

Nombre del semillero de investigación

SEMILLERO DE INVESTIGACION SOLUM

Nombre del proyecto

CARACTERIZACION MECANICA DE LOS RESIDUOS MINEROS Y EVALUACION DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACION ESTATICA Y DINAMICA DE LAS PRESAS DE RELAVES MINEROS DE BURITICA Y CERRO MATOSO.

Año

2022

Marco del Proceso de ASC: Fortalecimiento o solución de asuntos de interés social.

Este semillero de investigación forma parte de la estrategia de Investigación Formativa de la Universidad EAFIT que ratifica su compromiso con el desarrollo de la Ciencia, la Tecnología, la Innovación y la Creación y lo establece como uno de sus ejes misionales. Con el desarrollo de iniciativas como estas, aportamos a los procesos científico-tecnológicos y creativos que se desarrollan en el seno de su comunidad universitaria y cómo estos permean las experiencias de aprendizaje de los estudiantes.

En el propósito de cultivar talentos y vocaciones científicas y creativas el rol del profesor es vital, ya que es quien desde su pasión, experiencia y conocimiento acerca a los estudiantes a las técnicas propias del saber científico y diseña experiencias de aprendizaje que aporten a la construcción de procesos investigativos.

En consonancia con los [Lineamientos de Investigación Formativa de la Universidad](#), se describe a continuación los principios que rigieron la ejecución del componente con sus resultados, en términos del fortalecimiento de asuntos de interés social, del presente proyecto:

Objetivos del semillero en clave de fortalecimiento de la práctica educativa

Además de los objetivos propios del proyecto de investigación, se busca: Potencializar e integrar conceptos teóricos y prácticos alrededor del campo de la geotecnia. Impulsar las habilidades investigativas y divulgativas de los integrantes del semillero.

MedellínNIT 890901389
Carrera 49 # 7 sur-50
(57) 604 261 95 00**Pereira**Carrera 19 # 12-70
Megacentro Pinares
(57) 606 321 41 15**Bogotá**Carrera 15 # 88-64
oficina 401
(57) 601 611 46 18**Llanogrande**Km 3.5 vía Don Diego –
Rionegro
(57) 322 529 4323

Metodología

Desde su inicio el semillero se planteó como una oportunidad para que los estudiantes se adentren al mundo de la investigación de una manera amena e ilustrativa, el objetivo se enmarca en el aprendizaje participativo, en el que los estudiantes desarrollan la capacidad de transformar lo aprendido en los laboratorios, reuniones y conferencias en un conocimiento adecuado que les permita apropiarse de lo que saben y poder compartirlo. El semillero de investigación SOLUM funciona con base en 5 ejes principales, estos son: 1. Equipo de modelación, conformado por estudiantes de sexto y último semestre de ingeniería civil. 2. Equipo de investigación, que cuenta con dos estudiantes egresados de ingeniería civil y geología, y con un estudiante de intercambio. 3. Equipo de laboratorio, cuenta con 5 estudiantes de sexto semestre de ingeniería civil, la encargada de este equipo se encuentra en octavo semestre. 4. Equipo de relaciones públicas (RP), este equipo cuenta con 3 integrantes, dos estudiantes de último semestre de ingeniería civil y una estudiante de sexto semestre, ella es la Community Manager del semillero y se encarga de la edición y preparación de piezas gráficas para su publicación. 5. Equipo de logística, donde están la profesora coordinadora, el profesor asesor, la estudiante coordinadora y los encargados de los 4 equipos mencionados.

Resultados obtenidos

En el presente estudio, se ha estudiado el relave minero de la mina de Buriticá, abarcando desde la caracterización física y mecánica hasta la modelación física del fenómeno de flujo. Esto permitió una comprensión de la susceptibilidad a la licuación de estos materiales bajo condiciones estáticas. La investigación subraya la importancia de adoptar prácticas sostenibles y seguras en la gestión de relaves mineros. Los hallazgos pueden contribuir a mejorar las estrategias de diseño y mantenimiento de las presas de relaves, reduciendo así el riesgo de accidentes y su impacto ambiental. Aunque se han logrado avances significativos, el proyecto identifica áreas para futuras investigaciones, como la necesidad de profundizar en la modelación computacional y física. Estos esfuerzos podrían optimizar aún más las estrategias de gestión de relaves mineros. La organización de la jornada técnica y la divulgación a través de redes sociales han jugado un papel en sensibilizar sobre la importancia de la gestión adecuada de los relaves mineros. Este enfoque ha fomentado una mayor conciencia pública y académica sobre los desafíos y soluciones en este ámbito.

Medellín

NIT 890901389
Carrera 49 # 7 sur-50
(57) 604 261 95 00

Pereira

Carrera 19 # 12-70
Megacentro Pinares
(57) 606 321 41 15

Bogotá

Carrera 15 # 88-64
oficina 401
(57) 601 611 46 18

Llanogrande

Km 3.5 vía Don Diego –
Rionegro
(57) 322 529 4323

Descripción del fortalecimiento, la solución o el mejoramiento de la práctica educativa

Se fortalecieron competencias de autoeficacia, trabajo en equipo, habilidades de comunicación oral y escrita, y competencias técnicas en el laboratorio y el análisis de resultados.

A partir de estas consideraciones, a continuación, se encuentra la sistematización del proceso.

Caracterización físico-mecánica de los residuos mineros para la evaluación de la susceptibilidad a la licuación estática y dinámica de las presas de relaves mineros de Buriticá y Cerro Matoso

Semillero SOLUM

Profesora coordinadora: Silvana Montoya Noguera

Estudiante coordinador: Jorge David Ortega - Diana Fernanda Yela Burbano

Participantes del proyecto 2022-1:

Santiago Arango, Carolina Arias, Sofía Blair, Sebastián Carrascal, Nicolle Garcés, Silvana Montoya, Estefanía Moreno, Sergio Luis Polo, Sebastián Tapias y Diana Yela.

Participantes del proyecto 2022-2:

Isabella Arango, Santiago Arango, Sofía Blair, Diego Isaza, Silvana Montoya-Noguera, Estefanía Moreno, Sergio Luis Polo, Jesús Ricaurte, Daniel F Ruiz, Rodrigo Sánchez (Practicante IAESTE), Tatiana Sánchez, Mateo Sepúlveda, Oscar Sierra, Silvana Montoya-Noguera, Daniel Tabares y Diana Yela.

Participantes del proyecto 2023-1:

Catalina Bustamante, Jorge David Ortega, Carolina Arias, Daniel Vásquez, María Clara Cárdenas, Gabriela Chacón, Juan Diego Bedoya, Harol Botero, Fabian Bellido, Juan Pablo Gonzales, Mariangel Silva, Miguel Ceballos, Karol Cifuentes, Sebastian Ibarra, Isabella García, José Ruiz, Jesús Mena, Juan Moreno, Silvana Montoya-Noguera, Sergio Luis Polo, Daniel F Ruiz y Diana Yela.

Participantes del proyecto 2023-2:

Alvaro Pulgarín, Elizabeth Barriga, Olivia Vulcano y los integrantes de 2023-1.

Grupo de Investigación: Mecánica Aplicada

Líneas de investigación: Mecánica Experimental y Riesgos Naturales

Vicerrectoría de Ciencia, Tecnología e Innovación

Universidad EAFIT

Fecha de entrega: 14 de febrero de 2024

Palabras clave:

Relaves Mineros; Licuación de flujo; Licuación dinámica; Caracterización mecánica; Caracterización física.

Resumen

En los proyectos de minería se extraen alrededor de 50 mil toneladas de roca al día, donde de cada tonelada se obtienen 5 gramos o menos de oro, lo restante se conoce como relave. Estos residuos son almacenados en más de 18.000 presas de relaves en el mundo con capacidad de alrededor de 200 millones de toneladas cada una (Lyu et al., 2019). Es importante mencionar que a lo largo de la historia han ocurrido accidentes graves debido a la falla de estas estructuras, pues son 6 a 14 veces más propensas a fallar que los embalses de agua (Emerman, 2018), ya que los relaves están sueltos y saturados, por lo que son susceptibles a la licuación. El objetivo de este proyecto es entender cómo funciona la licuación en estos materiales, mediante visitas de campo, la caracterización del comportamiento en el laboratorio y, finalmente, mejorar la mesa vibratoria para visualizar la licuación en estos suelos. Los resultados de este proyecto han sido serán difundidos a través de las redes sociales del semillero en Instagram como producto de participación ciudadana, también se organizó una jornada técnica de relaves mineros en la Universidad EAFIT con el apoyo de la especialización en Mecánica de Suelos y Cimentaciones y la empresa SRK. Además, se presentará un artículo de divulgación en el formato de Apropiación Social de Conocimiento (WP). Estos resultados sensibilizan a la comunidad académica y a la sociedad sobre los relaves mineros y la importancia de la investigación para mitigar futuros desastres en la industria.

Introducción

La minería es una actividad económica de gran relevancia a nivel mundial, ya que proporciona las materias primas necesarias para el desarrollo de la sociedad. En este proceso de extracción, refinación y producción mineral se generan residuos conocidos como relaves mineros que se depositan en presas que, a menudo, carecen de funcionalidad y actúan como depósitos inactivos de material inerte. Conforme las sociedades evolucionan, aumenta la demanda de productos derivados de la minería para satisfacer las necesidades y mejorar la calidad de vida. Como resultado, se hacen cada vez más proyectos de extracción minera, generando más residuos. Se estima que a nivel global se producen anualmente 14 billones de toneladas de residuos (Jones & Boger, 2012, como se citó en Gou et al., 2019). Durante el período comprendido entre 2012 y 2015, la empresa minera Randgold Resources (2015) generó aproximadamente 80.4 millones de toneladas de roca estéril y 1.24 millones de m³ de relaves en la mina Tongon ubicada en Costa de Marfil. Estos desechos fueron almacenados en depósitos de relaves en las proximidades de la mina.

Según la investigación realizada por Sako et al. (2018) se ha encontrado que algunos de estos desechos mineros contienen metales pesados, sulfuros y residuos de productos químicos utilizados durante el proceso de extracción. Estos desechos, ubicados en las presas, están expuestos a la escorrentía y a procesos atmosféricos que pueden resultar en su contacto con el agua y su oxidación. Como consecuencia, se generan filtraciones que representan un riesgo para la calidad del suelo y las fuentes de agua superficial y subterránea, planteando preocupaciones ambientales significativas (Dhakate et al., 2008).

A pesar de que se estima que existen más de 18.000 presas de relaves en el mundo (Lyu et al., 2019), el conocimiento sobre su comportamiento y uso ha sido limitado en la investigación. Las presas de relaves son estructuras propensas a fallas, y esto depende en gran medida del método de construcción utilizado. Las causas de falla están relacionadas con problemas en la gestión de filtraciones, fallas estructurales y eventos sísmicos (Lyu et al., 2019). Un ejemplo impactante de los riesgos asociados con las presas de relaves es el colapso de la mina de cobre y oro de Mount Polley, que resultó en la liberación de 24 millones de m³ de relaves mineros tóxicos en el lago Quesnel, el arroyo Hazeltine y el lago Polley. Este incidente ocurrió debido a una falla estructural en los cimientos de la presa, lo que resultó en daños ambientales irreparables para la biodiversidad de la zona (School of Natural Sciences and Psychology et al., 2016).

No se conoce el número exacto de presas de relaves en Colombia. La información disponible indica que hay 10 presas distribuidas en diferentes departamentos del país, como Antioquia, Risaralda, Córdoba, Santander, Chocó y Tolima. Estas presas de almacenamiento de relaves representan preocupación e incertidumbre en términos de gestión y seguridad, debido a los riesgos asociados a su funcionamiento y posibles fallas, así como la cercanía entre la zona de explotación y deposición de relaves y los municipios o comunidades cercanas (Emerman, comunicación personal, 2019). Durante los últimos tres años de operaciones, se estima que la mina de Buriticá, ubicada en Antioquia, ha depositado alrededor de 2 millones de toneladas de residuos en su presa. Estos residuos pueden incluir material estéril, relaves mineros y otros subproductos del proceso de extracción del mineral (Ariza A, comunicación personal, 2023).

Según (Emerman, 2018), la probabilidad de falla en las presas de relaves es entre 6 y 14 veces mayor que en las presas de agua. Esto se debe a que el material depositado en las presas de relaves es una combinación de suelo y roca que ha sido sometido a procesos químicos durante la extracción mineral. Además, la cantidad de agua presente en estos materiales es proporcional a la altura de la presa. Los costos operativos asociados a las presas de relaves suelen ser bastante altos.

Algunas minas como la mina de Buriticá en Colombia tienen contemplado utilizar el 50% del relave originado en retro llenado, es decir, se utilizará relave mezclado con roca estéril para el cierre progresivo de las bocaminas y ductos del sistema de ventilación. El 50% restante se almacena en depósitos de relaves (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2017). En este documento, se propone un estudio de la caracterización física y mecánica de los relaves mineros de la mina de Buriticá en Antioquia, con el objetivo de evaluar su susceptibilidad a la licuación estática y dinámica. El trabajo comienza con una contextualización del problema, seguido de la presentación de los resultados obtenidos a través de enfoques de modelación y pruebas de laboratorio. Además, se destaca la contribución a la divulgación y apropiación social del conocimiento mediante eventos como la Jornada Técnica de Relaves Mineros y la participación en redes del semillero.

Planteamiento del Problema

La fuerte demanda de materias primas y combustibles en los últimos años ha incrementado las necesidades humanas de recursos naturales, creando nuevas exigencias en el desarrollo de mecanismos sostenibles para la extracción de éstas. En este orden de ideas, los relaves mineros son residuos derivados del proceso de minería que no tienen ningún valor económico, se caracterizan según el tipo de minería implementada y para su manejo se deben utilizar diferentes métodos con sustancias tóxicas. Así, un mecanismo de almacenamiento de agua y de desechos mineros son las presas de relaves, más conocidas por sus fallas de grandes magnitudes que afectan el medio ambiente y la vida de las personas.

Hoy en día, Colombia cuenta con una normativa para la construcción y aseguramiento de la calidad de las presas de relaves mineros. Evaluar el comportamiento mecánico de estos materiales contribuye a predecir y evitar posibles colapsos en las presas de relaves. Este proyecto propone clasificar y evaluar el comportamiento de los relaves de dos minas muy importantes en Colombia, la mina Buriticá, Antioquia y de Cerro Matoso, Córdoba.

Por lo tanto, esta propuesta busca justificar la importancia de estudiar más de cerca las presas de relaves para entender su comportamiento. A partir de ensayos de laboratorios y modelación física implementando una mesa vibratoria se complementarán los conceptos adquiridos del semillero, con miras a analizar la susceptibilidad a la licuación de los relaves.

Casos de estudio evaluados

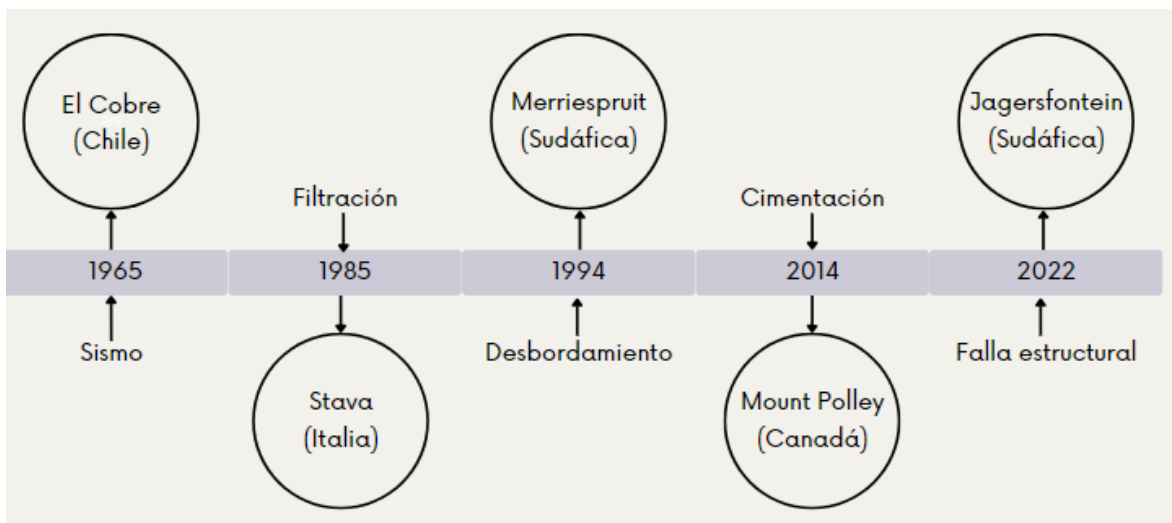


Ilustración 1. Falla de diferentes tipos de presas de relaves en varios países (Lyu et al., 2019)

Estos casos de estudio destacan la importancia de comprender y gestionar los riesgos asociados a las estructuras de almacenamiento de residuos mineros. En 1965, la falla de la mina El Cobre en Chile, causada por la licuefacción sísmica durante un sismo de 7.4 grados Richter, resultó en una tragedia con 200 a 300 vidas perdidas y graves daños (<https://bit.ly/3O5j7s2>). La presa de la mina STAVA en Italia en 1985 sufrió una falla por filtración, con 268 muertos y 71 edificaciones

destruidas (Rojas Luis, 2010). En Sudáfrica, la falla de la mina Merriespruit en 1994, debida al desbordamiento, dejó 17 personas fallecidas y 80 casas arrasadas (<https://bit.ly/3MnzwXw>). El incidente de Mount Polley en Canadá en 2014, causado por una falla en los cimientos, resultó en un daño ambiental significativo debido a la liberación de 24 millones de metros cúbicos de residuos (Meissner D, 2019). Finalmente, la falla de la mina Jagersfontein en Sudáfrica en 2022, debida a una falla estructural, causó la muerte de 3 personas y la destrucción de 160 viviendas (Torres-Cruz L, 2022). Estos eventos subrayan la importancia de la gestión adecuada de las estructuras mineras y la necesidad de medidas de prevención y control de riesgos efectivas.



Falla de Mount Polley (Meissner D, 2019)

Falla de mina Jagersfontein (Torres-Cruz L, 2022)

Ilustración 2 Impacto de las fallas de presas de relaves

Objetivo general

El objetivo general del proyecto es caracterizar el comportamiento mecánico de muestras extraídas de las presas de relaves de Buriticá y Cerro Matoso para evaluar la susceptibilidad a la licuación estática y dinámica.

Objetivos específicos

- Realizar una visita de campo para obtener las muestras de suelo de la presa de relaves de Buriticá y conocer el manejo de residuos dentro de la mina.
- Ejecutar los ensayos de mecánica de suelos sobre las muestras obtenidas para clasificar y caracterizar el comportamiento mecánico de estos materiales.
- Determinar las condiciones críticas que se requieren para inducir la licuación estática y dinámica con estos suelos a partir de la modelación física en una mesa vibratoria y la modelación computacional en Midas GTS NX y Slide 2D.

Además de los objetivos propios del proyecto de investigación, se busca:

- Potencializar e integrar conceptos teóricos y prácticos alrededor del campo de la geotecnia.
- Impulsar las habilidades investigativas y divulgativas de los integrantes del semillero.

Marco Teórico

Los residuos de la industria minera, mezclas de minerales con agua y otros compuestos químicos, son conocidos como relaves. Estos se transportan hasta grandes espacios, presas de relaves, donde se depositan y tratan para recuperar el agua permitiendo su recirculación. Es importante aclarar que el material restante, en su mayoría suelos finos, se quedará allí para siempre (Minenergía, 2021). A pesar de que este sistema es utilizado en muchos países, desde el año 2000 se han registrado 106 accidentes, siendo Estados Unidos y Canadá los países con mayores registros (Islam y Murakami, 2021). Los mismos autores aclaran que probablemente muchos accidentes no son reportados, en especial en países en vías de desarrollo. Según el geólogo Julio Fierro Morales (2019), “el 84% de las presas de relaves falla sin que se haya presentado detonantes, es decir, como un sismo o una tormenta”, también menciona la importancia de estudiar los cambios fisicoquímicos que ocurrirán en cientos o miles de años.

En este orden de ideas, como en Colombia hay presas de relaves en funcionamiento en Antioquia, Chocó, Córdoba, Tolima y Santander, se han implementado consideraciones geotécnicas en los estudios de impacto ambiental que regulan la construcción de estas estructuras. Al ser una gran acumulación de suelo muy húmedo, de tamaños pequeños (como arenas finas, limos, arcillas), mal gradados, sin cohesión ni plasticidad tiene gran susceptibilidad a la licuación. Además, al construir la presa de manera acelerada y con baja compactación, el potencial de licuación es aún mayor. De ahí la importancia de la caracterización y análisis mecánico de estas presas. Se debe estudiar su comportamiento frente a la evolución de los esfuerzos efectivos y su resistencia al corte en miras de evitar posibles fallas (Sernageomin, 2018).

El municipio de Buriticá se encuentra localizado en el departamento de Antioquia. Es un municipio cuya superficie abarca 368 km² y su altitud media es de 1625 msnm. Presenta una temperatura promedio entre los 18°C y 27°C. Limita por el Norte con el municipio de Peque, al Sur con Santa Fe de Antioquia y Giraldo; por el Oriente con Sabanalarga y Liborina y por el Occidente con Cañasgordas (Municipio de Buriticá, 2021). Respecto a la geología de la zona, el basamento está dominado por basaltos del Cretáceo, con cuerpos de gabros y ultramáficos. La mina de Buriticá, a 2 km del casco urbano, está ubicada en el cinturón del alto mioceno del Medio Cauca, uno de los tres cinturones de mayor contenido de oro en Colombia. La mina tiene una explotación esperada de 17 años, con 66 títulos concedidos sobre un área de 62 mil hectáreas. La presa de relaves tendrá un volumen total de 16.7Mt y 40m de altura. Por otro lado, la mina de ferroníquel de Cerro Matoso está situada en el departamento de Córdoba. Es parte de unos cuerpos de roca alineados con la Falla del Romeral, una de las más importantes del país, ya que se extiende por Colombia por más de 800 km donde se presentan amenazas y riesgos sísmicos a lo largo del terreno atravesado.

En el semillero tomaremos muestras para realizar ensayos y obtener las propiedades básicas de estos materiales. En lo que respecta a la caracterización se realizarán ensayos con hidrómetro y límite líquido y plástico específicamente para suelos finos, por el lado de suelos gruesos se estudiará su granulometría y su capacidad de compactación. Para el análisis del comportamiento mecánico se llevarán a cabo ensayos triaxiales estáticos y dinámicos con el objetivo de observar

la resistencia del suelo ante cargas axiales y cortantes (Islam, 2021). También, siguiendo la metodología de Varghese & Latha (2014), se utilizará la mesa vibratoria para determinar los factores críticos que conducen a la licuación estática y dinámica, observando así la respuesta ante flujos y cargas sísmicas.

Justificación

Se estima que a nivel mundial existen aproximadamente 18000 presas de relaves mineros, lamentablemente en estas se han presentado graves accidentes, reportándose de 2 a 5 fallas por año y de 10 a 100 veces más fallas que en presas de embalses de agua (Lyu et al., 2019). De hecho, las fallas de los relaves son, por lo general, repentinas y se generan sin que se presenten detonantes como sismos o tormentas, ya que están relacionadas al fenómeno de licuación estática (Lyu et al., 2019). En Colombia existen normativas asociadas a los estudios de impacto ambiental para la construcción y el aseguramiento de la calidad de los relaves mineros.

Según varios estudios realizados con tecnología moderna en los últimos años, se han presentado diferentes fallas de relaves mineros, algunas de ellas son la de Stava-Italia (1985), la cual falló debido a un diseño deficiente y una presión de agua externa, donde fallecieron 269 personas y se destruyeron más de 60 edificios. También en Los Frailes-España (1998), la cual derrumbó una sección de 50 metros de pared de la represa contaminando el Río Agrio y ríos adyacentes de tierras de cultivo, lo que produjo que se perdieran 5000 puestos de trabajo. Otro caso fue el de Kolontár-Hungría (2010) donde se derrumbó el relave por una serie de fuertes lluvias e inundó las ciudades cercanas, donde fallecieron 10 personas y 120 resultaron heridas. Uno de los casos más recientes ocurrió en Brumadinho, Brasil, donde fallecieron 270 personas, se destruyeron poblados y fueron contaminadas grandes fuentes de agua (Islam & Murakami, 2021). Aunque no hay cifras oficiales de las fallas mundiales, es vital evitar estos eventos, porque, además de generar contaminación ambiental, se vulnera la salud y la seguridad de la población por la contaminación de agua y suelo, que causan consecuencias catastróficas.

Las actividades mineras benefician tanto al país como a los pueblos aledaños, pero si no se cumplen las normas de seguridad y no se cuidan adecuadamente, pueden colapsar y traer graves consecuencias. Por eso es necesario cumplir con los debidos requisitos para su construcción. En el proyecto compararemos los relaves de dos zonas de estudio: (1) la mina de Buriticá, Antioquia, la cual es la mina más grande de oro de Colombia y (2) la mina de Cerro Matoso, Córdoba, que es una de las minas de níquel a cielo abierto más grande del continente y la cuarta más grande del mundo. Escogimos estas dos minas debido a la disponibilidad del material proporcionado por la empresa SRK, aliada en este proyecto.

Metodología

La propuesta de investigación se basa en una metodología de tipo experimental, la cual se evidencia en el desarrollo de conocimiento y análisis de resultados. Estos parten de la labor de los semilleros a través de las distintas actividades que se realizaron, tanto en campo, como en el

laboratorio y en la parte de modelación física y computacional. Todo esto para que el fenómeno físico analizado se aborda desde múltiples perspectivas y que con la experiencia sea más entendible.

Relación de la participación de estudiantes en el proyecto

Desde su inicio el semillero se planteó como una oportunidad para que los estudiantes se adentren al mundo de la investigación de una manera amena e ilustrativa, el objetivo se enmarca en el aprendizaje participativo, en el que los estudiantes desarrollan la capacidad de transformar lo aprendido en los laboratorios, reuniones y conferencias en un conocimiento adecuado que les permita apropiarse de lo que saben y poder compartirlo.

El semillero de investigación SOLUM funciona con base en 5 ejes principales, estos son:

1. Equipo de modelación, conformado por estudiantes de sexto y último semestre de ingeniería civil.
2. Equipo de investigación, que cuenta con dos estudiantes egresados de ingeniería civil y geología, y con un estudiante de intercambio.
3. Equipo de laboratorio, cuenta con 5 estudiantes de sexto semestre de ingeniería civil, la encargada de este equipo se encuentra en octavo semestre.
4. Equipo de relaciones públicas (RP), este equipo cuenta con 3 integrantes, dos estudiantes de último semestre de ingeniería civil y una estudiante de sexto semestre, ella es la Community Manager del semillero y se encarga de la edición y preparación de piezas graficas para su publicación.
5. Equipo de logística, donde están la profesora coordinadora, el profesor asesor, la estudiante coordinadora y los encargados de los 4 equipos mencionados.

Relación de vínculos internacionales desarrollados en torno al proyecto

El semillero cuenta con un convenio marco con la empresa SRK consulting, quienes se encargan de proveer las muestras de las minas “Buriticá” y “Cerro Matoso”, material bibliográfico, además del apoyo en la conceptualización del problema.

Organizaciones participantes:

SRK Consulting Group: Colaborador.

SRK ejerce una consultoría independiente, internacional que proporciona asesoría especializada y soluciones, principalmente en las industrias de recursos de la tierra y el agua. El semillero ha tenido diversos acercamientos a esta a través del Ing. Alejo Sfriso, quien ha proporcionado asesorías y charlas en temas relacionados a la geotecnia.

Línea de investigación: relaves mineros, riesgos naturales

Mina Cerro Matoso: Colaborador.

La mina Cerro Matoso es una de las minas de ferróníquel más grandes del mundo. Ha dado muestras de suelo de relave de los residuos mineros para que el semillero SOLUM se caracterice mediante el conocimiento de Mecánica de suelos básicos.

Línea de investigación: relaves mineros.

Resultados

Laboratorio: Ensayos de caracterización física

El material de relave es originario de la mina de Buriticá, ubicada en la faja media del río Cauca al noroccidente de Medellín. La mina se dedica actualmente a la explotación de doré.

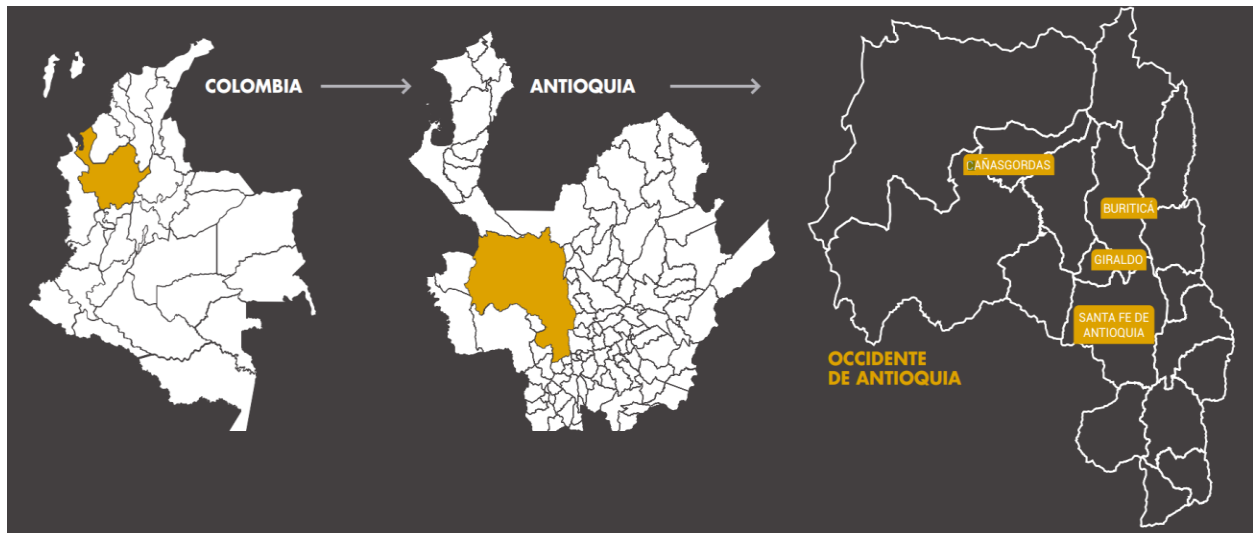


Ilustración 3. Ubicación de la mina de Buriticá. Zijin Mining Group Co., Ltd. & Continental Gold Inc. (2021).

Tabla 1. Resumen parámetros obtenidos en ensayos de clasificación de suelos.

N°	Ensayo	Masa (g)	Parámetros	Valor					
1	Humedad	1500	%w	0.24	0.23	0.23	-	-	-
2	Lavado de material	11.2	%Gruesos y %Finos	97% fino	3% grueso	-	-	-	-
3	Descripción e identificación de suelos	30	Gruesos	*					
		Puñado	Finos	**					
4	Contenido de materia orgánica	45	OT%	4%	4%	4%	-	-	-
5	Gravedad específica	50	Gs	3.38	3.35	3.25	3.31	3.28	-
6	Granulometría por tamizado	115	Curva granulométrica	D ₁₀ = NA	D ₃₀ = NA	D ₆₀ = NA	c _u = NA	c _c = NA	-
7	Límite líquido	100	LL	32%	-	-	-	-	-
8	Límite plástico	15	LP	21%	-	-	-	-	-
9	Granulometría por hidrómetro	60	Curva granulométrica resumen	-	-	-	-	-	-
10	Compactación Proctor estándar	12000	Peso unitario seco (kN/m ³)	16.19	16.53	16.53	17.01	17.45	16.48
			Humedad óptima (%)	2.37	7.13	12.89	17.43	20.24	26.17
	Compactación Proctor modificado	12000	Peso unitario seco (kN/m ³)	19.04	19.82	18.81	16.91	-	-
			Humedad óptima (%)	12.89	17.43	20.24	26.17	-	-
	Compactación Harvard miniatura	1500	Peso unitario seco (kN/m ³)	16.99	17.18	17.86	17.97	18.55	-
			Humedad óptima (%)	8.73	12.20	13.65	16.94	19.97	-

*Arena de color dorado grisáceo de grano fino con olor a sustancias químicas, humedad seca y tamaño máximo #200.

**Arcilla de baja plasticidad de color gris, seca y con olor a químico, con resistencia en seco media, dilatancia rápida, tenacidad y plasticidad media y consistencia en seco firme.

Con base en los ensayos de laboratorio, se puede determinar que el relave estudiado consiste en un 97% de material fino y un 3% de material grueso de tipo arena fina. La gravedad específica promedio del material es de 3.3, lo que indica que se trata de un material con presencia de metales pesados. El ensayo de consistencia y el análisis del porcentaje de suelo retenido en la malla 200 permiten concluir que el relave presenta características propias de un suelo fino granular de tipo limo de baja plasticidad ML, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Este análisis proporciona una descripción detallada del comportamiento y la composición del relave estudiado, lo que nos permite comprender mejor sus propiedades.

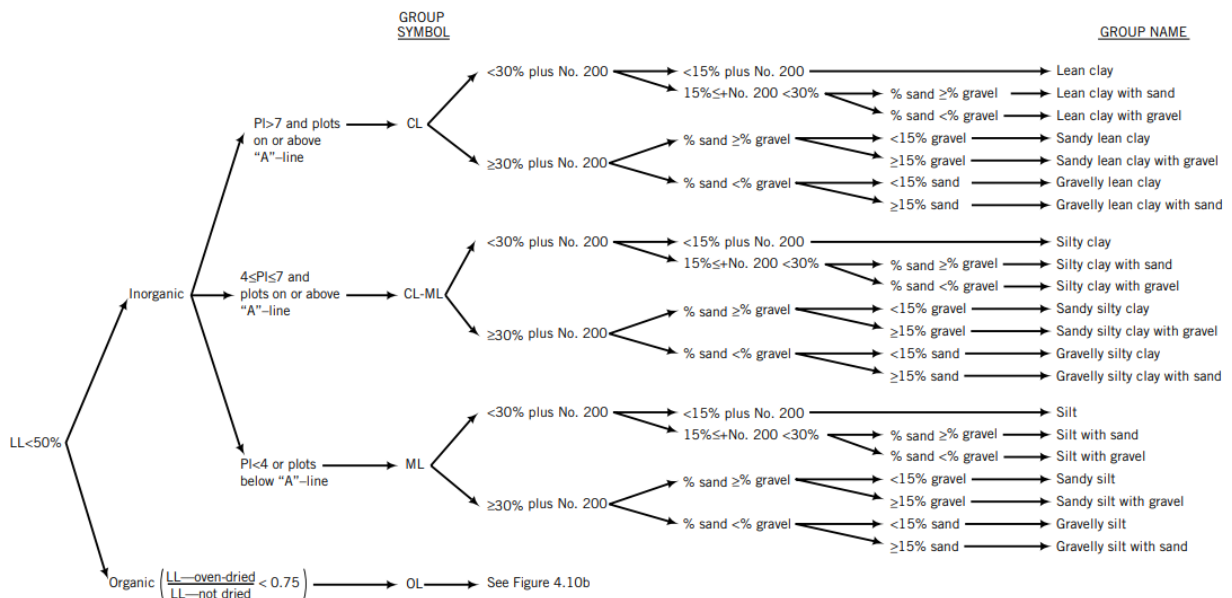


Ilustración 4. Clasificación unificada de suelos (SUCS) finos con $LL < 50\%$.

Granulometría:

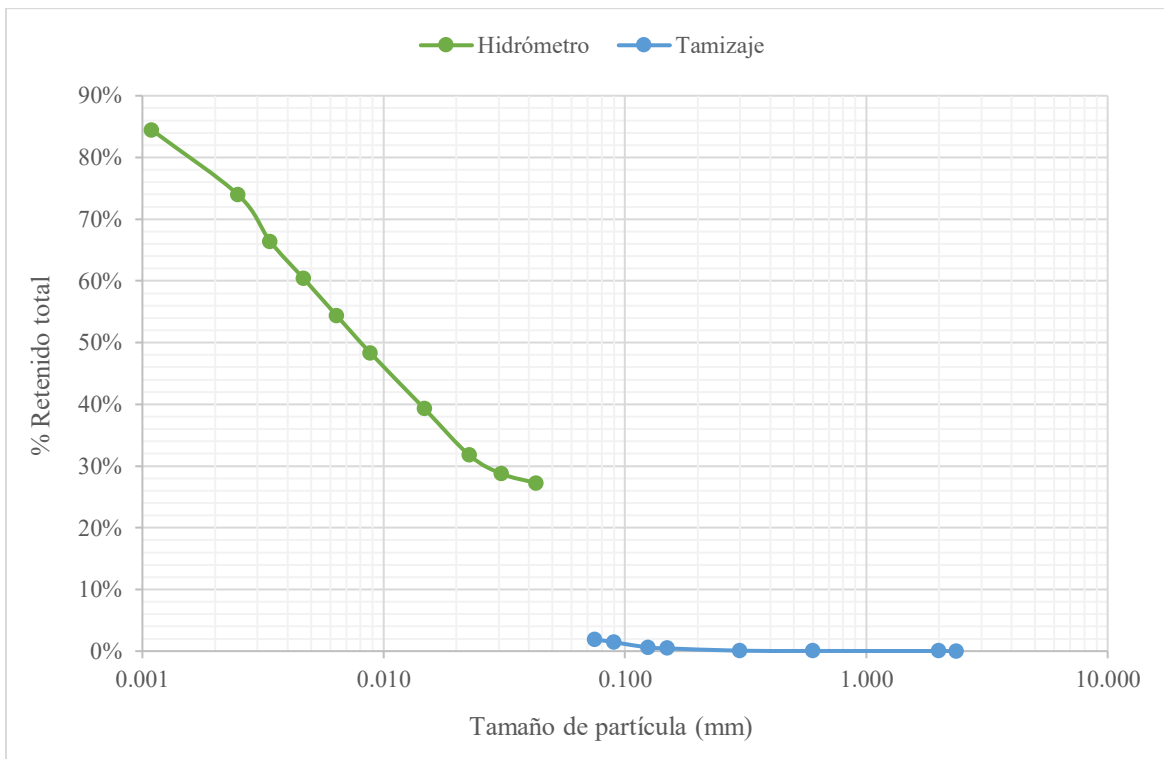
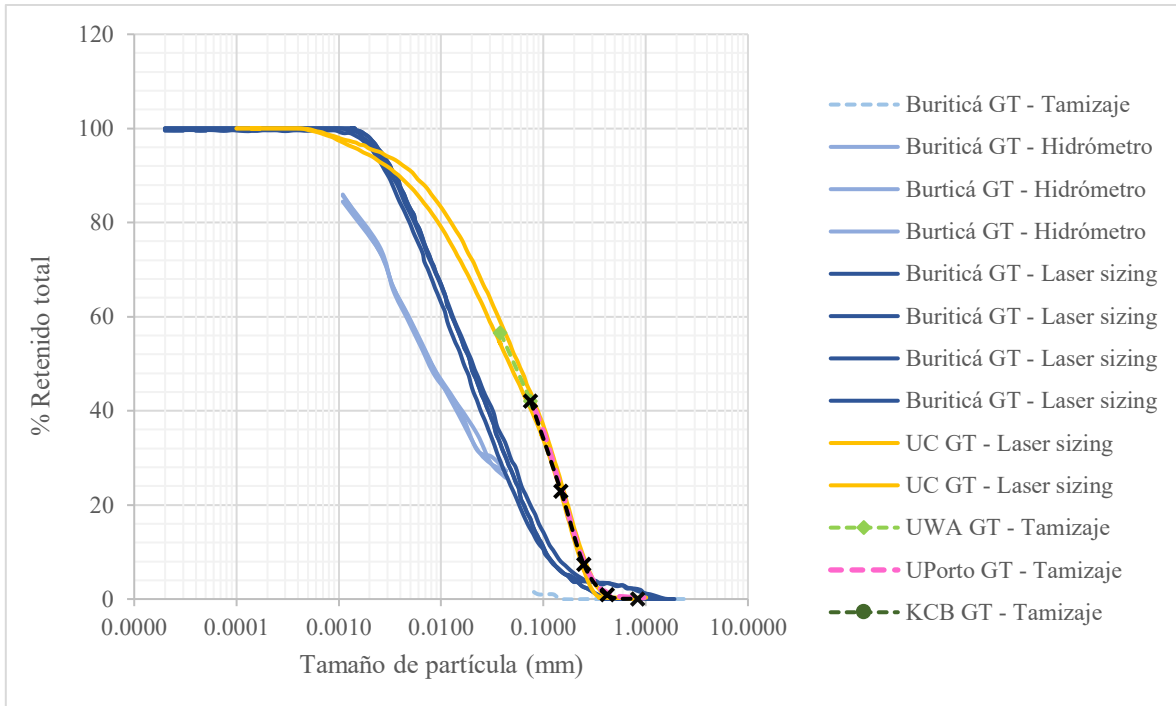


Ilustración 5. Curva granulométrica del relave de la mina de Burticá.

El espacio vacío entre las curvas se debe a la presencia de material en un rango de tamaño muy pequeño, entre 0.045 mm y 0.075 mm, que no puede ser fácilmente percibido cuando las partículas se segregan. Sin embargo, la distribución de tamaño de partícula a partir de interpretación laser, con la utilización del MasterSizer2000 es más precisa. Estos resultados son similares a las de otros relaves de oro (GT) de otros lugares en el mundo como se muestra en la figura.

Consistencia:

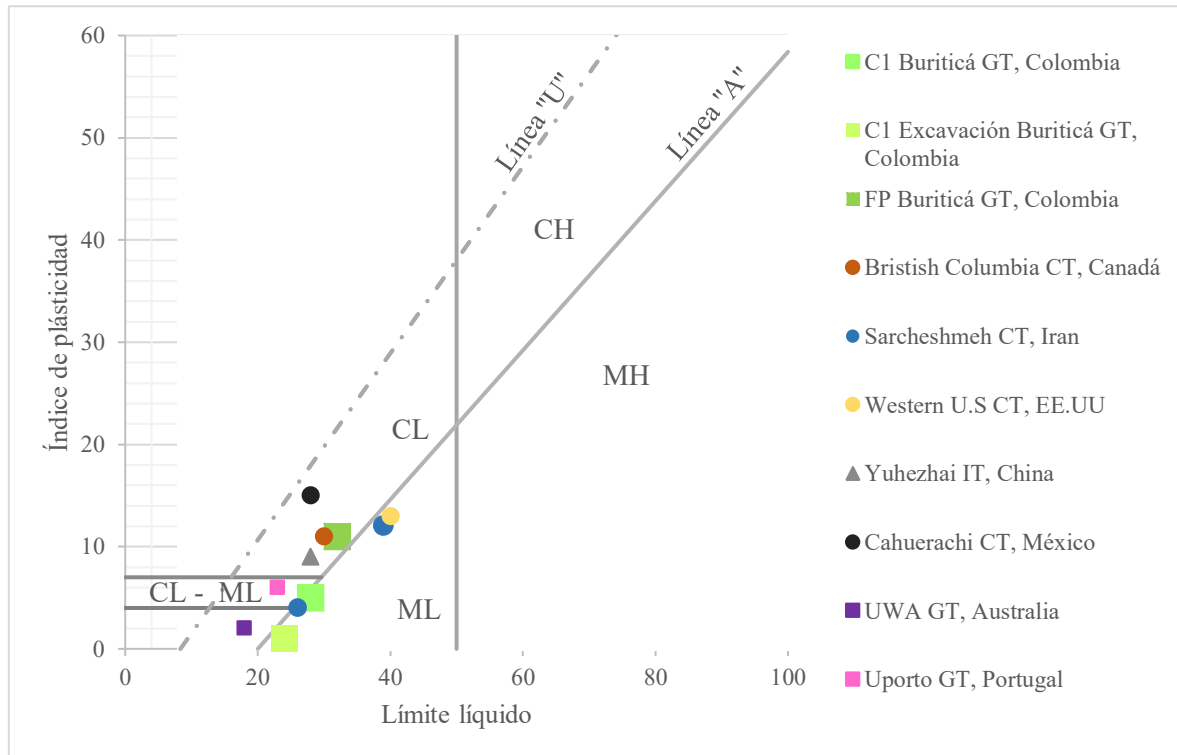


Ilustración 6. Carta de plasticidad. GT: Gold tailing, CT: Copper tailing, IT: Iron tailing.

Los límites de plasticidad nos permiten evaluar la consistencia del material a distintos niveles de contenido de humedad. En el caso del relave de la mina de Buriticá, los resultados muestran valores de límite líquido e índice de plasticidad inferiores a los que se suelen encontrar en arcillas comunes (Budhu, 2011). Según los resultados de tres muestras de relaves mineros de diferentes etapas de la presa de Buriticá, el material clasifica como un limo de baja plasticidad, ML. Esto indica que el material tiene una baja capacidad de expansión y es poco maleable. En consecuencia, el relave presenta una expansión lenta y limitada en el tiempo. Para comparar el comportamiento del relave con otros casos estudiados, se tomaron valores de los límites de relaves de minas de hierro (Hu et al., 2017) y cobre (Shamsai et al., 2007). Los resultados indican que la mayoría de los relaves alcanzan su límite líquido en contenidos de humedad similares, lo que sugiere un comportamiento similar entre ellos.

Compactación:

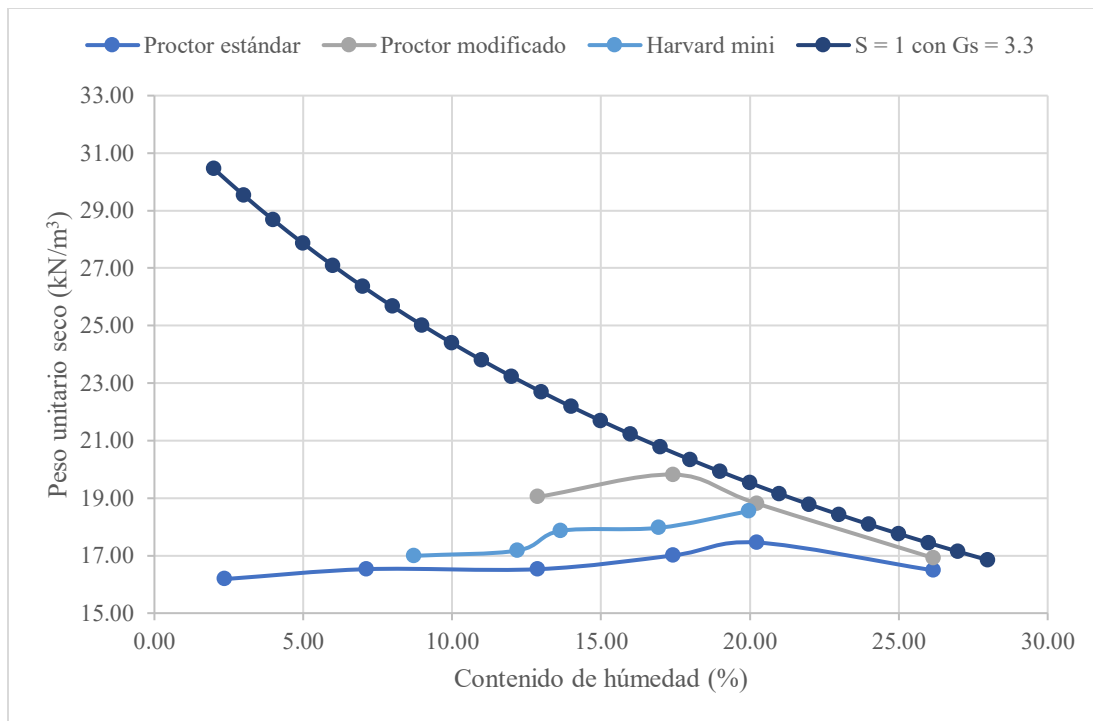


Ilustración 7. Curva de compactación del relave de la mina de Buriticá.

Se comparan los resultados de dos ensayos de compactación: el ensayo Proctor estándar y el ensayo Proctor modificado. Cabe mencionar que el ensayo de Harvard en miniatura no se considera, ya que la energía de compactación no está controlada. De acuerdo con la información presentada, la humedad óptima encontrada en el ensayo Proctor estándar es del 20.24%, mientras que en el ensayo Proctor modificado es del 17.43%. Según la literatura, la curva de compactación en el ensayo Proctor modificado se desplaza hacia arriba y a la izquierda por el aumento en la energía de compactación aplicada, lo que significa que la humedad óptima del suelo es menor y se obtiene una mayor densidad máxima. De hecho, se ha determinado que la densidad máxima en el ensayo Proctor modificado es 19.82 kN/m³ superior a la obtenida en el ensayo Proctor estándar, que fue de 17.45 kN/m³.

Modelación

Modelación numérica

En primera instancia, para familiarizar a los miembros del semillero con dos softwares de estabilidad de taludes y modelación geotécnica, ampliamente utilizados en el mercado, se realizaron cuatro tutoriales; dos sobre **Slide 2D** y dos sobre **MIDAS GTS NX**.

Estos tutoriales fueron:

Tutorial 1 - Introducción a Slide 2D: Se realizó una jornada didáctica del uso de la interfaz de usuario de Slide 2D y se realizó un ejemplo práctico con un talud para revisar ciertos

conceptos superficialmente como lo son los tipos de metodología de búsqueda de superficies de falla, tipos de falla, y propiedades de materiales para el análisis de estabilidad de taludes.

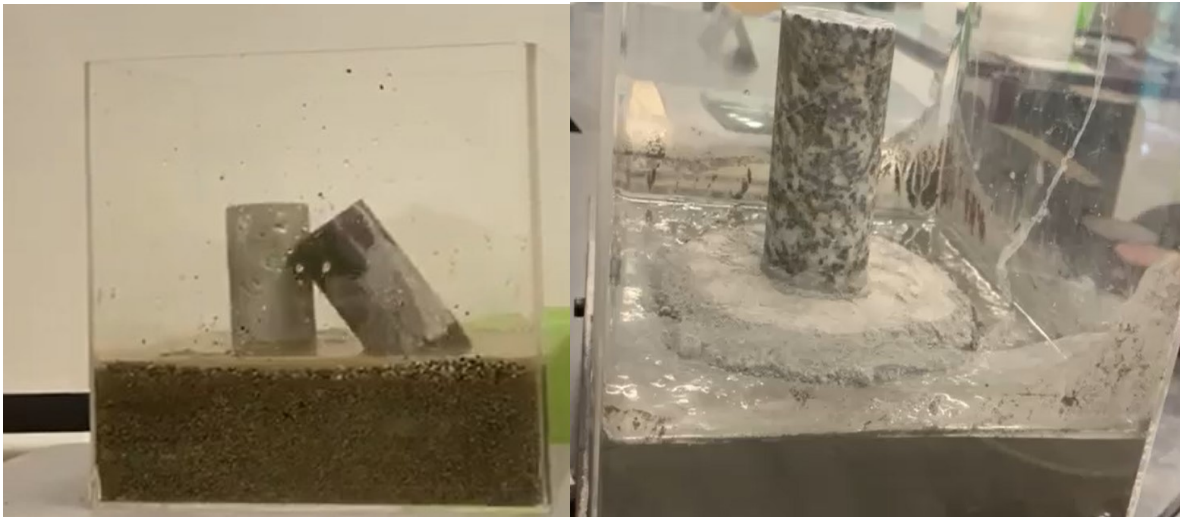
Tutorial 2 - Introducción a Slide 2D: Se profundizó en ciertos temas de relevancia para el análisis de estabilidad de taludes como lo es la optimización geométrica por medio de escenarios gracias a herramientas como el *Slope Angle Wizard*, el uso de refuerzos para estabilizar (en este caso el uso de anclajes de tipo tieback) y por último una introducción a la variabilidad espacial de las propiedades geotécnicas.

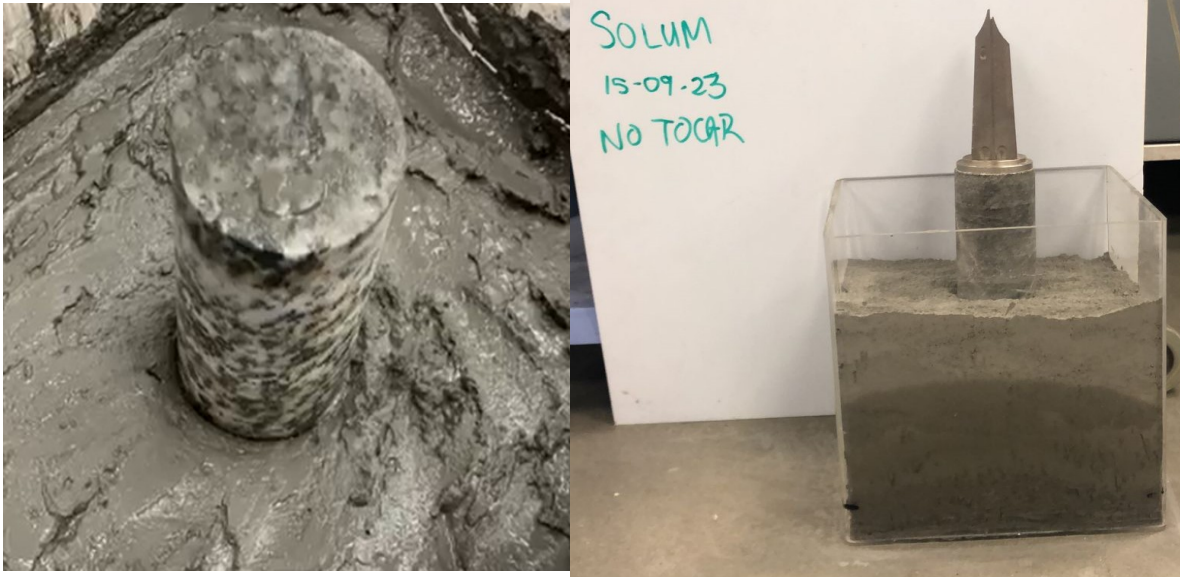
Tutorial 3 - Introducción a MIDAS GTS NX: Se realizó una expedición por la interfaz y las diversas funciones del programa de elementos finitos, además de resolver ciertos inconvenientes relativos a la instalación.

Tutorial 4 – LEM Estabilidad de Taludes: Se realizó un ejercicio práctico de estabilidad de taludes realizando un método similar al utilizado por Slide2D para generar un acercamiento más cómodo al programa.

Modelación física

Se modeló físicamente la licuación estática y dinámica del relave de Buriticá.





Charlas y conferencias internas:

Como parte de las actividades del semillero, se realizaron charlas y conferencias internas para incursionar en el mundo de la geotecnia y capacitar a los integrantes. El equipo de logística programó 4 charlas, acerca de:

- Presas de relave, dictada por el ingeniero Diego Cobos, Practice Lead en SRK consulting Colombia.
- Tesis de maestría y doctorado sobre el manejo de residuos nucleares del doctor en ingeniería Daniel F Ruiz.
- Proyecto de práctica enfocado en el análisis de estabilidad de taludes, por parte del estudiante de intercambio Rodrigo Sánchez.
- Presentación de revisión de casos de falla realizada por Diana Fernanda Yela Burbano y Daniel Vásquez en el semillero.

Igualmente, se han hecho proyectos como la cápsula del tiempo para el ISSMGE, enfocado en el análisis de la evolución durante los años de la geotecnia y el futuro de la geotecnia en Colombia.

Para que los integrantes del semillero se apunten a un mismo objetivo y considerando que los miembros son de diferentes semestres y puede que no todos manejen los mismos conceptos, el grupo de investigación dispuso la definición de conceptos básicos de geotecnia importantes para el desarrollo de las actividades propuestas en el semillero.

Adicionalmente, el grupo realizó el ejercicio de consultar y leer papers o libros que puedan ser útiles y sirvan como base para el desarrollo del proyecto. Se creó un banco de artículos/libros a disposición del grupo para incentivar la lectura y que el grupo se familiarice con estos documentos.

Salidas de campo

- Visita de campo para entender el manejo de los residuos sólidos de Medellín.

El semillero realizó una salida de campo al relleno sanitario La Pradera, sitio destinado para la deposición de residuos del área metropolitana del Valle de Aburrá. Ahí se trataron temas relacionados con el manejo de residuos sólidos, los sistemas de drenaje que se construyeron en el relleno y el estudio del impacto ambiental del mismo.



- Visita de campo a la mina de Buriticá

Durante el semestre 2022-1 hubo varias dificultades para materializar nuestra salida de campo a la mina de Buriticá, teniendo en cuenta que aún en el sector se cuentan con varias restricciones de acceso a visitas académicas debido a restricciones impuestas por la empresa y a problemas de orden público. Lo que dificultó la toma de muestras para realizar los ensayos de laboratorio propuestos inicialmente.

El 17 de mayo de 2023 se realizó la salida de campo con 15 estudiantes integrantes del semillero y dos profesoras: Lina Lorenzoni, de la Escuela de Derecho, y Silvana Montoya, coordinadora del semillero.



En el semestre 2022-2 se realizaron actividades relacionadas con divulgación científica a través de redes sociales como también dentro de la universidad, se continuó con la clasificación del suelo de relave y con su caracterización mecánica en los laboratorios de la universidad, así que los estudiantes involucrados en este equipo se acercaron más al tema estudiado. Como metodología para entender de manera óptima los ensayos de laboratorio, se realizó una actividad llamada “Mecánica de la comida” que permite introducir al equipo a la evaluación de las propiedades geotécnicas a partir de un material conocido por ellos. La presentación que se utiliza actualmente en la clase de Mecánica de Suelos Aplicada [está aquí](#).



Se obtuvieron resultados de ensayos de mecánica de suelos sobre las muestras recolectadas, lo que permitió la clasificación y caracterización del comportamiento mecánico de estos materiales. Después, se preparó la modelación física en una mesa vibratoria, y la modelación computacional con herramientas como midas GTS NX y Slide2. Además, se realizaron charlas, conversatorios y exposiciones para fortalecer los conceptos teóricos y prácticos en la geotecnia. La iniciativa buscaba impulsar las habilidades investigativas y divulgativas de los integrantes del semillero, mediante la asignación de tareas y la realización de exposiciones internas.

Productos

1. AP: Actividad de Apropiación Social del Conocimiento, Evento científico con componente de apropiación

Jornada Técnica de Relaves Mineros:

Este evento se realizó presencial en la Universidad EAFIT en Medellín los días 25 y 26 de mayo de 2023. Contó con la participación de invitados nacionales e internacionales, expertos reconocidos mundialmente en temas como el impacto ambiental, la seguridad y la responsabilidad de los ingenieros, el monitoreo y la modelación en el campo de la minería. Como parte del evento, se ofreció el curso “Una breve introducción a la elastoplasticidad” dictado por el Doctor Miguel Mánica, investigador asociado de la Universidad Nacional Autónoma de México, el jueves 25 de mayo en la tarde.

La jornada técnica estuvo dirigida a estudiantes y profesionales en ingeniería civil, geotécnica y geológica, y todas las personas interesadas en los avances en el diseño, análisis y seguimiento de proyectos mineros.

El evento fue gratuito y se entregaron certificado de asistencia a las personas que participaron ambos días. Este evento fue organizado por el semillero de investigación SOLUM y contó con el apoyo de SRK Consulting Colombia y la especialización en Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Contamos con más de 350 asistentes presenciales y virtuales. Los videos están disponibles en una lista de reproducción en el canal de la Universidad en YouTube: <https://youtube.com/playlist?list=PLZK50pBaIIInqE0P7Zv3IivKbxYD6RE23y>.

Las diapositivas compartidas por algunos de los expositores están aquí: <https://shorturl.at/eyAS8>.

La empresa Midas GTS NX patrocinó las camisas de los estudiantes del semillero que organizaron el evento. También brindó un taller de elementos finitos para modelar una presa de relaves construida con el método aguas arriba.





El día previo a la jornada técnica de relaves mineros, el semillero organizó un taller de métodos de elementos finitos enfocada en la modelación de una presa de relaves con el método aguas arriba. Este taller de 3 horas fue realizado por María Isabel Marín de Midas Latinoamérica.

UNIVERSIDAD EAFIT | Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería

Taller de Métodos de Elementos Finitos
Presa de Relaves con el método aguas arriba

MIDAS
 Modeling, Integrated Design & Analysis Software

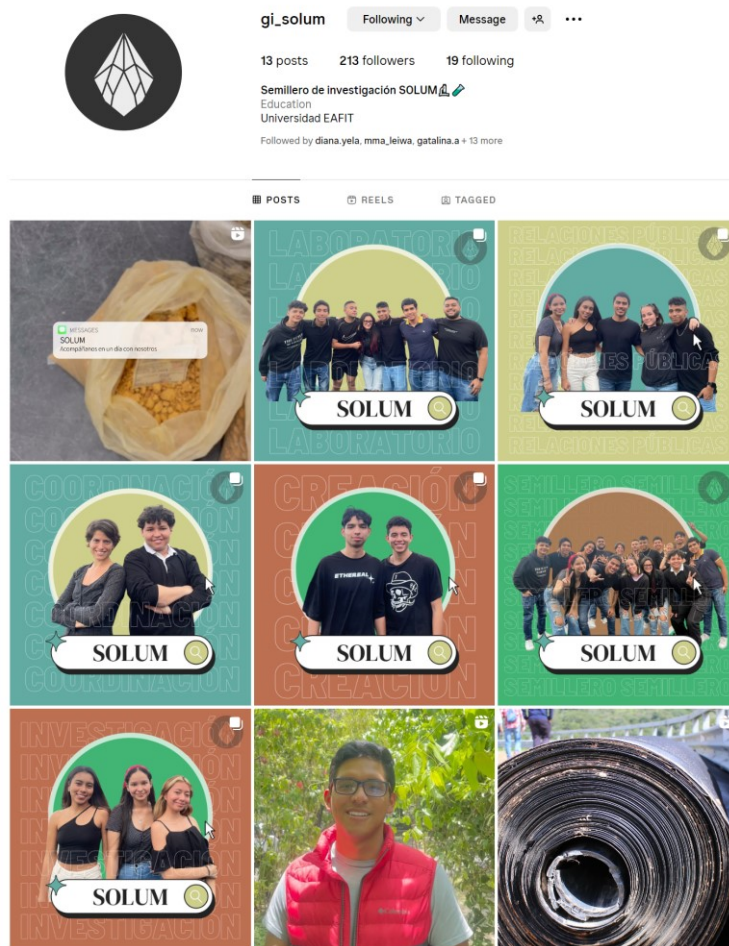
Miércoles 24 de mayo
2:00 p.m. a 5:00 p.m.
Taller Virtual
 Participación gratuita, previa inscripción. ¡Cupos limitados!

Invita la Especialización de Mecánica de Suelos y Cimentaciones

SOLUM | | srk consulting | Jornada Técnica de Relaves Mineros |

2. AP: Productos de Apropiación Social del Conocimiento, PPC: Participación ciudadana en proyectos de CTI.

Se creó un perfil con el nombre del semillero de investigación en Instagram https://www.instagram.com/gi_solum/, con el fin de dar a conocer los resultados de la investigación a un público más amplio para despertar el interés en los relaves mineros y la construcción de las presas de relaves. Al momento se tienen 13 publicaciones y 213 seguidores. Se crearon y publicaron 6 reels de las temáticas relacionadas al proyecto.

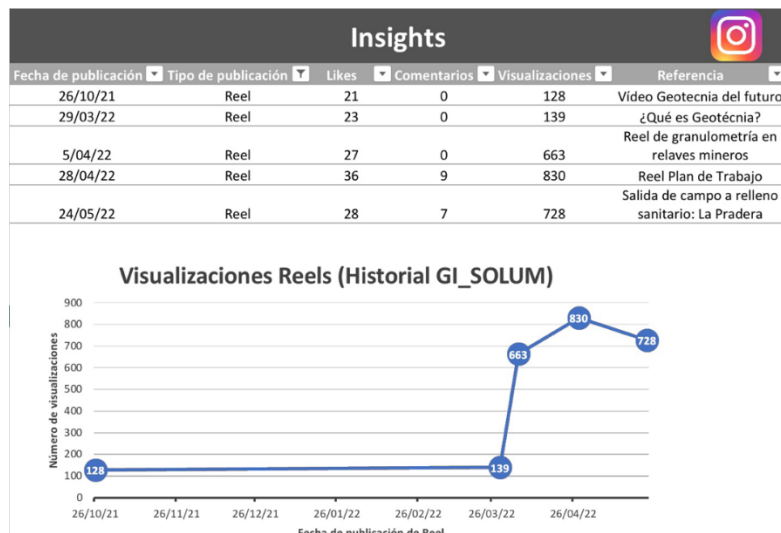


El público objetivo del perfil son estudiantes y apasionados por la geotecnia, este ha alcanzado un total de 213 seguidores en dos años.

Las publicaciones se han dividido en 4 grupos:

1. Estructura del semillero: ahí se presentaron los equipos de trabajo y los integrantes.
2. Conocimientos básicos acerca de la geotecnia: se estructuraron conceptos clave para el entendimiento de las presas de relaves.
3. Salidas de campo
4. Resultados de la investigación

La recepción del público al perfil del semillero de investigación ha sido relativamente satisfactoria. Como parte importante de las publicaciones se han realizado reels. Los insights de éstos se muestran en la gráfica mostrada.



La cuenta de Instagram se activó en marzo de 2022. Desde esa fecha se han alcanzado 830 visualizaciones en las publicaciones.

Conclusiones

En el presente estudio, se ha estudiado el relave minero de la mina de Buriticá, abarcando desde la caracterización física y mecánica hasta la modelación física del fenómeno de flujo. Esto permitió una comprensión de la susceptibilidad a la licuación de estos materiales bajo condiciones estáticas.

La investigación subraya la importancia de adoptar prácticas sostenibles y seguras en la gestión de relaves mineros. Los hallazgos pueden contribuir a mejorar las estrategias de diseño y mantenimiento de las presas de relaves, reduciendo así el riesgo de accidentes y su impacto ambiental.

Aunque se han logrado avances significativos, el proyecto identifica áreas para futuras investigaciones, como la necesidad de profundizar en la modelación computacional y física. Estos esfuerzos podrían optimizar aún más las estrategias de gestión de relaves mineros.

La organización de la jornada técnica y la divulgación a través de redes sociales han jugado un papel en sensibilizar sobre la importancia de la gestión adecuada de los relaves mineros. Este enfoque ha fomentado una mayor conciencia pública y académica sobre los desafíos y soluciones en este ámbito.

Perspectivas

Con la familiaridad del equipo del semillero, se desarrollará el modelo de la presa de relave a analizar teniendo en cuenta los parámetros del laboratorio y la geometría acordada. En cuanto a la modelación física, se pretende recrear las condiciones de infiltración y escorrentía de la vida real prototipadas en el modelo a escala reducida. El equipo de investigación se propone dar insumos a lo anterior con ayuda de artículos científicos para la modelación física

y numérica. Por último, el equipo de relaciones públicas se propone publicar conceptos básicos acerca de la geotecnia, de resultados y análisis del proyecto de relaves mineros. También, realizar encuestas y dinámica para generar consciencia alrededor de la construcción de las presas de relaves.

Referencias bibliográficas

- Islam, S. (2021). A study on the mechanical behaviour of three different fine-grained mine tailings. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, xxxx, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.04.001>
- Islam, K., & Murakami, S. (2021). Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. *Global Environmental Change*, 70(March). <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361>
- Fierro, J. (2019). Los desechos de la minería y las presas de relave: una bomba de tiempo. Obtenido de <https://bit.ly/3H84tdx>
- Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., & Cao, J. (2019). A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4159306>
- Minergía. (2021). Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos relacionados con presas de relaves.
- Sernageomin. (2018). Estudios De Normativas Internacionales De Diseño, Construcción, Operación, Cierre Y Post Cierre De Depósitos De Relaves. C
- Varghese, R. M., & Madhavi Latha, G. (2014). Shaking table tests to investigate the influence of various factors on the liquefaction resistance of sands. *Natural Hazards*, 73(3), 1337–1351. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1142-3>
- Ariza A. (2023). *Mina de Buriticá* [Comunicación personal].
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2017). *Resolución N° 01685 por el cual se modifica una Licencia Ambiental Global*.
- Budhu, M. (2011). *Soil mechanics and foundations* (Third edition). Wiley.
- Dhakate, R., Singh, V. S., & Hodlur, G. K. (2008). Impact assessment of chromite mining on groundwater through simulation modeling study in Sukinda chromite mining area, Orissa, India. *Journal of Hazardous Materials*, 160(2-3), 535-547. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.053>
- Emerman. (2018, octubre). *Presas de relaves y sus fallas*. Seminario virtual «El verdadero costo de la minería: Fallas de presas de desechos mineros».
- Emerman. (2019). *Las presas de desechos mineros no deben escatimar en seguridad* [Comunicación personal].
- Gou, M., Zhou, L., & Then, N. W. Y. (2019). Utilization of tailings in cement and concrete: A review. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 449-464. <https://doi.org/10.1515/secm-2019-0029>
- Hu, L., Wu, H., Zhang, L., Zhang, P., & Wen, Q. (2017). Geotechnical Properties of Mine Tailings. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(2), 04016220. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001736](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001736)
- Jones, H., & Boger, D. V. (2012). Sustainability and Waste Management in the Resource Industries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(30), 10057-10065. <https://doi.org/10.1021/ie202963z>

- Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., & Cao, J. (2019). A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-18. <https://doi.org/10.1155/2019/4159306>
- Randgold Resources. (2015). *Environmental Management in Number*.
- Sako, A., Semdé, S., & Wenmenga, U. (2018). Geochemical evaluation of soil, surface water and groundwater around the Tongon gold mining area, northern Côte d'Ivoire, West Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 145, 297-316. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.05.016>
- School of Natural Sciences and Psychology, Byrne, P., Hudson-Edwards, K. A., Macklin, M. G., Brewer, P., Bird, G., & Williams, R. (2016). *THE LONG-TERM ENVIRONMENTAL IMPACTS OF THE MOUNT POLLEY MINE TAILINGS SPILL, BRITISH COLUMBIA, CANADA*. 278498. <https://doi.org/10.1130/abs/2016AM-278498>
- Shamsai, A., Pak, A., Bateni, S. M., & Ayatollahi, S. A. H. (2007). Geotechnical Characteristics of Copper Mine Tailings: A Case Study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 25(5), 591-602. <https://doi.org/10.1007/s10706-007-9132-9>