 6.50e5)# make rMean, rRelFuzz, maxLoad accessible directly
as variables later
from yade.params.table import *

from yade import pack, plot, geom

### PARAMETERS ###
#####
phi=11.3 #0.2 en radianes
E=3*10e9
color=[0,255,0]
r=0.005

### MATERIAL CUENCA ###
#####
O.materials.append(
FrictMat(young=E,poisson=0.25,density=2650,frictionAngle=radians(phi),
label='pFacetMat' ) ) # material for general interactions

#pared arriba
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,968,100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,868,0),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,968,100),(0,1000,200),(0,868,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(0,868,100),(0,900,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,968,0),(0,900,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,968,0),(0,900,-100),(0,868,0)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA CENTRAL yade hacer la cuenca se utiliza facet varios, cambiamos los vertices. Luego asigno materiales.

O.bodies.append(facet([(0,868,0),(0,868,100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(179,706,0),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(179,706,0),(179,706,100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,706,100),(412,635,0),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,635,0),(412,635,100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,100),(717,572,0),(717,572,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,572,0),(717,572,100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,100),(915,347,0),(915,347,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,347,0),(915,347,100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,347,100),(1207,185,0),(1207,185,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1207,185,100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,100),(1558,159,0),(1558,159,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(1558,159,100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,100),(2014,1,0),(2014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(2014,1,100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL IZQUIERDO
O.bodies.append(facet([(0,868,100),(0,900,200),(179,706,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(179,706,100),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,900,200),(0,1000,200),(179,738,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,1000,200),(179,738,200),(179,838,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,706,100),(179,738,200),(412,635,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(412,635,100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,738,200),(179,838,200),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(179,838,200),(412,706,200),(412,806,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,635,100),(412,706,200),(717,572,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(717,572,100),(717,604,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(412,806,200),(717,604,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,806,200),(717,604,200),(717,704,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,572,100),(717,604,200),(915,347,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,604,200),(915,347,100),(915,379,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717,604,200),(717,704,200),(915,379,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,704,200),(915,379,200),(915,479,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,347,100),(915,379,200),(1207,185,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,379,200),(1207,185,100),(1207,217,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915,379,200),(915,479,200),(1207,217,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,479,200),(1207,217,200),(1207,317,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,185,100),(1207,217,200),(1558,159,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1558,159,100),(1558,191,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1207,317,200),(1558,191,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,317,200),(1558,191,200),(1558,291,200)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,159,100),(1558,191,200),(2014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,191,200),(2014,1,100),(2014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558,191,200),(1558,291,200),(2014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,291,200),(2014,33,200),(2014,133,200)],material='pFacetMat',color=color))
```

```
O.bodies.append(facet([(2014,1,100),(2014,33,200),(3014,1,100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(3014,1,100),(3014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(2014,133,200),(3014,33,200)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,133,200),(3014,33,200),(3014,133,200)],material='pFacetMat',color=color))

#CUENCA LATERAL DERECHA
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(0,868,0),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,868,0),(179,738,-100),(179,706,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(0,1000,-100),(0,900,-100),(179,838,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(0,900,-100),(179,838,-100),(179,738,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(179,706,0),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,706,0),(412,706,-100),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(179,838,-100),(179,738,-100),(412,806,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(179,738,-100),(412,806,-100),(412,706,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(412,635,0),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,635,0),(717,604,-100),(717,572,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(412,806,-100),(412,706,-100),(717,704,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(412,706,-100),(717,704,-100),(717,604,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(717,572,0),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,572,0),(915,379,-100),(915,347,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(717,704,-100),(717,604,-100),(915,479,-100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(717,604,-100),(915,479,-100),(915,379,-100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(915,347,0),(1207,217,-100)],material='pFacetMat',color=color))
```

```

O.bodies.append(facet([(915,347,0),(1207,217,-
100),(1207,185,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(915,479,-100),(915,379,-100),(1207,317,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(915,379,-100),(1207,317,-100),(1207,217,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1207,185,0),(1558,191,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,185,0),(1558,191,-
100),(1558,159,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1207,317,-100),(1207,217,-100),(1558,291,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1558,291,-100),(1558,191,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(1558,159,0),(2014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,159,0),(2014,33,-
100),(2014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(1558,291,-100),(1558,191,-100),(2014,133,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(1558,191,-100),(2014,133,-100),(2014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(2014,1,0),(3014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,1,0),(3014,33,-
100),(3014,1,0)],material='pFacetMat',color=color))
#paredvertical
O.bodies.append(facet([(2014,133,-100),(2014,33,-100),(3014,133,-
100)],material='pFacetMat',color=color))
O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(3014,133,-100),(3014,33,-
100)],material='pFacetMat',color=color))

#BARRERA MÒVIL
Barrera1 = O.bodies.append(facet([(412,706,-
100),(412,706,200),(412,635,0)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera2 =
O.bodies.append(facet([(412,706,200),(412,635,0),(412,635,100)],materi
al='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera3 =O.bodies.append(facet([(412,756,-
100),(412,706,200),(412,706,-
100)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))
Barrera4 =O.bodies.append(facet([(412,756,200),(412,706,-
100),(412,706,200)],material='pFacetMat',color=[255,0,0]))

####material para barreras

### PARAMETERS ###

```

```

phib=50
Eb=3.*1e8
colorb=[255,0,0]
rb=0.005

### MATERIAL para barrera ###
O.materials.append(
                                FrictMat(
young=E,poisson=0.3,density=2650,frictionAngle=radians(phib),label='pF
acetBarrera'))

#PARED ABAJO
O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,151,100),(3014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,1,0),(3014,1,100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,151,100),(3014,183,200),(3014,1,100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,183,200),(3014,1,100),(3014,33,200)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

O.bodies.append(facet([(3014,183,-100),(3014,151,0),(3014,33,-100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
O.bodies.append(facet([(3014,151,0),(3014,33,-100),(3014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

#creaci3n de barreras

#barrera 2
Barrier2
                                =O.bodies.append(facet([(1207,217,-100),(1207,217,200),(1207,185,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
barrier2=
O.bodies.append(facet([(1207,217,200),(1207,185,0),(1207,185,100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

#barrera 3
Barrier3=
                                O.bodies.append(facet([(2014,33,-100),(2014,33,200),(2014,1,0)],material='pFacetBarrera',color=colorb))
barrier3=
O.bodies.append(facet([(2014,33,200),(2014,1,0),(2014,1,100)],material='pFacetBarrera',color=colorb))

global amort
amort = 0.7
# create box with free top, and ceate loose packing inside the box
sp = pack.SpherePack()
sp.makeCloud((220,1020,120),(50,850,-10),rMean=rMean,num=NumParticulas)
sp.toSimulation(material='materialsph')
NumParticles=NumParticulas

```

```

#Definición de los motores de calculo

O.engines=[
    ForceResetter(),
    InsertionSortCollider([Bo1_Sphere_Aabb(),Bo1_Facet_Aabb()]),
    InteractionLoop(
        # handle sphere+sphere and facet+sphere collisions
        [Ig2_Sphere_Sphere_ScGeom(),Ig2_Facet_Sphere_ScGeom()],
        [Ip2_FrictMat_FrictMat_FrictPhys()],
        [Law2_ScGeom_FrictPhys_CundallStrack()]
    ),
    NewtonIntegrator(gravity=(0,-9.81,0),damping=amort),
    # call the checkUnbalanced function (defined below) every 2 seconds
    PyRunner(command='checkUnbalanced()',realPeriod=2,
label='checker')
]

# set timestep to a fraction of the critical timestep
# the fraction is very small, so that the simulation is not too fast
# and the motion can be observed
O.dt = .8 * PWaveTimeStep()

O.trackEnergy = True

# if the unbalanced forces goes below .1, the packing
# is considered stabilized, therefore we stop collected
# data history and stop
def checkUnbalanced():
    if O.iter < 5000 :
        return

#cuando las fuerzas se desbalancen
if unbalancedForce() < 0.05:
    O.bodies.erase(Barrera1)
    O.bodies.erase(Barrera2)
    O.bodies.erase(Barrera3)
    O.bodies.erase(Barrera4)
    O.pause()
    plot.saveDataTxt('tesis')
    plot.saveDataTxt('Fuerzab', vars= ('i','Fz'))

def addPlotData():
    # each item is given a names, by which it can be the used
    in plot.plots
    # the **O.energy converts dictionary-like O.energy to
    plot.addData arguments
    Fz1= O.forces.f(Barrier2)
    Fz2= O.forces.f(barrier2)
    Fzb2=Fz1+Fz2
    print(Fzb2)
    Fz3= O.forces.f(Barrier3)
    Fz4= O.forces.f(barrier3)

```

```
Fzb3=Fz3+Fz4
print(Fzb3)
plot.addData(Fzb2=Fzb2, Fzb3=Fzb3,i=0.iter,
unbalanced=unbalancedForce(), **O.energy)

plot.plots = {'i': ('unbalanced', None, O.energy.keys)}
plot.plot()
```