Diseño de un ambiente de simulación para el monitoreo de estructuras civiles mediante muografía de transmisión

Camilo Andrés Carvajal Castro

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Jesús Peña Rodríguez

Ph.D en Física

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN 9

1.OBJETIVOS 12
1.1 Objetivo General 12

1.2 Objetivos Específicos 12

2. CUERPO DEL TRABAJO 13
2.1 Marco Referencial 13

2.1.1. Muones y muografía 13

2.1.2. Telescopios de muones 14

2.1.3. Presas, sus fallas estructurales y casos históricos 15

2.1.4. Erosión interna (piping) 17

2.1.5. Grietas y fisuras internas 17

2.1.6. Asentamientos diferenciales 17

2.1.7. Túneles y sus fallas estructurales 18

2.2 Método. 19

2.2.1 Modelo estructural 19

2.2.2 Nube de puntos y asignación de materiales 20

2.2.3 Trazado de rayos 20

2.2.4 Pérdida de energía 21

2.2.5 Flujo de muones 23

2.2.6 Parámetros del telescopio 25

2.3 Resultados 26

2.3.1 Modelo de la represa Hidrosogamoso 26

2.3.2 Trazado de rayos y energía mínima 29

2.3.3 Flujo de muones 33

2.3.4 Parámetros del telescopio. 35

3. CONCLUSIONES 41

4. RECOMENDACIONES 43

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 44

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros de la ecuación (4)..... 24

Lista de Figuras

Figura 1. Fallas típicas en presas. 16

Figura 2. Fallas típicas en túneles. 18

Figura 3. (a) Trazado de rayo al atravesar una esfera. Punto rojo: ubicación del observador. 20

Figura 4. Ajuste de Opacidad para el concreto. 22

Figura 5. Emin vs Distancia: Energía mínima de un muón para atravesar cierta distancia en agua, roca y concreto. 23

Figura 6. Trayectoria de un muón atravesando los paneles del telescopio, el muón entra por el panel superior en la coordenada (i,j) en el píxel m y sale por el panel inferior en la coordenada (k,l) en el píxel n. 25

Figura 7. Vista planta Hidrosogamoso. 26

Figura 8. Vistas de la represa de Hidrosogamoso modelada en SketchUp, color café: Roca, color azul: Agua, color blanco: Concreto. 28

Figura 9. Modelo 3D de la presa de Hidrosogamoso en SketchUp con la grieta vertical (vista posterior). 28

Figura 10. Modelo 3D de la presa de Hidrosogamoso como nube de puntos y configuración inicial telescopio (vista planta). 30

Figura 11. Cuerpo de la presa en nube de puntos y zona de observación. Cuadrado rojo: Punto de observación (Ubicación del telescopio). Cruz roja: Punto focal. Rectángulo rojo: Zona de observación. Líneas rojas: Delimitación de rayos 30

Figura 12. Energía mínima de un muón para atravesar el modelo de la presa de Hidrosogamoso. 32

Figura 13. Flujo de muones a cielo abierto en la presa Hidrosogamoso 33

Figura 14. Flujo integrado de muones a través del modelo con una grieta. 33

Figura 15. Flujo diferencial entre estructura sana y estructura con grieta vertical. 34

Figura 16. Transmitancia en la represa Hidrosogamoso al comparar el flujo a cielo abierto y el flujo integrado. 35

Figura 17.Configuración del telescopio. 36

Figura 18. Ángulo sólido 36

Figura 19. Aceptancia del telescopio. 37

Figura 20. Tasa de muones por día 37

Figura 21. Mapa de tiempos de observación, el área superior a las curvas resaltadas indican las zonas donde el tiempo de observación es menor al indicado (Negro - 3 meses, Blanco - 1.5 años). 38

Resumen

Título: Diseño de un ambiente de simulación para el monitoreo de estructuras civiles mediante muografía de transmisión*

Autor: Camilo Carvajal Castro**

Palabras Clave: Monitoreo estructural, Técnicas no invasivas, Fallas estructurales, Presas, Muografía, Rayos cósmicos, Muones, Flujo de muones, Hodoscopios.

Descripción: El monitoreo de estructuras civiles como represas y túneles es crucial para garantizar su seguridad operativa y reducir riesgos asociados a eventos y fallas no detectados oportunamente. La muografía representa una avanzada técnica de imagenología no invasiva que aprovecha los muones, partículas subatómicas generadas por la interacción de la radiación cósmica con la atmósfera terrestre, para la inspección detallada de estructuras internas sin alterar el objeto de estudio. Este estudio tuvo como finalidad desarrollar un entorno computacional que permita simular el uso de la muografía en el monitoreo estructural de presas, tomando como caso de estudio la represa Hidrosogamoso, ubicada en Santander, Colombia. Se generó un modelo tridimensional de la presa, considerando tres materiales principales: roca, agua y concreto, asignados según su ubicación real en la estructura. Se implementó un algoritmo basado en técnicas de trazado de rayos para estimar distancias recorridas y pérdidas energéticas de los muones, determinando la energía mínima requerida para atravesar cada sección del objeto inspeccionado y calculando el flujo de muones a través del objeto. Además, se evaluó la configuración óptima del telescopio detector, considerando coordenadas y aperturas angulares para obtener resultados eficientes y precisos. Se obtuvieron mapas de energía mínima, mapas de flujos de muones y tiempos estimados de observación requeridos para detectar anomalías internas significativas. En particular, se analizó un escenario específico con una grieta vertical hipotética de 0.8 metros de ancho, demostrando la capacidad de la técnica para identificar este tipo de fallas internas bajo ciertas condiciones. No obstante, otros escenarios como erosión interna (piping), debido a sus pequeñas dimensiones y ubicación cercana a los cimientos, resultaron inviables para ser analizados eficazmente con muografía. Finalmente, se concluyó que la topografía cercana al sitio inspeccionado juega un papel determinante en la configuración adecuada del detector, influyendo significativamente en la calidad de los resultados obtenidos. Además, el tiempo requerido para realizar mediciones confiables mediante muografía puede variar considerablemente, desde pocas horas hasta varios meses, dependiendo principalmente de factores como la densidad del material analizado, la resolución deseada, la apertura angular del detector y la complejidad geométrica del objeto bajo estudio.

---

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jesús Peña Rodríguez. PhD.

Abstract

Title: Design of a simulation enviroment for monitoring civil structures using transmission muography Author:

Key Words: Structural Monitoring, Non-Invasive Techniques, Structural Failures, Dams, Muography, Cosmic Rays, Muons, Muon Flux, Hodoscopes.

Description: Monitoring of civil structures such as dams and tunnels is crucial to ensure their operational safety and to reduce risks associated with undetected events and failures. Muography represents an advanced, non-invasive imaging technique that leverages muons, subatomic particles generated by the interaction of cosmic radiation with the Earth's atmosphere, for the detailed inspection of internal structures without altering the object of study. The aim of this study was to develop a computational environment to simulate the use of muography in the structural monitoring of dams, using the Hidrosogamoso dam, located in Santander, Colombia, as a case of study. A three-dimensional model of the dam was generated, considering three main materials: rock, water, and concrete, assigned according to their actual location within the structure. A ray-tracing-based algorithm was implemented to estimate the distances traveled and the energy losses of the muons, determining the minimum energy required to traverse each section of the inspected object and calculating the muon flux through the model. Additionally, the optimal configuration of the detector telescope was evaluated, considering coordinates and angular apertures to obtain efficient and accurate results. Minimum energy maps, muon flux maps, and estimated observation times required to detect significant internal anomalies were obtained. Specifically, a scenario with a hypothetical vertical crack measuring 0.8 meters in width was analyzed, demonstrating the technique's capability to identify such internal failures under certain conditions. However, other scenarios, such as internal erosion (piping), were found to be unfeasible for effective analysis using muography due to their small dimensions and location near the foundation. Finally, it was concluded that the surrounding topography of the inspected site plays a key role in the proper configuration of the detector, significantly influencing the quality of the results obtained. Moreover, the time required to perform reliable measurements using muography can vary considerably from a few hours to several months depending primarily on factors such as the density of the material analyzed, the desired resolution, the detector's angular aperture, and the geometric complexity of the object under study.

---

[*] Bachelor thesis

[**] Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jesús Peña Rodríguez. PhD.

Introducción

Las estructuras civiles pueden presentar fallas provocadas por factores físicomecánicos o químicos imperceptibles a simple vista, los cuales solo se manifiestan cuando la situación es crítica, terminando en resultados catastróficos o en altos costos de reparación. Gracias al monitoreo estructural es posible evaluar las edificaciones a largo plazo, garantizando la seguridad, funcionalidad y disminuyendo costes de reparación y mantenimiento. Actualmente el monitoreo de estructuras civiles se realiza con estructuras y la posible mal interpretación de datos debido a condiciones ambientales que afectan el comportamiento dinámico de las estructuras como el viento, los cambios de temperatura y lluvias. La muografía o radiografía de muones es una técnica no destructiva (NDT), no invasiva, con una alta resolución del orden de 10−1a 102 m, cuenta con una capacidad de penetración de hasta 2 kilómetros, es implementada a distancia y producida por radiación natural (muones atmosféricos), es decir, no necesita un artefacto que emita la radiación. En las últimas décadas, la muografía ha sido aplicada en diferentes campos, se ha usado para obtener imágenes de la estructura interna de volcanes (Nishiyama et al., 2014; Peña R. et al., 2020; Borja C. et al., 2022) exploración de minas (Baccani et al., 2019) obtención de imágenes de estructuras subterráneas (Bonneville et al., 2019) arqueología y detección de túneles (Morishima et al., 2017; Caffau et al., 1997), medición de densidades de rocas (Bryman et al., 2014; Kaiser, 2019) escaneo de carga y reactores nucleares (Mahon et al., 2019; Frazão et al., 2019) monitoreo de estructuras históricas (Zenoni, 2015; Vanini et al., 2019), monitoreo de corrosión en refuerzos estructurales (Das et al., 2022) evaluación de presas (Lázaro Roche, 2021) y mapeo interno de túneles (Thompson et al., 2020).

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un ambiente de simulación capaz de modelar el flujo de muones a través de estructuras civiles tridimensionales importadas en formato STL (Estereolitografía). Este ambiente utiliza técnicas avanzadas como el trazado de rayos y modelos de pérdida de energía, permitiendo evaluar con anticipación las condiciones necesarias para la inspección mediante muografía en situaciones reales y evaluar su desempeño en la detección de fallas como vacíos, fisuras y filtraciones. Se presenta como caso de estudio la presa Hidrosogamoso, ubicada en Colombia, analizando las potenciales configuraciones del sistema de detección, así como los parámetros esenciales para la efectiva identificación de fallas estructurales internas en función de las dimensiones, materiales de la represa y la topografía. La muografía de transmisión está revolucionando las técnicas de evaluación de estructuras civiles y arqueológicas en las últimas décadas (Das et al., 2022; Lázaro Roche, 2021; Thompson et al., 2020; Niederleithinger et al., 2021; Dobrowolska et al., 2020).

Este proyecto se aplicó en una represa colombiana teniendo en cuenta que nuestro país cuenta con varias de ellas (más de 40 entre hidroeléctricas, agua potable y riego (Barón, 2019)) sirviendo como punto de partida de futuras aplicaciones reales de la muografía enfocada al monitoreo de estructuras civiles en Colombia. Actualmente existen varios métodos de evaluación no destructivos para inspeccionar estructuras, algunas de estas aún sufren de una resolución limitada, otras como los rayos X son de mayor resolución, pero cuentan con restricciones debido a los problemas de salud que genera su radiación. La muografía es una técnica segura, no invasiva, no destructiva, limpia y de origen natural. En los últimos años, el monitoreo, escaneo y detección de defectos y fallas en grandes estructuras de concreto y otros materiales en la ingeniería civil ha emergido como una posible aplicación de la muografía. En diversos avances científicos se han realizado estudios de corrosión en las

barras de refuerzo (Das et al., 2022) obtención de imágenes de túneles férreos (Thompson et al., 2020), obtención de imágenes internas de un bloque de concreto reforzado (Niederleithinger et al., 2021), zonas de falla en suelos (Yamazaki et al., 2022) estudios de cuerpos de agua (Tanaka 2022) y túneles submarinos (Tanaka et al., 2021) inspección de la ubicación de las barras de refuerzo en estructuras antiguas y detección general de estructuras internas como vacíos (Dobrowolska et al., 2020; Guardincerri et al., 2019) estudio de edificaciones de concreto (Chaiwongkhot et al., 2018; Procureur, 2018) y represas (Lázaro Roche, 2021).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar un ambiente de simulación para el monitoreo de estructuras civiles mediante muografía de transmisión.

1.2 Objetivos Específicos

Estimar el flujo de muones que atraviesa la estructura civil dependiendo de su ubicación geográfica, dimensiones y composición material.

Evaluar el desempeño del algoritmo en la identificación de problemas estructurales como grietas, vacíos y filtraciones.

Determinar los parámetros mínimos del detector (resolución, ubicación, orientación, entre otros) para observar dichos problemas estructurales.

2. Cuerpo del Trabajo

2.1 Marco Referencial

2.1.1. Muones y muografía

El descubrimiento de los muones se remonta a la década de 1930, cuando experimentos mostraron la existencia de partículas subatómicas extremadamente penetrantes que se crean como producto de la interacción de la radiación cósmica con núcleos atómicos presentes en las capas atmosféricas. El muon (μ) posee una masa de 105.66 MeV/c² (200 veces mayor que la del electrón) y no experimenta la interacción nuclear fuerte, debido a esto, puede penetrar una gran cantidad de materiales sin ser absorbido ni perder mucha energía. Existe una interacción continua entre la radiación cósmica y la atmósfera, una gran parte de las partículas generadas que llegan a la superficie terrestre está compuesta por muones por lo cual existe un flujo constante de de ellos en nuestro entorno (AlHamaydeh, et al., 2022; Peña R. et al., 2021). La muografía es una técnica no invasiva de imagenología de estructuras mediante la medición del flujo natural de muones que las atraviesan. Así como los rayos X, la muografía es sensible a la densidad, la diferencia radica en que la imagenología con rayos X requiere una generación de radiación artificial y no tienen un gran poder de penetración como la muografía, la cual puede penetrar grandes cuerpos rocosos de hasta 2 km de espesor. Existen dos tipos de muografía: de dispersión y de transmisión, esta última es usada en estructuras grandes. Actualmente existen varios métodos de evaluación no destructivos para inspeccionar estructuras, algunas de estas aún sufren de una resolución limitada, otras como los rayos X son de mayor resolución, pero cuentan con restricciones debido a los problemas de salud que genera su radiación. La muografía es una técnica segura, no invasiva, no destructiva, limpia y de origen natural. En los últimos años, el monitoreo,

escaneo y detección de defectos y fallas en grandes estructuras de concreto y otros materiales en la ingeniería civil ha emergido como una posible aplicación de la muografía. En diversos avances científicos se han realizado estudios de corrosión en las barras de refuerzo (Das et al., 2022), obtención de imágenes de túneles férreos (Thompson et al., 2020), obtención de imágenes internas de un bloque de concreto reforzado (Niederleithinger et al., 2021), zonas de falla en suelos (Yamazaki et al., 2022), estudios de cuerpos de agua (Tanaka, 2022) y túneles submarinos (Tanaka et al., 2021), inspección de la ubicación de las barras de refuerzo en estructuras antiguas y detección general de estructuras internas como vacíos (Dobrowolska et al., 2020; Guardincerri et al., 2019), estudio de edificaciones de concreto (Chaiwongkhot et al., 2018; Procureur, 2018) y represas (Lázaro Roche, 2021).

2.1.2. Telescopios de muones

La muografía requiere de un aparato que mida el flujo de muones dependiendo de su trayectoria. Para este propósito se emplean rastreadores (hodoscopios) de partículas cargadas que generalmente se componen de varias capas de detección. Mediante este dispositivo es posible medir la distribución angular del flujo de muones que atraviesan una estructura. Un hodoscopio se conforma de al menos dos paneles sensibles cada uno de los cuales detecta la posición del muón al atravesarlos, con la posición del muón en cada panel se calcula mediante componentes angulares (azimutal y cenital) su trayectoria (Peña R., 2021) Existen diferentes tecnologías de detección utilizadas en los hodoscopios de muones como centelleadores plásticos, micromegas, Cámaras Proporcionales Multi-Hilo, láminas de emulsión y Cámaras de Plato Resistivo (Peña R., 2021; Anastasio, et al., 2013). De acuerdo a las configuraciones del detector como separación entre paneles, tamaño de sus píxeles, su distancia respecto a la

estructura estudiada y apertura angular, se determina la resolución espacial de la imagen obtenida.

2.1.3. Presas, sus fallas estructurales y casos históricos

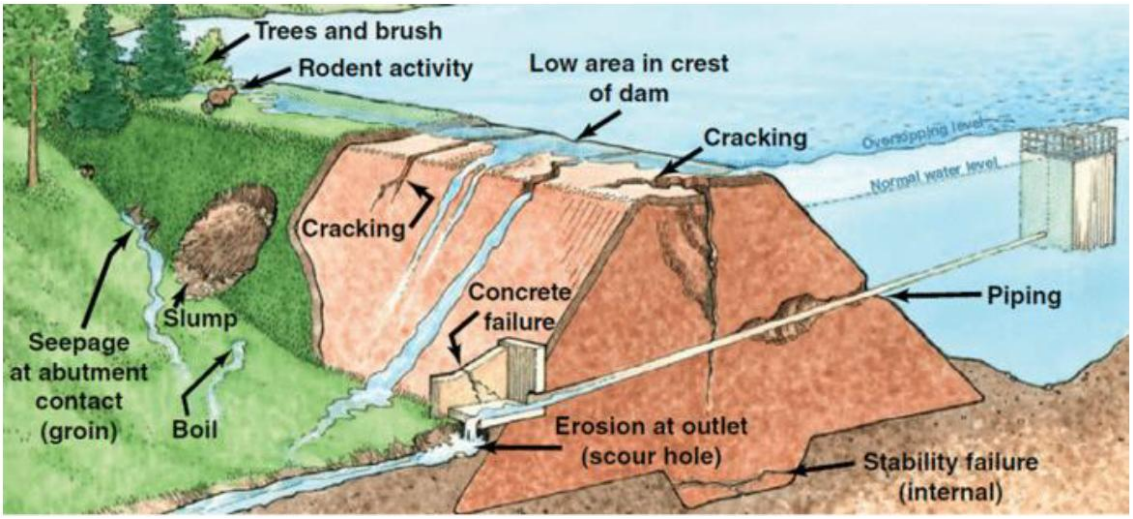
Las presas son infraestructuras críticas de la ingeniería civil cuya principal función es almacenar y regular agua para diversos usos: generación de energía hidroeléctrica, abastecimiento de agua potable, riego agrícola, control de inundaciones, navegación interior, conservación ambiental y actividades recreativas. Organizaciones como Association of State Dam Safety Officials (ASDSO) en Estados Unidos o International Comission on Large Dams (ICOLD) a nivel internacional, recopilan información, casos históricos y estadísticas en bases de datos públicas sobre presas. Según ICOLD, una gran presa es aquella con una altura de al menos 15 metros desde su cimentación más baja hasta la cresta, o bien una de entre 5 y 15 metros de altura que embalsa más de 3 millones de metros cúbicos de agua (International Commission on Large Dams, 2023). A abril de 2023, ICOLD registraba 61.988 presas en 166 países, de las cuales dos tercios están georreferenciados. Tan solo en China hay más de 24.000 presas, mientras que Estados Unidos cuenta con más de 10.000.

En Colombia se han registrado 64 presas. Entre las más representativas se encuentra la Presa Guavio, la más alta del país con 247 metros de altura (Barón 2019). De acuerdo a ASDSO, las presas pueden clasificarse en 11 tipos distintos según su material y método de construcción: tierra/terraplén, relleno de roca, gravedad, contrafuerte, arco, multi-arco, concreto compactado con rodillo (CCR), concreto convencional, mampostería, piedra y maderamen. A lo largo de la historia, diversas fallas en presas han provocado catástrofes de gran magnitud, causando pérdidas humanas y materiales significativas. La falla más mortal en Estados Unidos fue en 1889, cuando la presa South Fork colapsó tras intensas lluvias,

liberando aproximadamente 14.5 millones de metros cúbicos de agua que arrasaron Johnstown, Pensilvania, y causaron la muerte de 2,208 personas (Bennett, M. D., 2025). Más recientemente, en 2019, la ruptura de la presa de relaves en Brumadinho, Brasil resultó en una devastadora pérdida de vidas y graves impactos ambientales. Las investigaciones posteriores identificaron deficiencias en el monitoreo y mantenimiento, lo que llevó a un escrutinio más riguroso de las prácticas de seguridad y la implementación de nuevas normativas en Brasil (France 24., 2024). Entre enero de 2005 y junio de 2013, los programas estatales de seguridad de presas en EE. UU. reportaron 173 fallas de presas y 587 "incidentes" que, sin intervención, probablemente habrían resultado en fallas (Federal Emergency Management Agency, 2014). Estos eventos resaltan la importancia crítica de un diseño adecuado, mantenimiento riguroso y monitoreo constante de las presas para prevenir desastres similares en el futuro.

Figura 1.

Fallas típicas en presas.



Nota: Adaptado de *The Constructor. (2017). Common causes of failures of dam structures.*

2.1.4. Erosión interna (piping)

El piping es un proceso donde el flujo de agua crea canales internos, afectando la integridad estructural. Esta falla es común en presas de tierra y en rellenos, presentando típicamente diámetros desde centímetros hasta varios metros. En el caso del piping, los túneles de erosión comienzan típicamente con diámetros de 0.1 a 0.3 m, pero pueden crecer hasta 0.5–1 m o más si no se controlan; en la presa Teton (EE.UU., 1976) el túnel alcanzó ~7.6 m de diámetro antes del colapso (Chadwick, et. al, s.f.). Estos conductos suelen desarrollarse desde la base o tercio inferior de la presa, especialmente en zonas de contacto presa-cimiento o en los estribos, y se extienden hasta emerger en el talud de aguas abajo, recorriendo longitudes comparables al espesor de la presa (hasta decenas de metros).

2.1.5. Grietas y fisuras internas

Son ocasionadas por asentamientos diferenciales, expansión térmica del concreto o actividad sísmica. Las grietas estructurales, suelen medir 10 a 100 m de largo, con anchos de 5–50 cm y profundidades de 1–3 m en presas de tierra; por ejemplo, se documentó una grieta de ~90 m de largo y 50 cm de ancho con ~2 m de profundidad antes de estabilizarse en la presa El Isiro localizada en Venezuela que permanecía escondida debido al enrocado de protección del talud (Glez H., et. al, 2017).

2.1.6. Asentamientos diferenciales

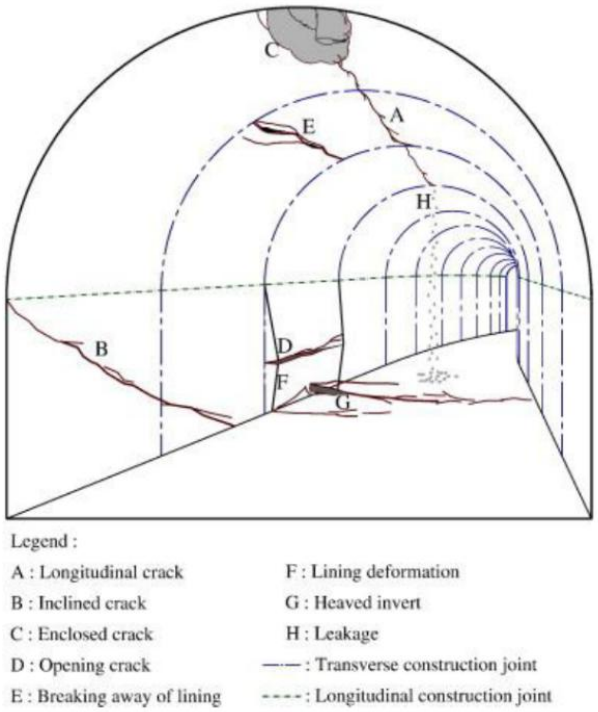
Los asentamientos diferenciales se dan como resultado de compactación desigual de la cimentación o cambios en el terreno subyacente. Los asentamientos verticales de la cresta también preceden muchas fallas, con rangos críticos superiores al 1–2% de la altura de la presa; en Caspe (España, 1990), se midió un hundimiento de 2 m (~4% de la altura) durante

el primer llenado, acompañado de filtraciones y un socavón, lo que obligó a vaciar la presa (Gómez López de Munain, R., s.f.).

2.1.7. Túneles y sus fallas estructurales

Figura 2

Fallas típicas en túneles.



Nota: Adaptado de T.Wang, "Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes", *Rev. Engineering Geology*., vol. 115, issues. 1-2, pp. 80-95, 2010.

Aunque el presente artículo está enfocado en el monitoreo de presas, se proponen los túneles como potencial objeto de estudio con muografía de transmisión, además el ambiente de simulación desarrollado soporta ambos tipos de estructuras.

En túneles existen fallas estructurales como, grietas (longitudinales, inclinadas, transversales, de apertura, cerrada), rupturas, deformaciones, desprendimientos, zonas de

diferentes densidades y vacíos entre las rocas y el revestimiento del túnel que puede provocar filtraciones de agua (ver Figura 2). Estas fallas son debidas en su mayoría a la interacción del túnel con el suelo y las rocas circundantes además de los movimientos de las fallas de un talud (T.Wang, s.f.).

2.2 Método.

Se empleó un entorno de simulación diseñado con Google Colaboratory y Python para procesar datos y simular escenarios y configuraciones. SketchUp se utilizó para el modelado estructural en 3D. El proceso inició cargando la representación 3D de la estructura civil en formato STL, el cual se convirtió en una nube de puntos para una geometría precisa. Posteriormente, se realizó un trazado de rayos para simular la trayectoria de los muones a través del modelo. En esta simulación, se calculó la pérdida de energía de los muones en función de la densidad y el espesor de los materiales atravesados, y se modeló el flujo de muones basándose en un modelo de referencia. Finalmente, se determinaron los parámetros mínimos del telescopio de muones para replicar el escaneo en un escenario real, considerando las características específicas de la estructura a monitorear

2.2.1 Modelo estructural

La representación 3D de la estructura civil se carga en el ambiente de simulación en formato stl (Stereolithography) el cual es un formato utilizado en el diseño asistido por computadora (CAD), este formato puede ser extraído de modelos diseñados en software usados comúnmente en ingeniería civil o mecánica como Revit, Blender, AutoCAD, Catia, Solidworks y SketchUp.

Además, es posible cargar modelos generados directamente a partir de datos LiDAR de estructuras reales mejoran significativamente la confiabilidad de la simulación.

2.2.2 Nube de puntos y asignación de materiales

Conociendo los materiales (concreto, roca, agua, etc) de la estructura cargada, se asignan estos materiales al modelo 3D según su ubicación y propiedades geométricas para obtener una representación real de la composición material de la estructura y sobretodo para diferenciar las densidades de cada elemento del modelo 3D.

Una vez en el ambiente de simulación, se carga la estructura civil en formato .stl y se define el número de puntos en los que sus caras se dividirán (nube de puntos), a mayor número de puntos, mejor precisión del algoritmo. Es fundamental que este modelo se pueda cargar como una nube de puntos, ya que esto permite una representación más precisa y detallada de la geometría de la estructura.

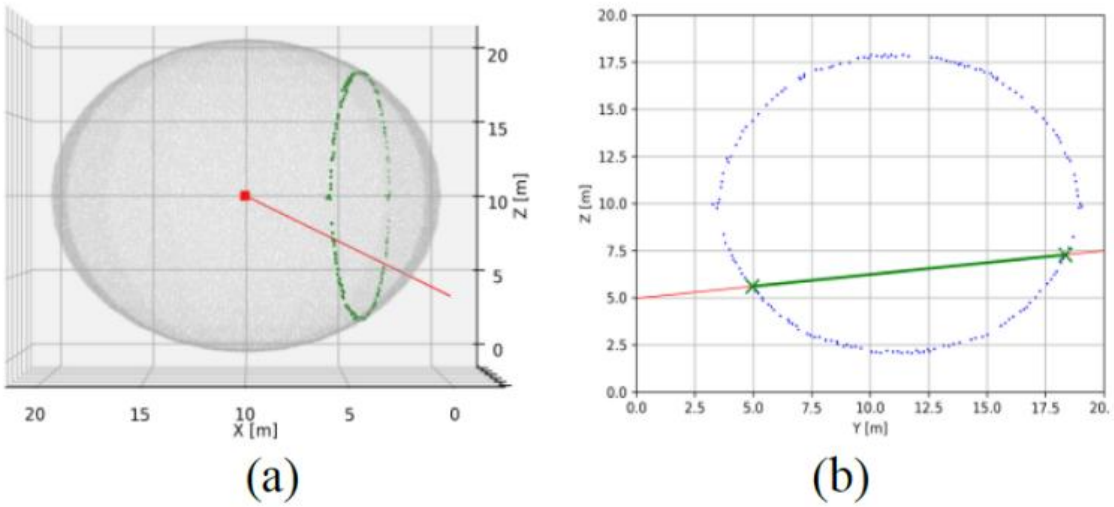
2.2.3 Trazado de rayos

Se implementa un algoritmo de trazado de rayos que simula la trayectoria de los muones desde un punto de observación definido hacia el interior del objeto inspeccionado en función del ángulo cenital y azimutal. Para cada trayectoria se proyecta una línea desde el telescopio hasta un punto fuera del objeto de estudio proyectado según su ángulo vertical y horizontal como se observa en la Figura 3 (a).

Para cada trayectoria, se obtiene una sección transversal de la estructura, se determinan los puntos de entrada y salida del muón de acuerdo a las zonas donde atraviesa cada trayectoria proyectada, permitiendo calcular la distancia recorrida dentro de la estructura por cada material como se observa en la Figura 3 (b).

Figura 3.

(a) Trazado de rayo al atravesar una esfera. Punto rojo: ubicación del observador.



Puntos verdes: Puntos de la sección transversal del corte donde atraviesa el rayo. (b) Sección transversal del corte donde atraviesa el rayo. X verde: puntos de entrada y salida de la trayectoria dentro del objeto. Línea verde: Distancia recorrida dentro de la esfera. Fuente: elaboración propia

2.2.4 Pérdida de energía

La pérdida de energía de los muones al atrevesar distintos cuerpos depende tanto de la densidad del material como de sus dimensiones. La opacidad ϱ que es una medida de cuánto material (densidad · espesor) atraviesa una partícula. La opacidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$\varrho = \rho L \qquad \textbf{(1)}$$

donde L es el espesor o la distancia recorrida por la partícula dentro del material y ρ es la densidad promedio a lo largo de la trayectoria. La opacidad se da en unidades (g cm−2)

Para modelar la pérdida de energía de los muones (MeV·cm²/g) al atravesar distintos materiales se utilizan los datos experimentales de Groom, que relaciona la pérdida de energía con el tipo de material, estos datos proporcionan información sobre la interacción de muones con más de 50 elementos y materiales entre los cuales se encuentran algunos relevantes en

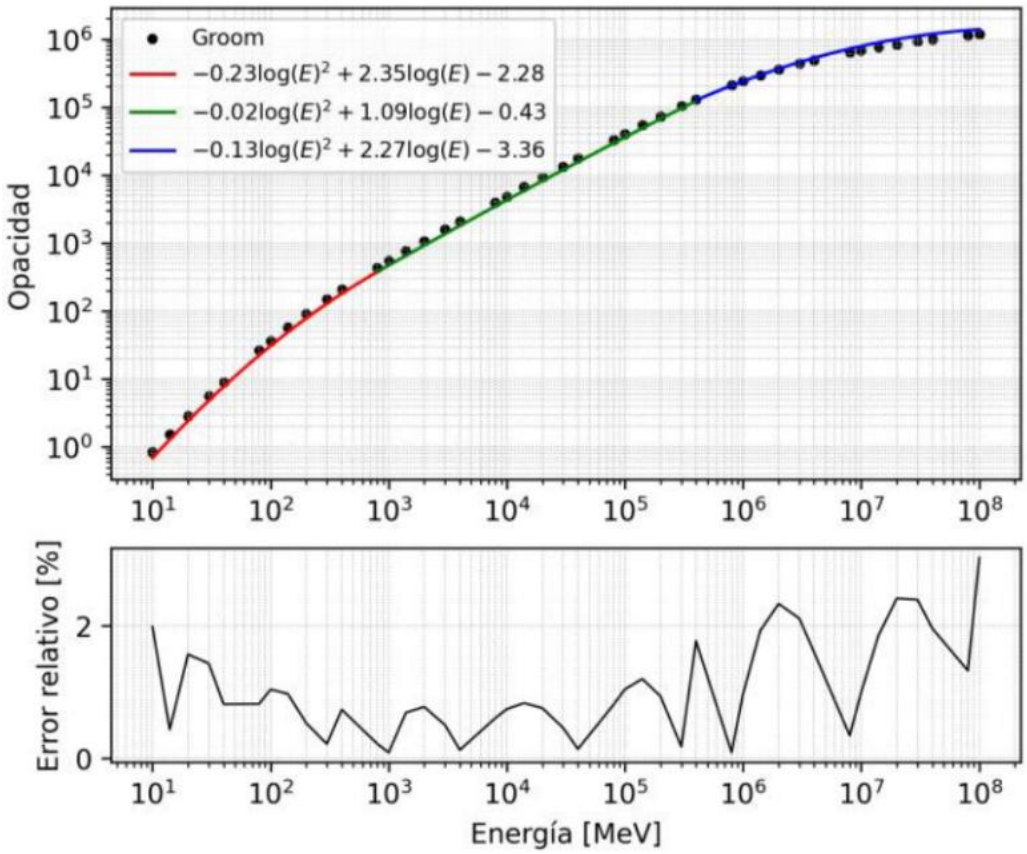
estructuras civiles como roca, concreto, hierro, agua y aire (GROOM, et al.,2001). A partir de estos datos, se obtiene un modelo paramétrico basado en un ajuste y se encuentra la opacidad que puede atravesar un muón en función de su energía incidente como se muestra en la Figura 4.

El modelo implementado es un modelo polinómico de segundo grado aplicando una transformación logarítmica a la energía E como se describe en la ecuación 2, por cada material se obtienen los parámetros de ajuste.

$$\varrho = a \cdot log(E)^2 + b \cdot log(E) + c \qquad \textbf{(2)}$$

Figura 4.

Ajuste de Opacidad para el concreto.



Nota: Elaboración propia

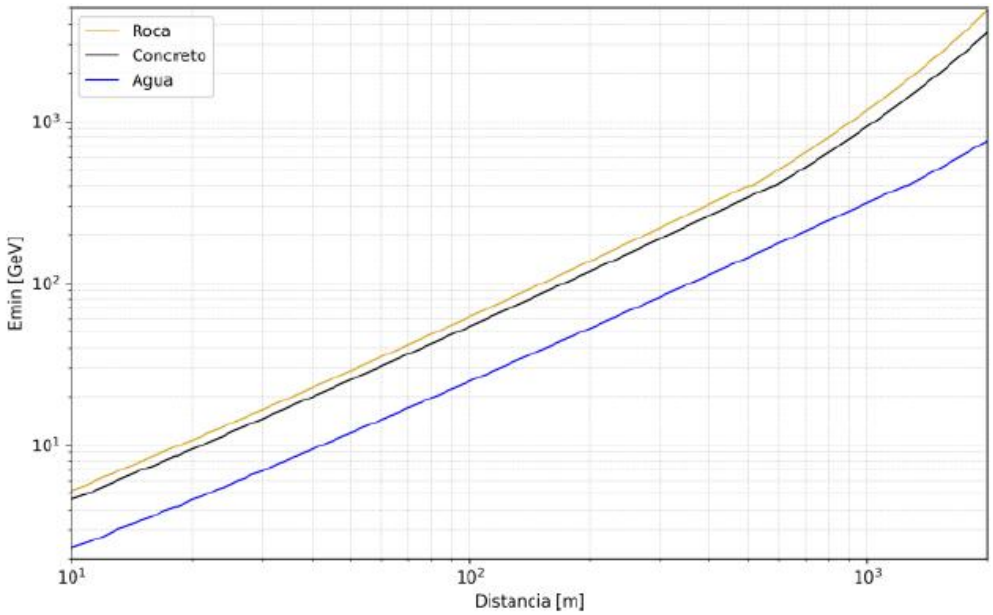
Con el ajuste realizado de opacidad en función de energía para cada material, se encuentra la energía mínima $Emin$ resolviendo (3) donde m es la masa del muón (0.10566 GeV/c²) para cada material en función del espesor del material.

$$E_{min} - \int_0^{\varrho} \frac{dE}{d\varrho} d\varrho = m \qquad \textbf{(3)}$$

La Figura 5 muestra la energía mínima que necesita un muón para atravesar cierto espesor o recorrer cierta distancia dentro de la Roca, Concreto y el Agua de acuerdo al modelo.

Figura 5.

Emin vs Distancia: Energía mínima de un muón para atravesar cierta distancia en agua, roca y concreto.



Nota: Elaboración propia

2.2.5 Flujo de muones

Dado el crecimiento de la muografía en el campo científico y sus aplicaciones se han realizado varias investigaciones sobre mediciones del flujo de muones a nivel del mar para

construir diferentes modelos mediante ecuaciones. El modelo que se presenta en este artículo es el propuesto por Reyna, D. (2006).

$$\Phi(p,\theta) = A_R \cdot p^{-(a3y3+a2y2+a1y+a0)} cos^3\theta, \qquad \textbf{(4)}$$

donde p es el momento del muón (GeV c^{-1}) y se obtiene de la siguiente ecuación (5) donde E_0 es la energía del muón, m_μ es la masa del muón y c es la velocidad de la luz:

$$p^2c^2 = E_0^2 - m_\mu^2 c^4 \qquad \textbf{(5)}$$

El componente y de la ecuación (4) se obtiene de y=$log_{10}p$, donde p es el momento del muón. Los parámetros de ajuste se muestran en la tabla (1)

Tabla 1.

Parámetros de la ecuación (4)

A_R	a_0	a_1	a_2	a_3
0.00253	0.2455	1.288	-0.2555	0.0209

Nota: Reyna, D. (2006). A simple parameterization of the cosmic-ray muon momentum spectra at the surface as a function of zenith angle. doi: 10.48550/arXiv.hep-ph/0604145.

El flujo de muones varía significativamente con la altitud. Esta dependencia se debe principalmente a la distancia cambiante entre el punto de observación y la profundidad atmosférica. La corrección del flujo de muones según la altitud se define como:

$$\frac{\Phi(h)}{\Phi(h=0)} = \ exp(-h/h_0) \qquad \textbf{(6)}$$

donde h es la altitud en m, mientras que h_0=4900 + 750p donde p es el momento del muón en GeV/c² (Lesparre, D., 2010).

Finalmente se define el flujo integrado de muones (cm−2sr−1s−1), el cual depende del flujo diferencial de muones, de la energía mínima del muon y del ángulo de incidencia θ (ecuación 7).

$$\mathrm{I}(\varrho, \theta) = \int_{E_{\min(\varrho)}}^{\infty} \Phi(\mathrm{E}_0, \theta)\, \mathrm{dE}_0 \qquad \textbf{(7)}$$

2.2.6 Parámetros del telescopio

Con el fin de implementar el escaneo real de la estructura mediante detectores de muones, se encuentran los parámetros mínimos del detector, como resolución, ubicación, orientación, inclinación, distancia al objeto, tiempo de observación y aceptancia.

Es escencial tener en cuenta el tipo de estructura que se quiere monitorear, los materiales que la componen, sus dimensiones, su geometría y las clases de fallas que la puedan afectar debido a que cada estructura puede presentar fallas específicas, además, la topografía y accesibilidad de la zona aledaña a la estructura es de gran importancia para estudios muográficos.

Los parámetros iniciales de la simulación respecto al telescopio que influyen son su ubicación, orientación (hacia la estructura), resolución (depende de la distancia respecto a la estructura y las dimensiones de la falla) e inclinación teniendo en cuenta que el flujo de muones es inversamente proporcional al ángulo cenital.

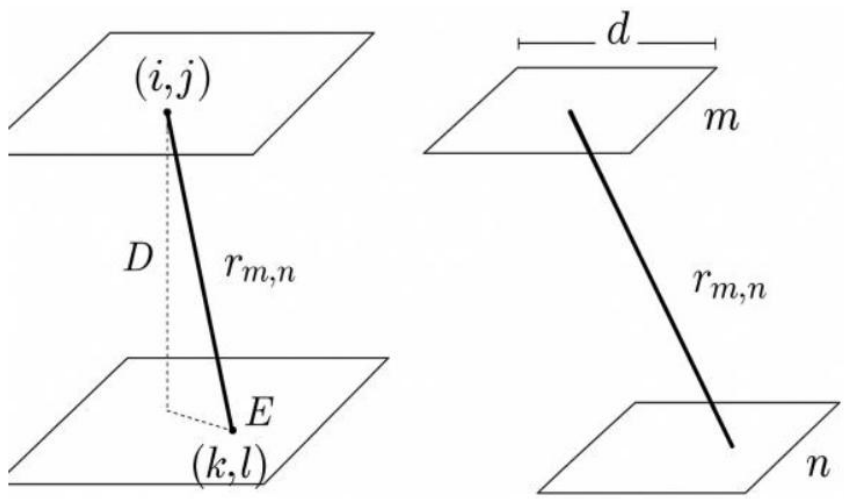
Para la simulación, se calcula la resolución angular y la aceptación del telescopio definiendo la logintud de una lado de píxel *d*, el número de barras de detección de cada panel *N* y la separación entre los paneles *D*.

$$\mathrm{T}(r_{m,n}) = S(r_{m,n}) \times \delta\Omega(r_{m,n}), \qquad \textbf{(8)}$$

donde $\delta\Omega = 4A/r_{m,n}^2$, el área de cada píxel A es d^2 y $r_{m,n}$ es la trayectoria entre los píxeles m y n del panel correspondiente como se ilustra en la figura (6).

Figura 6.

Trayectoria de un muón atravesando los paneles del telescopio, el muón entra por el panel superior en la coordenada (i,j) en el píxel m y sale por el panel inferior en la coordenada (k,l) en el píxel n.



Nota: Adaptado de J. Peña-Rodríguez, Diseño y calibración de un telescopio de muones híbrido para estudios vulcanológicos, Ph.D. thesis, Universidad Industrial de santander (2021).

La longitud de la trayectoria $r_{m,n}$ entre los píxeles depende de la separación D entre los paneles del telescopio y la distancia relativa entre los píxeles E, por consiguiente, la longitud $r_{m,n}$ se calcula como

$$r_{m,n} = \sqrt{D^2 + E^2} = \sqrt{(|k - i|d)^2} + (|l - j|d)^2 \qquad \textbf{(9)}$$

El área de detección se calcula como $S(r_{m,n})$= $N_p \cdot A$ donde N_p es el número de pixeles por panel. Teniendo la aceptancia del telescopio T, y el flujo integrado de muones I, se puede obtener el mapeo del número de muones detectados N en cierto periodo de tiempo. ΔT es la duración del periodo de medición.

$$N = \Delta T \times \mathrm{T} \times I \qquad (10)$$

2.3 Resultados.

2.3.1 Modelo de la represa Hidrosogamoso

Figura 7.

Vista planta Hidrosogamoso.

Nota: Adaptado de Google Maps.

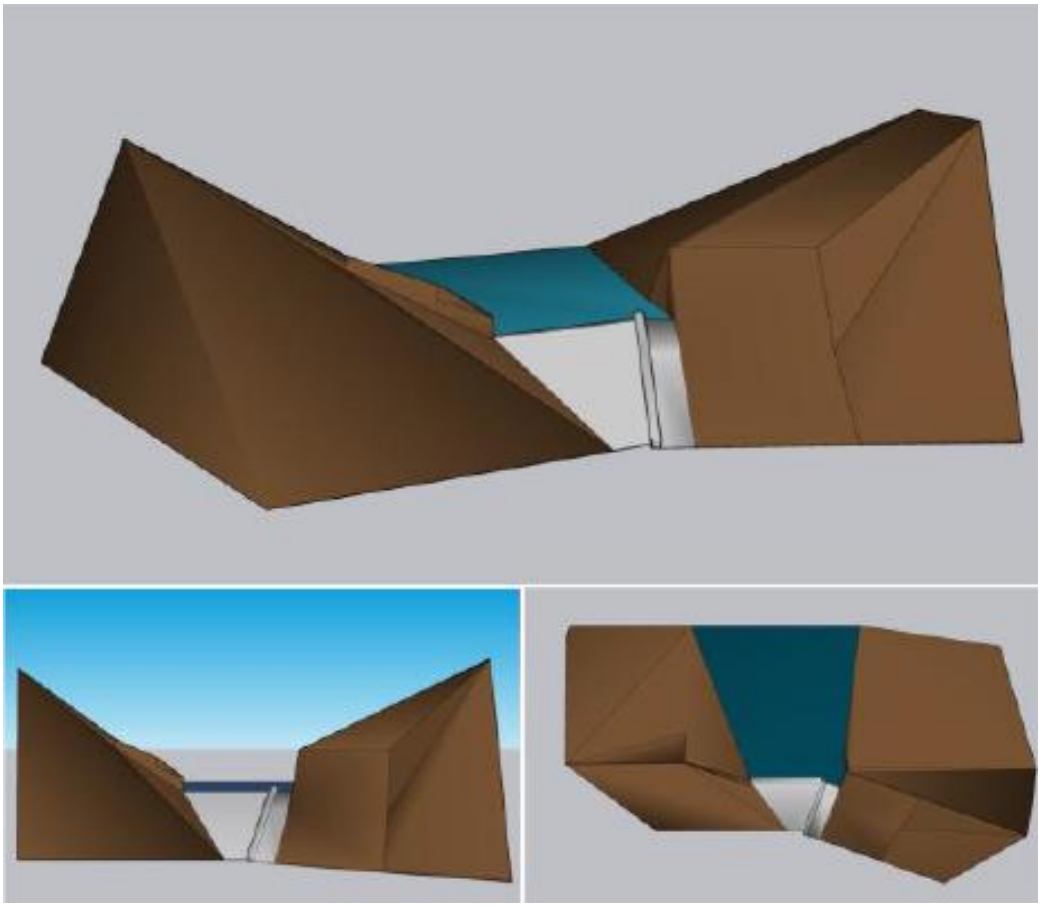
La presa La Tora de la Central Hidroeléctrica Sogamoso (Figura 7), construida en 2014 con concreto compactado con rodillo, es el objeto de estudio de la simulación realizada. Tiene 190 metros de altura, 330 metros de longitud, 12 metros de ancho en la cresta y una cota de 330 m s.n.m. Da origen al Embalse Topocoro, uno de los más grandes del país, con una capacidad de 4.800 millones de m³ de agua (Santander Competitivo, s.f.).

Se modela el cuerpo de la presa en concreto (ρ = 2.3 g/cm³) con sus dimensiones reales, el cuerpo montañoso cercano a la presa se modela como roca estándar (ρ = 2.65 g/cm³) y el cuerpo de agua (ρ = 1 g/cm³), ver Figura 8. La falla simulada corresponde a una grieta

con orientación vertical ubicada en la parte superior media de la presa en el reverso de su cuerpo (aguas arriba), con 80cm de ancho y 100m de largo como se observa en la Figura 9.

Figura 8.

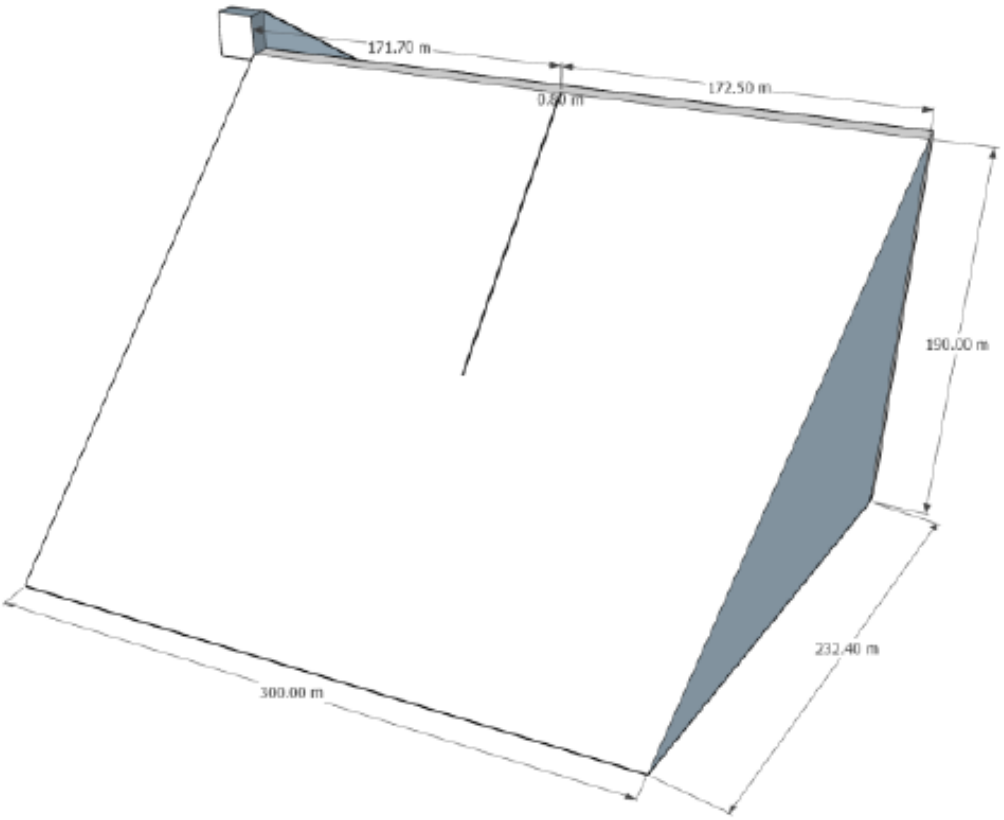
Vistas de la represa de Hidrosogamoso modelada en SketchUp, color café: Roca, color azul: Agua, color blanco: Concreto.



Nota: Elaboración propia

Figura 9.

Modelo 3D de la presa de Hidrosogamoso en SketchUp con la grieta vertical (vista posterior).



Nota: Elaboración propia

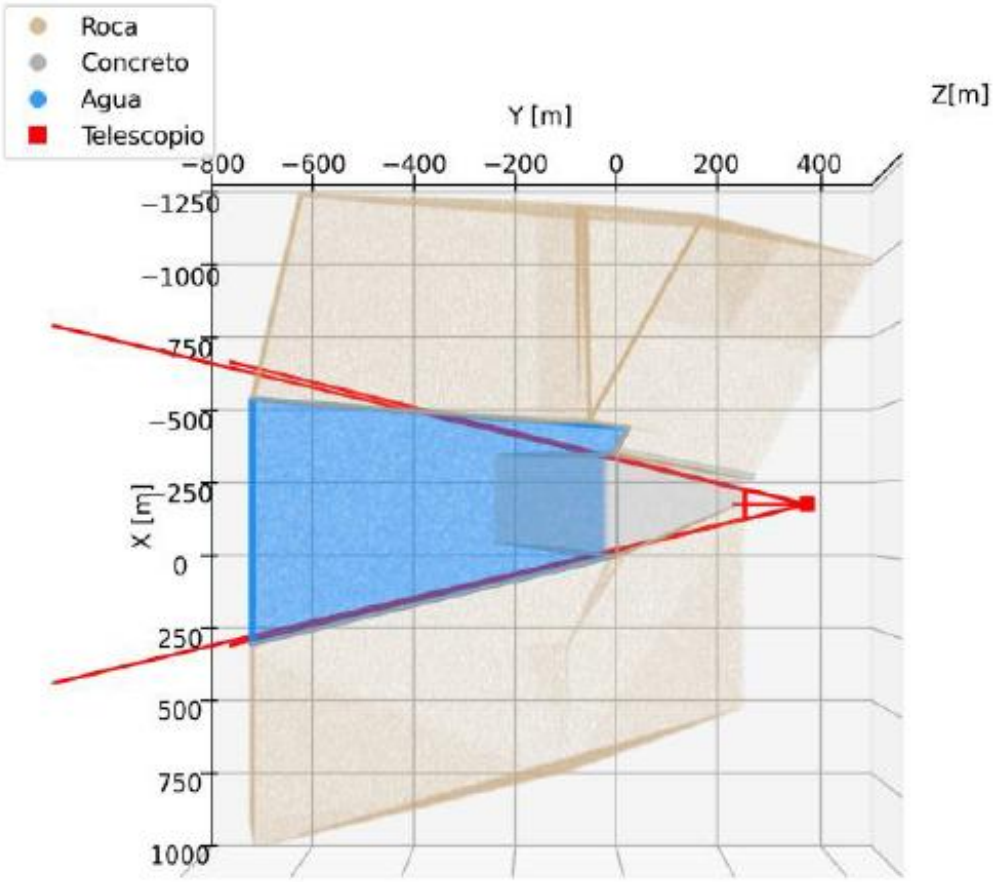
2.3.2 Trazado de rayos y energía mínima

Con el fin de encontrar las distancias recorridas de los muones al atravesar el cuerpo del modelo, se configura una ubicación para el telescopio, la cual depende de la topografía y acceso a la zona donde se desea realizar el estudio real, en este caso se ubica a 120 m del frente de la presa en z = 0 (ver Figura 10). Después de ubicar el telescopio se debe definir el punto focal a donde este apuntará, para la simulación se usó un punto focal en z = 50 m apuntando directamente al cuerpo, el punto focal y el telescopio alineados horizontalmente. Finalmente se establece la apertura angular del telescopio, esta depende de la zona del cuerpo que se quiera analizar, para el estudio se estableció en 45° para azimut y cenit.

Diseño de un ambiente de simulación para el monitoreo de estructuras civiles mediante muografía de transmisión

Figura 10.

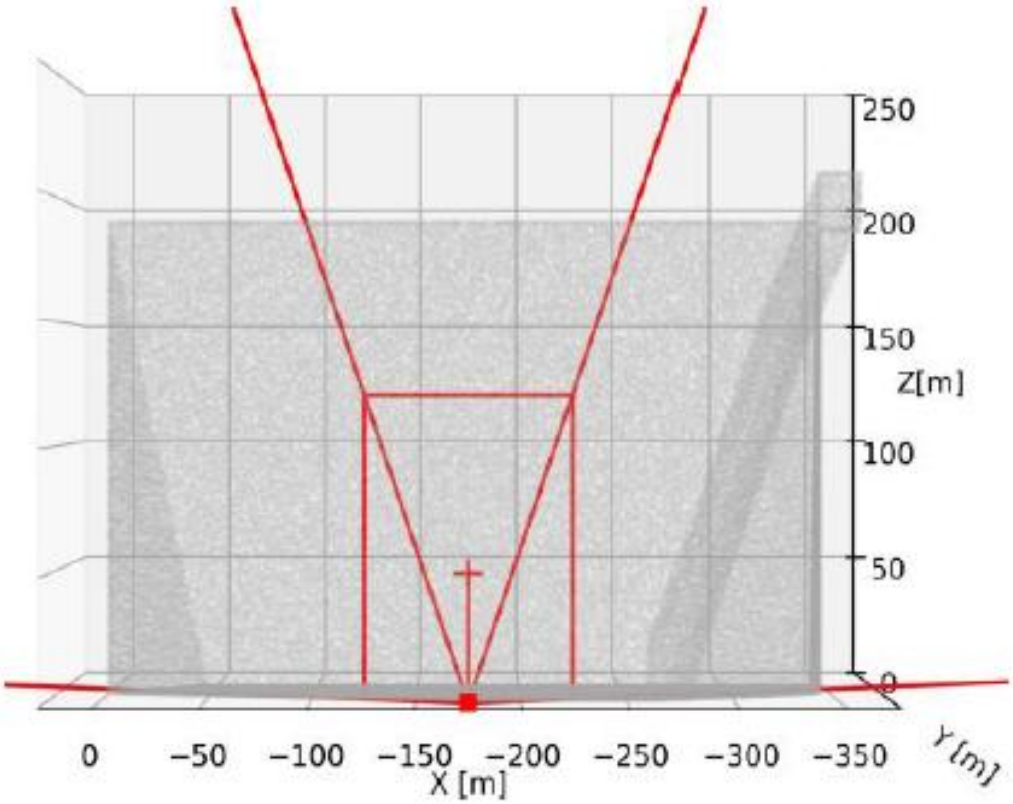
Modelo 3D de la presa de Hidrosogamoso como nube de puntos y configuración inicial telescopio (vista planta).



Nota: Elaboración propia

Figura 11.

Cuerpo de la presa en nube de puntos y zona de observación. Cuadrado rojo: Punto de observación (Ubicación del telescopio). Cruz roja: Punto focal. Rectángulo rojo: Zona de observación. Líneas rojas: Delimitación de rayos



Nota: Elaboración propia

Una vez configurados los parámetros anteriores, el entorno de simulación ilustra la zona de observación y la proyección de los rayos, con esto se puede determinar si la zona de interés se encuentra dentro de la zona de observación (Ver Figuras 10 y 11).

La resolución de las imágenes se define en función de la falla que se quiera estudiar, a partir de ella se estima el número de píxeles que a su vez definen las trayectorias que recorrerán los muones antes de llegar al telescopio. El número de píxeles está definido por la siguiente ecuación:

$$\#P \geq \frac{\theta x}{tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{L}\right)} * 2 \qquad \textbf{(11)}$$

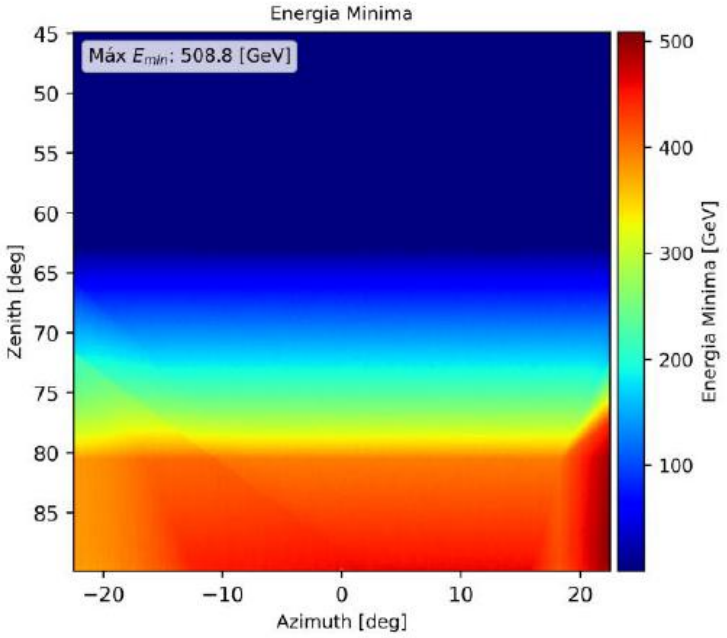
La ecuación calcula cuántos píxeles son necesarios para resolver un grosor Δx a una distancia L con un telescopio de apertura angular θ_x, por último, se multiplica por 2 (criterio de Nyquist) para garantizar que cada detalle angular se capture con al menos dos píxeles y así evitar pérdida de información. Para la simulación realizada se tomaron 997 píxeles.

En este punto se divide el modelo en los materiales correspondientes y se simula el trazado de rayos para encontrar las distancias recorridas a través de cada uno de los cuerpos de cada material diferenciando sus densidades, lo cual es crucial para el siguiente paso: el cálculo de la energía mínima.

Una vez calculadas las distancias recorridas a través de cada material por separado, se calcula la energía mínima a cada píxel del mapa de distancias y finalmente se suman en un solo mapa de energías mínimas para la estructura completa como se observa en la Figura 12.

Figura 12.

Energía mínima de un muón para atravesar el modelo de la presa de Hidrosogamoso.



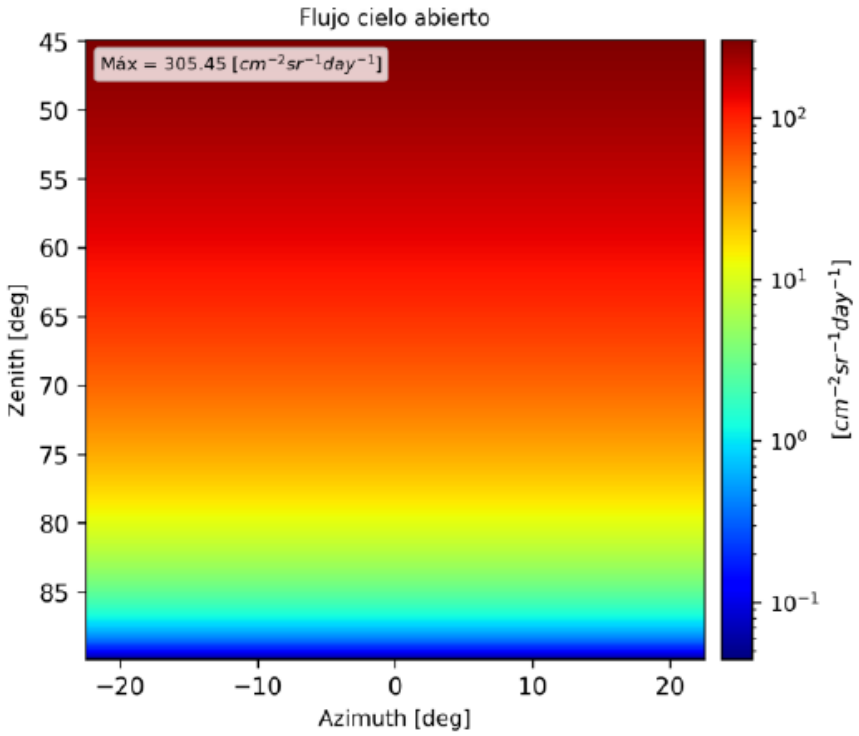
Nota: Elaboración propia

2.3.3 Flujo de muones

Una vez calculada la energía mínima requerida, se calcula el flujo de muones a cielo abierto (ver Figura 13) y el flujo de muones que atraviesa la presa en un estado sano donde no tiene fallas estructurales. También se calcula el flujo integrado de muones a través del modelo con una grieta vertical en la presa (ver Figura 14). El flujo diferencial el cual se obtiene de restar el flujo con la grieta con el flujo en estado sano se presenta en la Figura 15.

Figura 13.

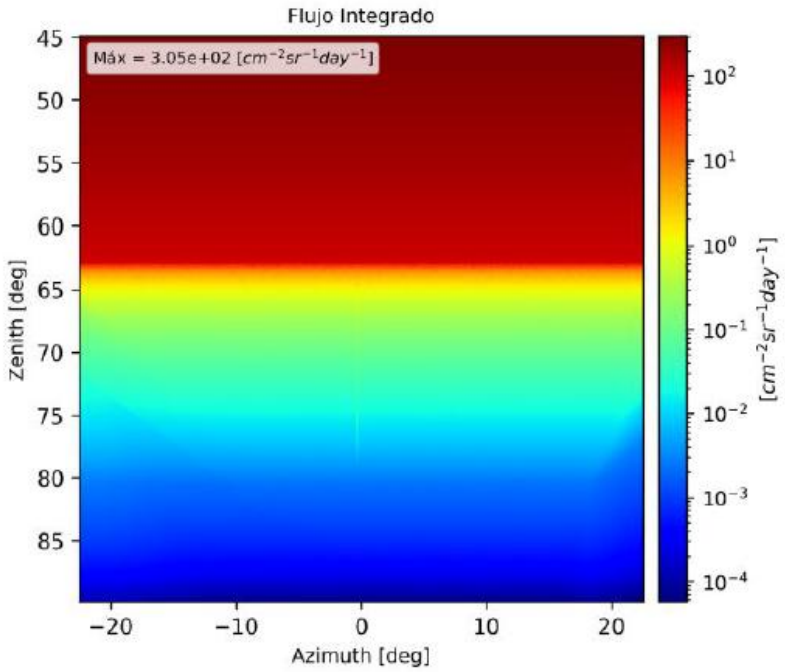
Flujo de muones a cielo abierto en la presa Hidrosogamoso



Nota: Elaboración propia

Figura 14.

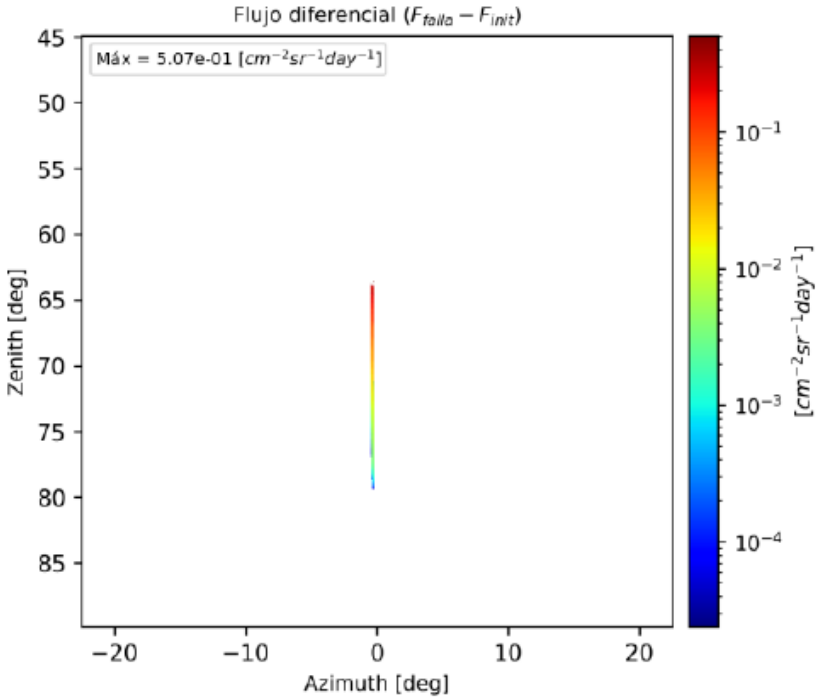
Flujo integrado de muones a través del modelo con una grieta.



Nota: *Elaboración propia*

Figura 15.

Flujo diferencial entre estructura sana y estructura con grieta vertical.

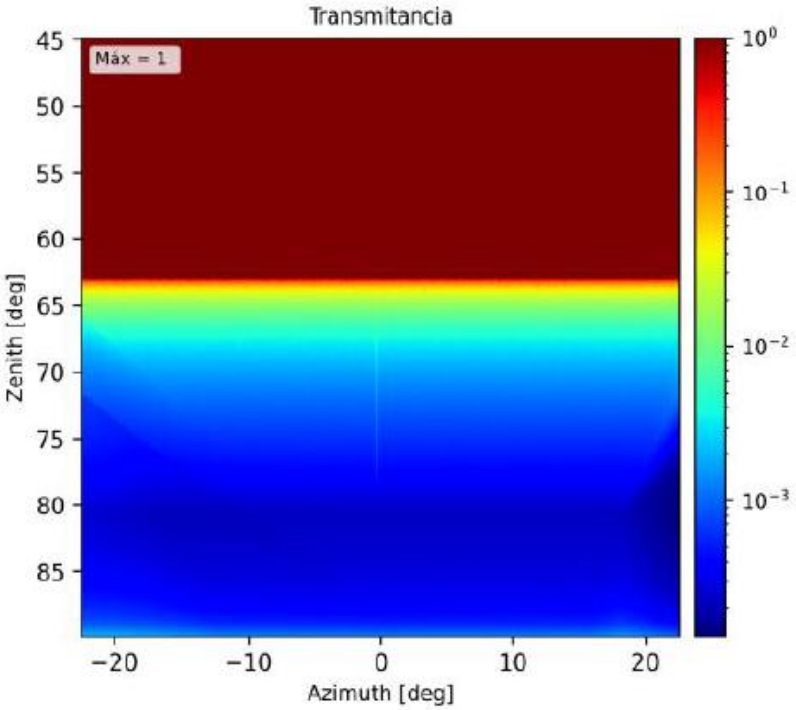


Nota: Elaboración propia

El flujo integrado es una representación de la estructura en función de la cantidad de muones que la atraviesan, dado que en la zona superior del muograma no hay obstrucción alguna, el máximo flujo integrado coincide con el flujo máximo a cielo abierto. La transmitancia (T) se calcula como la relación entre el flujo integrado de muones a través del cuerpo y el flujo de muones a cielo abierto, ver Figura 16.

Figura 16.

Transmitancia en la represa Hidrosogamoso al comparar el flujo a cielo abierto y el flujo integrado.



Nota: Elaboración propia

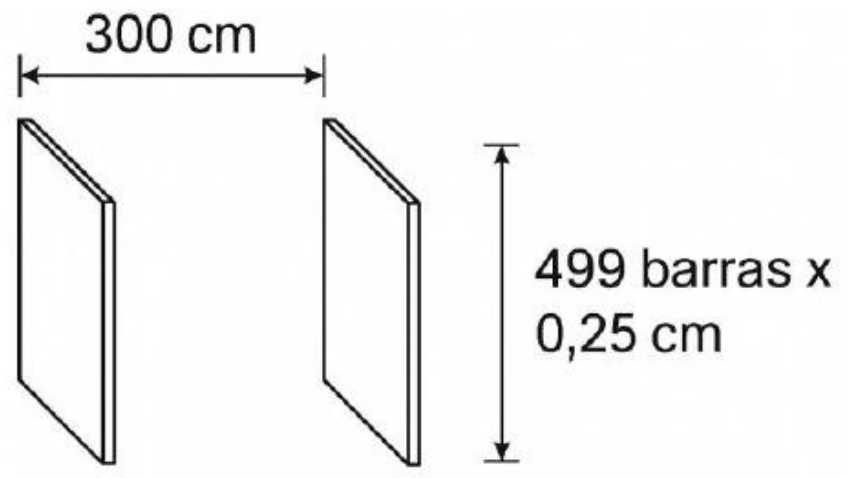
2.3.4 Parámetros del telescopio.

El telescopio se conforma de 499 barras, con un tamaño de pixel de ~ 0.25 cm, y 300 cm de separación entre paneles (ver Figura 17). Esta configuración da como resultado 44° de apertura total del telescopio, una aceptancia máxima de 0.0106 cm²sr (ver Figura 19), un ángulo sólido máximo de 0.00275 $x10^{-3}$ sr (ver Figura 18), una resolución angular de 1.66

mrad y una resolución espacial de 0.64m cuando el telescopio es ubicado a 385 m de distancia del cuerpo de la presa.

Figura 17.

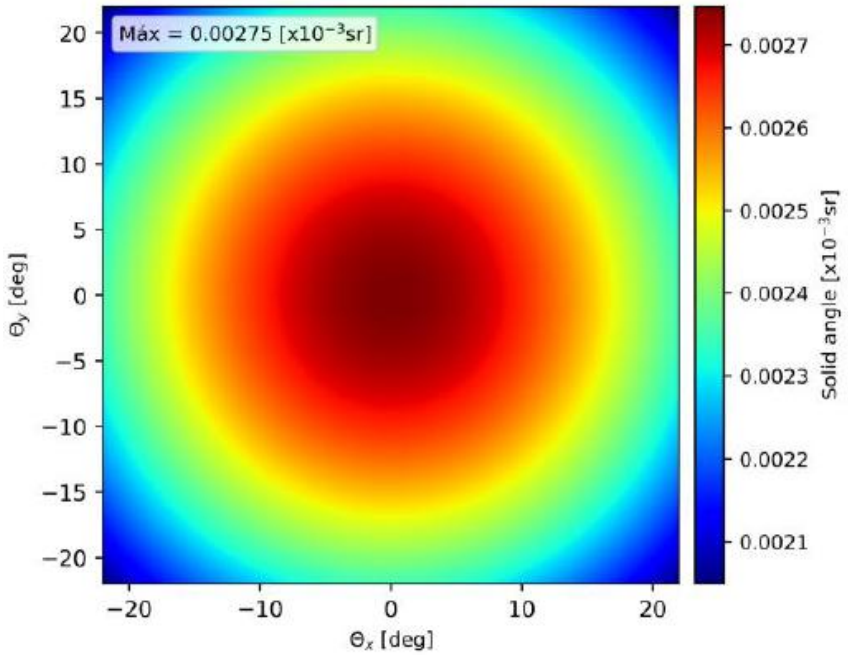
Configuración del telescopio.



Nota: Elaboración propia

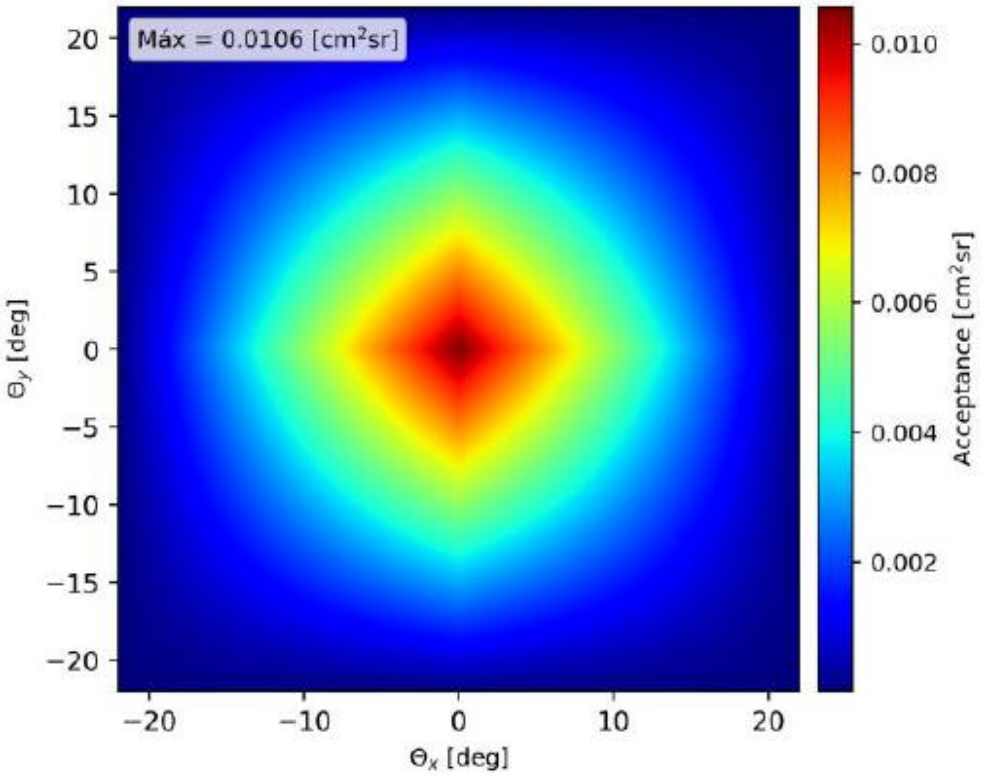
Figura 18.

Ángulo sólido



Nota: Elaboración propia

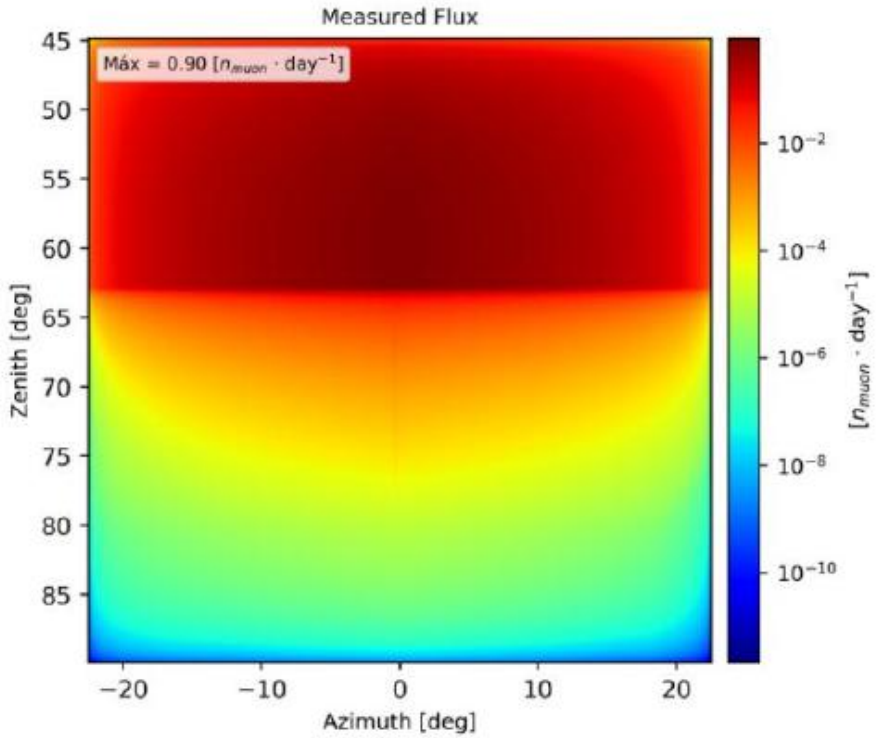
Figura 19. *Aceptancia del telescopio.*



Nota: Elaboración propia

2.3.5 Tiempos de observación.

Figura 20. *Tasa de muones por día*

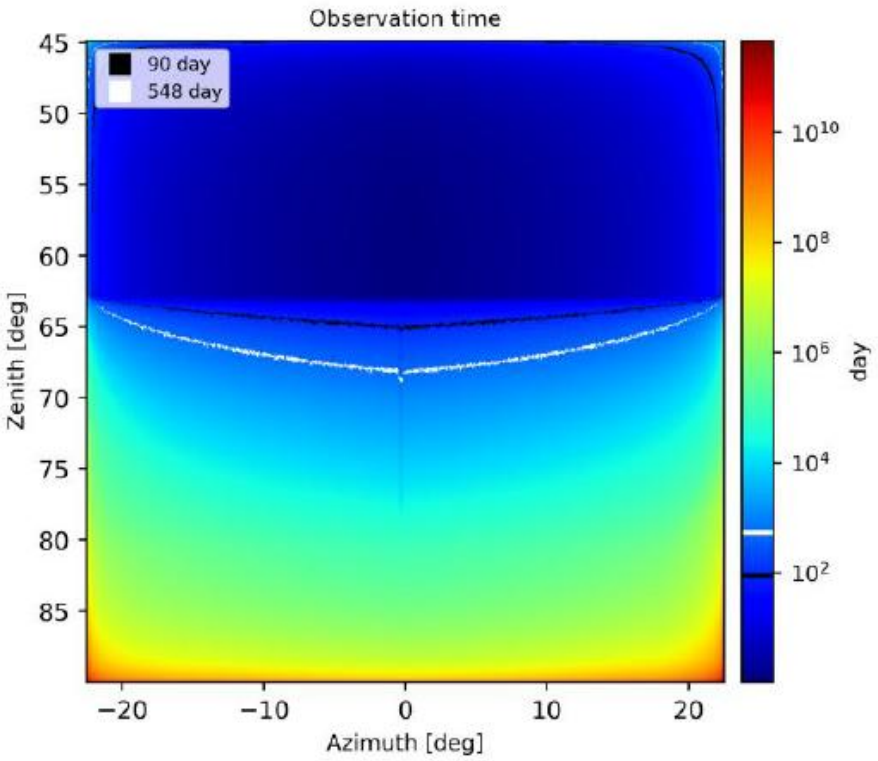


Nota: Elaboración propia

Definiendo como límite mínimo 1 muon por pixel se obtiene el mapa de días necesarios para obtener información en una trayectoria específica.

Figura 21.

Mapa de tiempos de observación, el área superior a las curvas resaltadas indican las zonas donde el tiempo de observación es menor al indicado (Negro - 3 meses, Blanco - 1.5 años).



Nota: Elaboración propia

Los mapas de tiempos de observación ayudan a identificar el tiempo necesario para obtener una imagen relevante en la zona de interés, este tiempo depende fuertemente de configuraciones del telescopio como apertura angular, elevación y altitud y de propiedades de la estructura como densidad, dimensiones y ubicación geográfica.

La figura n muestra la tasa de muones por día, en ella se observa que la cantidad máxima son 0.4 muones por día en la parte media-alta del mapa donde el flujo es a cielo abierto, la aceptancia del telescopio es mayor,y el cenith es mayor respecto a las zonas bajas del mapa. La tasa mínima de muones por día, del orden de 10x10−11 en la zona baja de la estructura se da por el las distancias que recorre el muón en esta zona, pero sobretodo por el ángulo cenital cercano a 90° donde el flujo de muones es mínimo.

3. Conclusiones

La duración del tiempo de adquisición de datos en los estudios de muografía puede variar significativamente, desde unas pocas horas hasta varios meses, dependiendo de factores como el tamaño y la densidad del objeto bajo inspección, así como la falla que se quiera detectar y de la resolución deseada en la imagen final.

Debido a las condiciones de las fallas en estructuras civiles y sus dimensiones pequeñas, los telescopios requieren una resolución muy alta, disminuyendo drásticamente el ángulo sólido y consecuentemente la aceptancia, provocando que los tiempos de observación sean más altos. En la simulación realizada sobre la presa Hidrosogamoso se obtuvieron tiempos de observación mayores a 2 años para detectar en su totalidad la grieta vertical.

La orientación del telescopio con respecto a la falla estructural es decisiva: alinear la línea de visión con el plano de la grieta o la zona sospechosa maximiza la diferencia de opacidad entre material sano y material dañado o con una falla estructural debido a una mayor aceptancia en la zona central del telescopio. Además, colocar el telescopio de tal forma que la falla quede en un cenith menor a 45°, cercano a la vertical donde el flujo es mucho mayor, puede aumentar hasta 200 veces el flujo de muones comparado con el flujo en la horizontal (Borja, C., 2022), disminuyendo drásticamente el tiempo de observación.

En la simulación realizada se estudió una falla estructural de dimensiones muy pequeñas, para fallas más grandes como zonas de menor densidad por debilitamiento de concreto la resolución puede ser menor y con esto el tiempo de observación es menor.

En presas donde la topografía permita ubicar el telescopio lo más cercano a la zona de la falla estructural se pueden obtener mejores resultados debido a que se requieren menos barras en el telescopio para obtener la resolución espacial necesaria, resultando en una mayor

aceptancia. Aunque simulaciones ubicando el telescopio a menos de 100 m de la falla arrojaron una aceptancia superior a 1 cm^2sr (reduciendo el tiempo de observación), esta proximidad no es factible en Hidrosogamoso debido a la topografía.

Si bien la muografía no reemplaza a las técnicas tradicionales, su papel complementario se vuelve cada vez más relevante conforme avanza la tecnología. Continuar investigando e innovando en este campo permitirá superar las limitaciones actuales y ampliar las fronteras de lo que podemos inspeccionar sin destruir, reforzando así el monitoreo de las estructuras civiles.

4. Recomendaciones

En muchos casos, la muografía puede ser útil como una herramienta complementaria a los métodos tradicionales. Por ejemplo, tras identificar una anomalía mediante muografía, se podrían emplear técnicas más localizadas y de mayor resolución, como las pruebas ultrasónicas, para obtener información más detallada sobre la naturaleza del problema. La combinación de diferentes técnicas de inspección puede proporcionar una evaluación más completa y precisa del estado de las estructuras.

Antes de desplegar un experimento, es recomendable realizar múltiples simulaciones que identifiquen la mejor ubicación y orientación de los detectores, maximizar el ángulo sólido cubierto y la sensibilidad a las posibles anomalías de interés. En estructuras críticas, considerar el uso de más de un detector si la logística lo permite, para obtener cobertura desde varios puntos.

La integración de la muografía en estrategias rutinarias de monitoreo todavía está en etapas tempranas. Para que la técnica sea adoptada ampliamente, deberá simplificarse su implementación y reducirse costos de construcción de telescopios de muones, posiblemente mediante la estandarización de equipos y procedimientos.

Referencias Bibliográficas

Anastasio, A., et al. (2013). The mu-ray detector for muon radiography of volcanoes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 732,* 423–426. https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.05.159

AlHamaydeh, M., et al. (2022). Structural health monitoring techniques and technologies for large-scale structures: Challenges, limitations, and recommendations. *Practice Periodical on Structural Design and Construction, 27*(3), 03122004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000703

Baccani, G., et al. (2019). Muon radiography of ancient mines: The San Silvestro archaeomining park (Campiglia Marittima, Tuscany). *Universe, 5*(1). https://doi.org/10.3390/universe5010034

Barón, F. (2019). *Inventario de las represas en Colombia*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. https://repositorio.escuelaing.edu.co

Bennett, M. D. (2025). *South Fork Dam (Pennsylvania, 1889)*. ASDSO: Lessons Learned from Dam Incidents and Failures. https://damfailures.org/case-study/south-fork-dam-pennsylvania-1889/damfailures.org+3damfailures.org+3

Bonneville, A., et al. (2019). Borehole muography of subsurface reservoirs. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 377*(2137), 20180060. https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0060

Borja, C., Ávila, C., Roque, G., & Sánchez, M. (2022). Atmospheric muon flux measurement near Earth's equatorial line. *Instruments, 6*(4), 78. https://doi.org/10.3390/instruments6040078

Bryman, D., et al. (2014). Muon geotomography—Bringing new physics to orebody imaging. In *Building Exploration Capability for the 21st Century*. Society of Economic Geologists. https://doi.org/10.5382/SP.18.11

Caffau, E., et al. (1997). Underground cosmic-ray measurement for morphological reconstruction of the "Grotta Gigante" natural cave. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 385*(3), 480–488. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01041-8

Chadwick, W. L., et al. (1976, diciembre). *Report to U.S. Department of the Interior and State of Idaho on failure of Teton Dam*. Independent Panel to Review Cause of Teton Dam Failure. Idaho Falls, Idaho, USA.

Chaiwongkhot, K., et al. (2018). Development of a portable muography detector for infrastructure degradation investigation. *IEEE Transactions on Nuclear Science, 65*(8), 2316–2324. https://doi.org/10.1109/TNS.2018.2855737

Das, S., et al. (2022). Muography for inspection of civil structures. *Instruments, 6*(4), 77. https://doi.org/10.3390/instruments6040077

De León-Barrios, R., Peña-Rodríguez, J., Sanabria-Gómez, J., Vásquez-Ramírez, A., Calderón-Ardila, R., Sarmiento-Cano, C., Vesga-Ramírez, A., Sierra Porta, D., Suárez-Durán, M., Asorey, H., & Núñez, L. (2021). Muography for the Colombian volcanoes. In *Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference PoS(ICRC2021).* https://doi.org/10.22323/1.395.0280

Dobrowolska, M., et al. (2020). Towards an application of muon scattering tomography as a technique for detecting rebars in concrete. *Smart Materials and Structures, 29*(5), 055015. https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab7a3f

Federal Emergency Management Agency. (2014). *Dam safety in the United States: A progress report on the National Dam Safety Program: Fiscal years 2012 and 2013*. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/dam-safety-progress-report-2012-2013.pdf

France 24. (2024, 26 de enero). Brasil: cinco años después de la tragedia en Brumadinho. https://www.france24.com/es/programas/medio-ambiente/20240126-brasil-cinco-a%C3%B1os-despu%C3%A9s-de-la-tragedia-en-brumadinho

Frazão, L., et al. (2019). High-resolution imaging of nuclear waste containers with muon scattering tomography. *Journal of Instrumentation, 14*(08), P08005. https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/08/P08005

Glez Haramboure, Y., Sosa, O., & Díaz, S. (2017). Las fallas en presas de tierra. Caso de estudio: falla por estabilidad de taludes en función de las condiciones de drenaje.

Gómez López de Munain, R. (s.f.). *4.1 Modos de falla presas de tierra* [Presentación de diapositivas]. Scribd. https://es.scribd.com/document/556636606/4-1-Modos-de-Falla-Presas-de-Tierra

Groom, D. E., et al. (2001). Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables, 78*(2), 183–356. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0092640X01908617

Guardincerri, E., et al. (2019). Imaging the dome of Santa Maria del Fiore using cosmic rays. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 377*(2137), 20180136. https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0136

International Commission on Large Dams (ICOLD). (n.d.). *Definition of a large dam*. Recuperado el 21 de mayo de 2023, de https://www.icold-cigb.org/GB/dams/definition_of_a_large_dam.asp

Kaiser, R. (2019). Muography: Overview and future directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 377*(2137), 20180049. https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0049

Keshmiry, A., Hassani, S., Mousavi, M., & Dackermann, U. (2023). Effects of environmental and operational conditions on structural health monitoring and non-destructive testing: A systematic review. *Buildings, 13*(4), 918. https://doi.org/10.3390/buildings13040918

Lázaro Roche, I. (2021). A compact muon tracker for dynamic tomography of density based on a thin time projection chamber with Micromegas readout. *Particles, 4*(3), 333–342. https://doi.org/10.3390/particles4030028

Lesparre, N., Gibert, D., Marteau, J., Déclais, Y., Carbone, D., & Galichet, E. (2010). Geophysical muon imaging: Feasibility and limits. *Geophysical Journal International, 183*(3), 1348–1361. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04790.x

Mahon, D., et al. (2019). First-of-a-kind muography for nuclear waste characterization. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 377*(2137), 20180048. https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0048

Morishima, K., et al. (2017). Discovery of a big void in Khufu's pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature, 552*(7685), 386–390. https://doi.org/10.1038/nature24647

Niederleithinger, E., et al. (2021). Muon tomography of the interior of a reinforced concrete block: First experimental proof of concept. *Journal of Nondestructive Evaluation, 40*(3), 65. https://doi.org/10.1007/s10921-021-00797-3

Nishiyama, R., et al. (2014). Integrated processing of muon radiography and gravity anomaly data toward the realization of high-resolution 3D density structural analysis of volcanoes: Case study of Showa-Shinzan lava dome, Usu, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119*(1), 699–710. https://doi.org/10.1002/2013JB010234

Peña-Rodríguez, J. (2021). *Diseño y calibración de un telescopio de muones híbrido para estudios vulcanológicos* [Tesis doctoral, Universidad Industrial de Santander]. http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=191534|%20|1|4

Peña-Rodríguez, J., Pisco-Guabave, J., Sierra-Porta, D., Suárez-Durán, M., Arenas-Flórez, M., Pérez-Archila, L. M., Sanabria-Gómez, J. D., Asorey, H., & Núñez, L. A. (2020). Design and construction of MuTe: A hybrid muon telescope to study Colombian volcanoes. *Journal of Instrumentation*. https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/P09006

Procureur, S. (2018). Muon imaging: Principles, technologies and applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 878,* 169–179. https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.08.004

Reyna, D. (2006). A simple parameterization of the cosmic-ray muon momentum spectra at the surface as a function of zenith angle. https://doi.org/10.48550/arXiv.hep-ph/0604145

Santander Competitivo. (n.d.). *Central Hidroeléctrica Sogamoso*. Recuperado el 10 de abril de 2025, de https://santandercompetitivo.org/proyectos-estrategicos/en-funcionamiento/central-hidroelectrica-sogamoso/

Tanaka, H. K. M. (2022). Muography for a dense tide monitoring network. *Scientific Reports, 12*(1), 6725. https://doi.org/10.1038/s41598-022-10373-y

Tanaka, H. K. M., et al. (2021). First results of undersea muography with the Tokyo-Bay seafloor hyper-kilometric submarine deep detector. *Scientific Reports, 11*(1), 19485. https://doi.org/10.1038/s41598-021-98559-8

The Constructor. (2017). *Common causes of failures of dam structures*. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de https://theconstructor.org/structures/common-causes-failures-dam-structures/20858/

Thompson, L. F., et al. (2020). Muon tomography for railway tunnel imaging. *Physical Review Research, 2,* 023017. https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.023017

Vanini, S., et al. (2019). Muography of different structures using muon scattering and absorption algorithms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 377*(2137), 20180051. https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0051

Wang, T. (2010). Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes. *Engineering Geology, 115*(1–2), 80–95. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.06.010

Yamazaki, K., et al. (2022). Development of detector and method for density structure measurement of fault zones using cosmic ray muons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1031,* 166518. https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.166518

Zenoni, A. (2015). Historical building stability monitoring by means of a cosmic ray tracking system. In *2015 4th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA)* (pp. 1–8). https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2015.7465542