aci avances en ciencias e ingenierías

Artículo/Article
Vol. 18, nro. 2
e4049

Integración de herramientas digitales para la confiabilidad estructural en presas de relaves: transformación del control de calidad basado en datos

Alexis Muela[1], Anahí Ordóñez[1], Jorge Carrasco[1], César Vásquez[1], Estanislao Lojano[1], Jean Pardo[1]

[1]Ecuacorriente S.A. (ECSA), Ecuador

Corresponding author/Autor correspondiente, email: bryanmuela@hotmail.com

Integration of digital tools for structural reliability in tailing storage facilities: a shift to data-driven quality control

Resumen

Las presas de relaves son estructuras críticas debido a su volumen de construcción y capacidad de almacenamiento. Un diseño robusto, junto con un control de calidad riguroso durante la construcción y una operación y monitoreo adecuados, contribuye a reducir los riesgos asociados al desempeño estructural de las presas. En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue implementar un sistema de control de calidad basado en datos de ensayos geotécnicos para permitir el procesamiento eficiente de información y visualización de tableros interactivos, con el fin de fortalecer la toma de decisiones relacionadas con la confiabilidad del comportamiento geotécnico y estructural durante la etapa constructiva. La metodología consta de cuatro componentes: (i) extracción, transformación y carga (ETL) de los datos generados por los ensayos, (ii) análisis y control de calidad de la información, (iii) visualización; y (iv) aplicación en un caso de estudio. Este sistema se implementó en la construcción de la presa del depósito de relaves Tundayme de la mina Mirador, integrando resultados de ensayos de densidad *in situ* por el método de reemplazo de agua, análisis granulométrico, humedad y resistencia al corte en suelos cohesivos. Como resultado, se logró procesar 26,500 ensayos entre agosto de 2021 y junio de 2025, reduciendo significativamente los tiempos de procesamiento respecto a las hojas de cálculo tradicionalmente empleadas. Se identificaron desafíos relacionados con los costos iniciales de infraestructura tecnológica y la capacitación del personal; sin embargo, los beneficios obtenidos justifican la inversión y constituyen un aporte relevante a la digitalización de los procesos de control de calidad en ingeniería civil.

Palabras clave: Análisis de datos, control de calidad, tableros interactivos, depósitos de relaves, desempeño geotécnico, ensayos de densidad, proyectos mineros.

Abstract

Tailings Storage Facilities (TSFs) are critical structures due to their construction volume and storage capacity. A robust design, supported by rigorous quality control during construction and adequate operation and monitoring, contributes to reducing the risks associated with the structural performance of dams. In this context, the objective of this research was to

OPEN ACCESS

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Editado por / Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido / Received:
11/10/2025

Aceptado / Accepted:
26/12/2025

Publicado en línea / Published online:
10/11/2026

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

implement a data-driven quality control system based on geotechnical test data that enables efficient data processing and interactive dashboard visualization to strengthen decision-making related to the reliability of geotechnical and structural performance during the construction phase. The methodology comprises four components: (i) data extraction, transformation, and loading (ETL) from the testing process; (ii) data analysis and quality control; (iii) visualization; and (iv) application to a case study. The system was implemented during the construction of the Tundayme tailings storage facility dam at the Mirador mine, integrating data from in-place field density tests using the water replacement method, grain-size distribution analysis, moisture content, and shear strength of cohesive soils. As a result, 26,500 tests were processed between August 2021 and June 2025, significantly reducing processing time compared to traditional spreadsheet-based workflows. Challenges were identified related to initial investments in technological infrastructure and staff training; nevertheless, the benefits obtained through the implementation of this methodology outweigh the required investment. This approach represents a significant advancement toward the digitalization of quality control processes in civil engineering.

Keywords: Data analysis, quality control, interactive dashboards, tailings storage facilities, geotechnical performance, density testing, mining projects.

Las presas de los depósitos de relaves, por lo general, son diques de material de relleno compactado que pueden alcanzar millones de metros cúbicos, lo que las convierte en estructuras críticas que requieren un continuo control geotécnico y constructivo. La construcción y operación de este tipo de infraestructuras constituye una actividad fundamental dentro del ciclo de vida de un proyecto minero, ya que permite la disposición segura y controlada de los residuos generados durante los procesos de trituración, molienda y concentración empleados para el beneficio de los minerales [1]. Sin embargo, a lo largo de la historia de la minería se han producido eventos desastrosos que obligan a realizar una gestión más eficiente en los depósitos de relaves. Varias investigaciones han identificado factores comunes relacionados con la ingeniería de diseño, la fiscalización y el control de calidad durante la construcción, la falta de mantenimiento y la vulnerabilidad ante posibles eventos extremos [2]. Por ello, surge la necesidad de incorporar herramientas digitales para mejorar el control de parámetros críticos durante la construcción y operación de estas estructuras.

En las prácticas de minería actuales, la seguridad de las presas no se limita únicamente al diseño, sino que los procesos se fortalecen con un control de calidad preciso y continuo de los materiales empleados durante su construcción. Esta actividad es esencial para mantener los parámetros de construcción dentro de las especificaciones de diseño y prevenir eventualidades que puedan producir fallas críticas en la estructura.

En Ecuador, el principal instrumento normativo técnico para el manejo de presas de relaves es el Instructivo para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y mantenimiento de depósitos de relaves para la mediana y gran minería [3]. Este instructivo fue elaborado tomando como referencia diversas publicaciones técnicas y guías internacionales, entre ellas las de la Asociación Canadiense de Presas (CDA) [4].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

Para dar cumplimiento a la normativa vigente, resulta imprescindible una gestión de datos que permita la integración, organización y visualización en tiempo casi real de la información recolectada durante las actividades diarias. Bajo este enfoque, la investigación tiene como objetivo optimizar el control de calidad de los materiales utilizados en la construcción mediante la gestión y el análisis de datos de ensayos geotécnicos de campo y laboratorio, con el fin de fortalecer la toma de decisiones y aumentar la confiabilidad estructural.

Este tipo de proyectos requieren controlar la calidad de parámetros mediante ensayos de suelos y roca, ejecutados en campo y laboratorio. En el presente estudio, el alcance se centró en analizar los parámetros de control de los ensayos más representativos tales como densidad *in situ*, análisis granulométrico, contenido de humedad y resistencia al corte con veleta de campo en suelos cohesivos.

El porcentaje de compactación es un parámetro indirecto que brinda una visión general de la estabilidad en estructuras de material granular, el cual constituye una condición fundamental para garantizar la operación segura de la presa y su integridad estructural [5]. El control de este parámetro se realiza a partir del ensayo de densidad *in situ* por el método de reemplazo de agua, que proporciona información del peso unitario seco del material colocado, lo que permite verificar el cumplimiento de los niveles de compactación establecidos en las especificaciones técnicas. El control de calidad se complementa con ensayos de análisis granulométrico y cantidad de humedad que permiten caracterizar las propiedades físicas del material.

Por su parte, el ensayo de veleta de campo en suelos cohesivos proporciona información sobre la resistencia al corte no drenada y la resistencia al corte remoldeada no drenada, lo que facilita la evaluación de la calidad de la fundación. Este parámetro permite identificar zonas con variaciones significativas en la resistencia del terreno, lo cual es clave para ajustar los métodos constructivos y mitigar posibles riesgos asociados a la cimentación.

El análisis de estos resultados, obtenidos a partir de muestras aleatorias representativas y con una cobertura espacial amplia, proporciona una visión detallada y objetiva del proceso constructivo, lo que contribuye a reducir el riesgo de fallo de la presa.

La Figura 1 muestra el incremento proyectado en los datos de laboratorio durante un periodo de seis años (2023-2029) en el depósito de relaves Tundayme de la mina Mirador, con un aumento anual entre 8,000 y 14,000 ensayos, los cuales están sujetos a aumentarse cuando se ejecutan campañas de investigación geotécnica, producto de la evaluación permanente de la presa.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

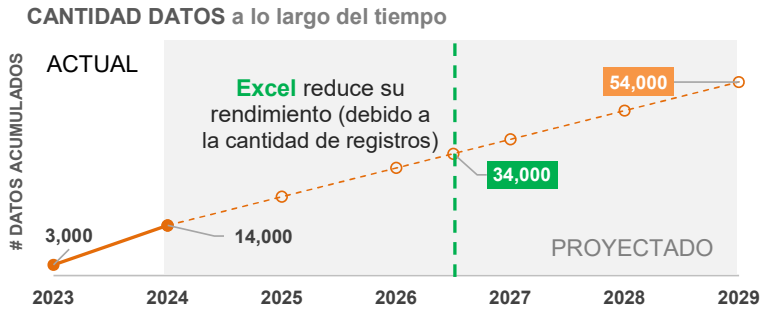


FIGURA 1. Crecimiento proyectado de datos de laboratorio.

Este crecimiento representa un desafío significativo en términos del tiempo y recursos requeridos para el análisis de datos, así como en la generación de información relevante para el control de calidad. Aunque las herramientas tradicionales como Excel permiten realizar análisis de datos, a partir de 34,000 datos el sistema de gestión y procesamiento se vuelve ineficiente. Por ello se propuso implementar un sistema robusto de gestión de datos mediante un gestor de bases de datos (BD) PostgreSQL [6], utilizando el lenguaje Structured Query Language (SQL), con el fin de optimizar el almacenamiento y el procesamiento eficiente de la información. La aplicación de tecnología de datos al monitoreo geotécnico es fundamental para manejar y analizar grandes cantidades de información, asegurando la integridad de los datos y la capacidad de realizar análisis en tiempo real [7].

Además, se integra Tableau [8], un software diseñado originalmente para inteligencia de negocios (BI), el cual fue adaptado conforme los requerimientos del proyecto. Esta tecnología utiliza tableros digitales para una visualización dinámica de información referente al volumen de ensayos ejecutados y la calidad de los materiales empleados. Los tableros permiten al usuario interactuar con los datos, filtrar vistas y profundizar en parámetros específicos, lo que facilita la toma de decisiones oportunas fundamentadas en datos [9]. Además, el sistema cuenta con herramientas estadísticas para realizar pruebas de regresión, análisis de varianza y análisis predictivo, con el fin de anticipar posibles resultados futuros.

Otra ventaja significativa del uso de Tableau [8] es la automatización de informes que sintetizan los ensayos realizados y sus resultados en un periodo definido. Una vez establecido el esquema del informe, el flujo de trabajo se automatiza mediante la actualización de la BD. Estos reportes están diseñados para proporcionar información útil a las partes interesadas, ayudando a garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad y facilitando respuestas rápidas a cualquier discrepancia con los resultados esperados.

La metodología propuesta se organiza en cuatro componentes: (i) extracción, transformación y carga (ETL) de los datos generados por los ensayos geotécnicos de campo y laboratorio; (ii) análisis y control de calidad de la información; (iii) visualización; y (iv) aplicación en un caso de estudio. Esta estructura facilita la trazabilidad de la información y la integración de herramientas de análisis estadístico orientadas al control

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

de calidad. La metodología se aplicó en la presa del depósito de relaves Tundayme de la mina Mirador, propiedad de Ecuacorriente S.A. (ECSA). La mina Mirador desarrolla sus operaciones de extracción a cielo abierto y se ubica cerca de la frontera entre Ecuador y Perú, en la provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador.

El primer componente consiste en estandarizar la información previamente almacenada en hojas de cálculo independientes y migrarla a un sistema de gestión de BD. Debido a que SQL es un sistema eficiente para la gestión de datos, esta tecnología es fundamental para manejar y analizar grandes conjuntos de información. Estos sistemas facilitan el almacenamiento, la recuperación y la manipulación de datos, lo que permite realizar análisis complejos [10].

La Figura 2 muestra la arquitectura de un sistema de gestión de BD relacional, ilustrando cómo varias tablas interactúan dentro de una misma estructura. Esta configuración es clave para gestionar grandes volúmenes de información, típicos de proyectos de presas de relaves. Cada tabla puede almacenar distintos conjuntos de información relacionados con el desempeño y las características del material, que son cruciales para evaluar la integridad estructural.

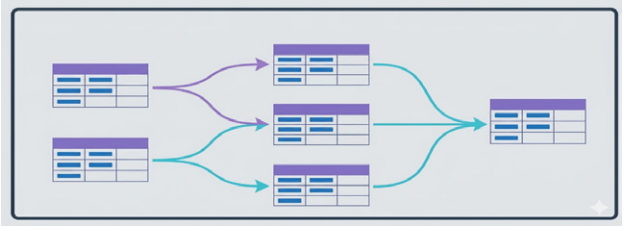


FIGURA 2. Sistema de gestión de bases de datos relacionales.

La Figura 3 presenta la interfaz de la BD en SQL utilizada en el control de calidad de la presa del depósito de relaves Tundayme, donde se visualizan 10 de 39 tablas que contienen información de los ensayos geotécnicos realizados a los materiales de la presa. Cada tabla cuenta con un esquema de codificación estandarizado, lo que facilita la organización de la información.

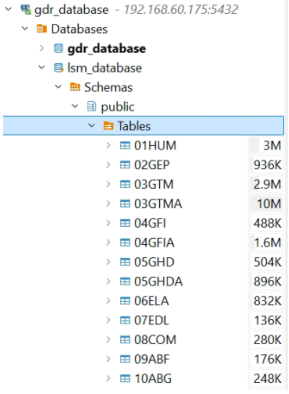


FIGURA 3. Esquema de BD de PostgreSQL.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

A partir de la información almacenada en la BD, se aplican técnicas de estadística descriptiva y análisis de correlación a los resultados de los ensayos realizados tanto en campo como en laboratorio. Entre los ensayos que este estudio analizó se incluyen tres ensayos del material colocado, los cuales se detallan en la Tabla 1, y un ensayo en el suelo de fundación de la presa (Tabla 2). Las normas ASTM empleadas para cada ensayo garantizan que estos se realicen de acuerdo con procedimientos estandarizados internacionalmente.

TABLA 1. Ensayos del material colocado.

Código	Nombre del ensayo	Norma
PRA	Densidad ***in situ*** por el método de reemplazo de agua	ASTM D5030 [11]
GTM	Análisis granulométrico	ASTM D6913 [12]
HUM	Humedad	ASTM D2216 [13]

TABLA 2. Ensayos de fundación.

Código	Nombre del ensayo	Norma
VDC	Veleta de corte en suelos cohesivos	ASTM D2573 [14]

Los resultados se visualizan mediante tableros interactivos y mapas georreferenciados desarrollados en Tableau [9]. La conexión directa entre Tableau y la BD implementada en PostgreSQL [7, 9] permite el análisis de datos en tiempo real [15].

Como resultado de la implementación del sistema, se desarrollaron análisis y visualizaciones avanzadas aplicadas al control de calidad y a la evaluación de la confiabilidad estructural. La Figura 4 presenta el conjunto histórico de datos, que comprende 26,500 ensayos ejecutados entre agosto de 2021 y junio de 2025; de los cuales, 4,741 corresponden específicamente a los cuatro tipos de ensayos analizados en este estudio durante el primer semestre de 2025.

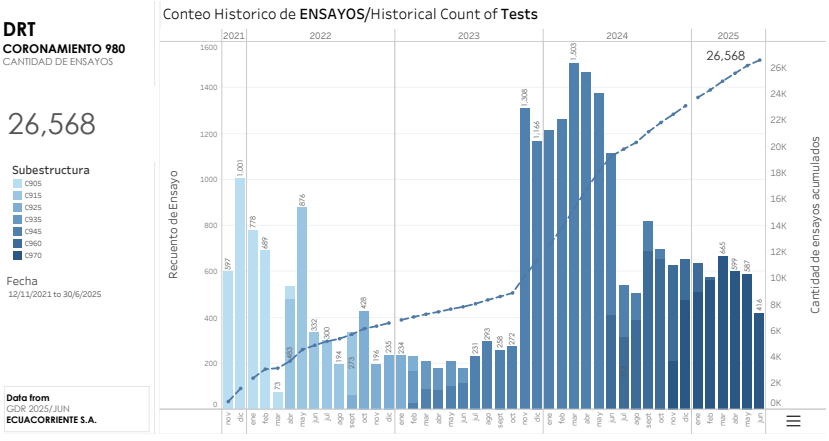


FIGURA 4. Conteo de ensayos 2021-2025 de la presa del depósito de relaves Tundayme.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

La Figura 5 presenta la distribución espacial de los ensayos de veleta de corte *in situ* durante el primer semestre de 2025. El análisis de la representación georreferenciada permitió visualizar la concentración de ensayos y los valores de resistencia al corte del suelo de fundación mediante una escala en tonos de verde, donde las tonalidades más claras indican resultados menores. El análisis permitió identificar zonas con resultados cercanos al umbral mínimo de 50 kN/m^2 establecido en las especificaciones técnicas de construcción. A partir de estos resultados, se priorizaron inspecciones técnicas en las zonas con tendencia a la pérdida de estabilidad, con el fin de evaluar riesgos potenciales y tomar acciones, de ser necesario.

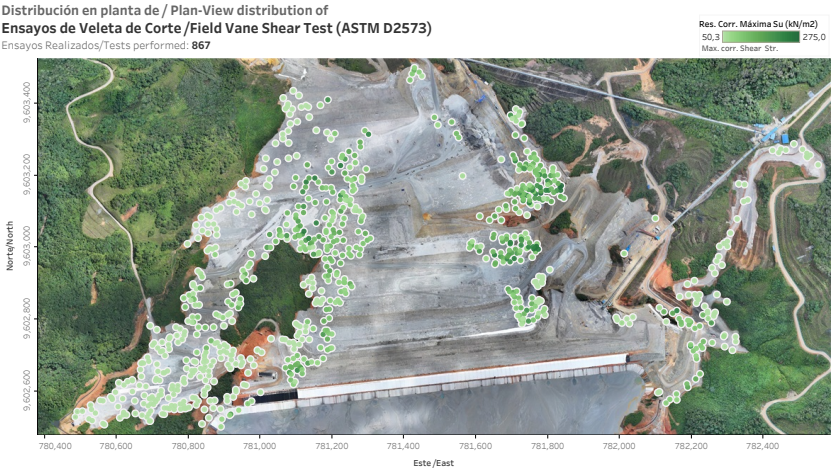


FIGURA 5. Distribución de los ensayos de veleta de corte (enero-junio 2025).

La Figura 6 presenta la distribución espacial de 1,664 ensayos de densidad *in situ* realizados por el método de reemplazo de agua entre enero y junio de 2025. Cada punto marca la ubicación del ensayo; la intensidad del color azul indica la densidad seca en un rango de 2,070 a 2,554 kg/m^3, y el tamaño del círculo representa la humedad natural, que se encuentra en un rango de 2.71 % a 9.27 %. Los resultados muestran que todas las áreas evaluadas alcanzaron o superaron el criterio mínimo de 2,070 kg/m^3, establecido en las especificaciones técnicas. En caso de que el parámetro resulte menor al mínimo permitido, se recompacta la capa de material y se evalúa nuevamente la densidad.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

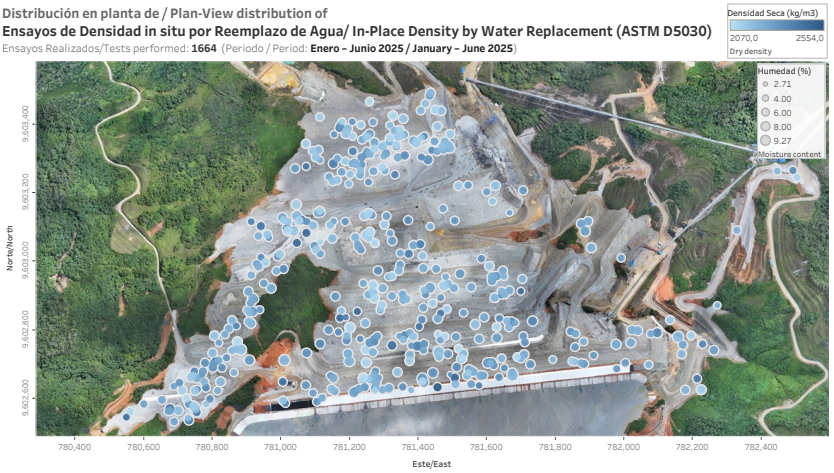


FIGURA 6. Distribución de los ensayos de densidad *in situ* por el método de reemplazo de agua (enero-junio 2025).

El mapa de calor de la Figura 7 presenta las zonas en las que se ha realizado una mayor cantidad de ensayos de densidad *in situ*. La escala de colores varía desde tonos de verde, que indican una baja concentración de pruebas, hasta tonos de naranja, que representan una alta concentración. En general, esto permite un muestreo más homogéneo en toda el área intervenida. Las zonas con tonalidad naranja indican una mayor actividad constructiva y mayores volúmenes de material colocado.

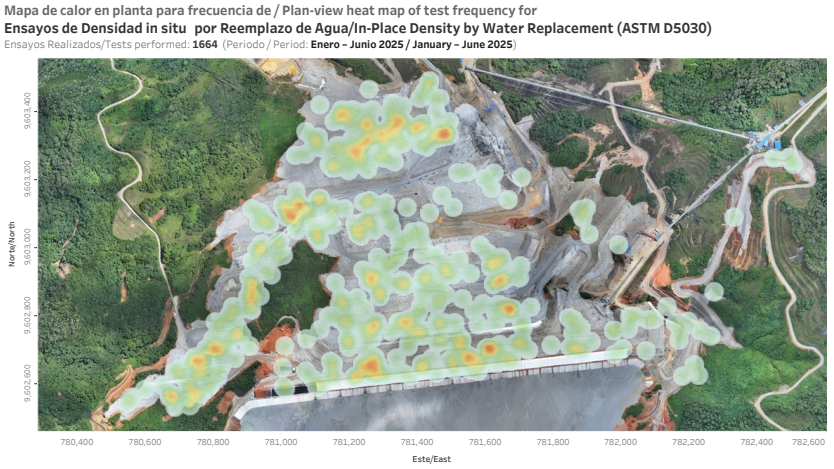


FIGURA 7. Mapa de calor para la frecuencia de ensayos de densidad in situ por el método de reemplazo de agua (enero-junio 2025).

Como se observa en la Figura 8, en el primer semestre de 2025 los valores de densidad seca se concentran entre ~2,150 y 2,300 kg/m^3, con un promedio cercano a 2,240 kg/m^3, manteniéndose por encima del umbral mínimo de 2,070 kg/m^3. En los primeros meses se observó la proximidad de algunos registros al límite inferior esperado; sin embargo,

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

a partir de marzo de 2025 se evidenció un aumento en los valores, lo que sugiere una mejora en el proceso de compactación. Con el control sistemático y la trazabilidad de los registros, se mantuvo el cumplimiento de las especificaciones y se facilitaron ajustes correctivos en tiempo real en la zona de construcción.

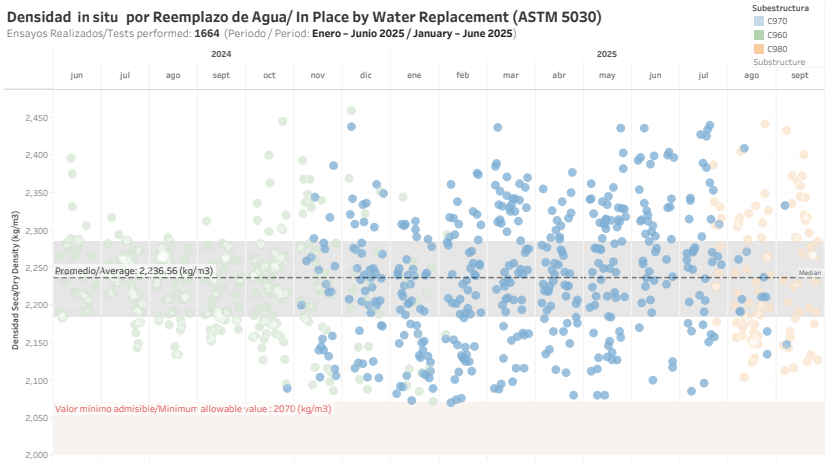


FIGURA 8. Evolución de la densidad seca en ensayos in situ por el método de reemplazo de agua (enero-junio 2025).

En la Figura 9, la nube de 1,664 puntos indica una correlación negativa entre humedad y la densidad seca. La mayoría de las lecturas se concentró entre 2,200 y 2,350 kg/m^3 y permaneció por encima del umbral de 2,070 kg/m^3 (línea vertical). Este patrón sugiere que, en temporada lluviosa, es importante reforzar el control de calidad (ajuste del número de pasadas y del espesor de capa) para evitar aproximaciones al valor mínimo y mantener la calidad de compactación.

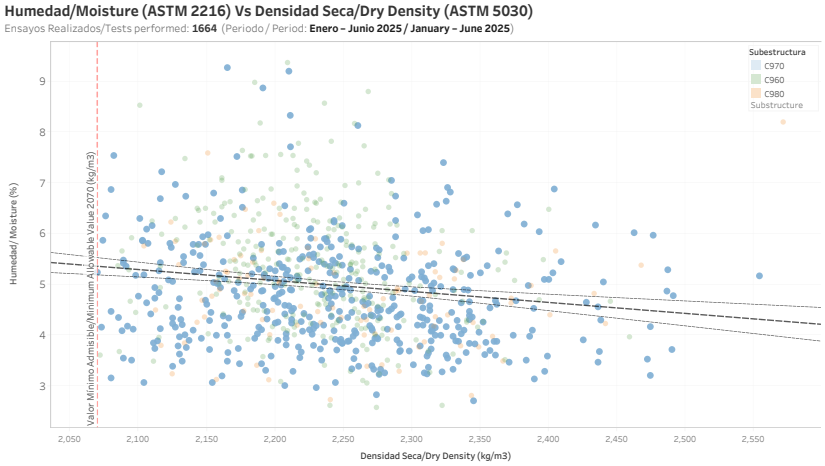


FIGURA 9. Humedad vs densidad seca en ensayos *in situ* por el método de reemplazo de agua (enero-junio 2025).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

El material utilizado debe cumplir con las especificaciones técnicas; entre ellas, los criterios granulométricos. La Figura 10 muestra el huso granulométrico junto con las curvas obtenidas a partir de los ensayos de laboratorio. Se observa que casi la totalidad de las muestras se ajustó a los límites establecidos, con excepción de algunos casos que presentaron mayor contenido de arena y finos del esperado. La distribución granulométrica es un parámetro importante, ya que influye directamente en el comportamiento del material durante la compactación, afectando su densidad.

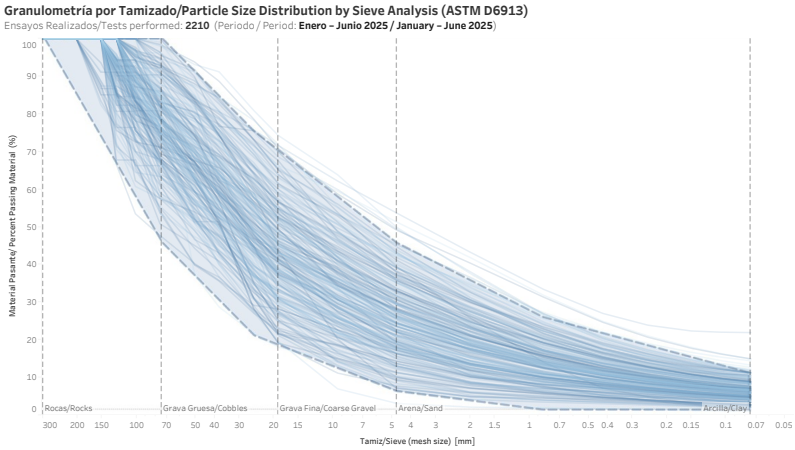


FIGURA 10. Granulometría del material (enero – junio 2025).

La implementación de una BD permitió una reducción en los tiempos de procesamiento en comparación con las hojas de cálculo tradicionales. La incorporación de herramientas tecnológicas para el almacenamiento, la recuperación y la manipulación de grandes volúmenes de datos favorece una gestión de la información más eficiente y disminuye el riesgo de pérdida o alteración de los registros [16].

Además, las estrategias de control de calidad basadas en análisis en tiempo casi real fortalecen la respuesta ante resultados atípicos y permiten integrar datos de campo con modelos predictivos [17]. Este enfoque es consistente con la literatura reciente, que evidencia una transición hacia sistemas digitales integrados para la gestión geotécnica, combinando bases de datos, analítica y herramientas de visualización como soporte para la toma de decisiones en presas y otras infraestructuras [18]. En América Latina, proyectos mineros de gran escala muestran una adopción progresiva de plataformas digitales; por ejemplo, en Perú se ha implementado el sistema DAMSAT para el monitoreo de presas de relaves [19]. Estos antecedentes respaldan la relevancia del enfoque propuesto y su aplicabilidad a contextos similares al presente estudio.

A pesar de sus ventajas, la implementación de esta metodología conlleva desafíos relevantes, entre los que destacan los costos iniciales asociados a la infraestructura tecnológica y la capacitación especializada del personal. Sin embargo, los beneficios en términos de eficiencia operativa y mejora en la trazabilidad de registros superan significativamente la inversión requerida, especialmente a mediano y largo plazo.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

Esta herramienta constituye un cambio de paradigma en el control de la construcción de presas, pues aporta evidencia técnica oportuna para la toma de decisiones estratégicas. A su vez, adopta un enfoque basado en datos que se alinea con las tendencias de transformación digital. Las tecnologías de la Industria 4.0 emergen como alternativas atractivas para fomentar la seguridad y reducir los riesgos de falla de los depósitos de relaves [20]. En este contexto, la principal contribución del presente trabajo radica en la integración de herramientas digitales en el control de calidad de los materiales empleados en la construcción de presas.

En síntesis, la implementación de estos sistemas confirma que la transición hacia un sistema de control de calidad apoyado en bases de datos y visualización interactiva no solo es viable, sino también necesaria para modernizar los estándares constructivos en la ingeniería civil. Esta solución aporta robustez operativa y sostenibilidad técnica a lo largo del ciclo de vida del proyecto, al tiempo que consolida una gobernanza de datos auditable, facilitando el cumplimiento normativo y la alineación con buenas prácticas internacionales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Ecuacorriente S.A. (ECSA) por el apoyo institucional, la autorización para el uso de datos y la aprobación del acceso a la información empleada en este estudio, así como al equipo del Departamento de Gestión del depósito de relaves por su colaboración.

CONTRIBUCIONES AUTORALES

Investigación y tesis original: Alexis Muela.
Redacción: Anahí Ordóñez, Jean Pardo, Estanislao Lojano.
Supervisión: Jorge Carrasco, César Vásquez, Zhu Xuesheng, Zhou Sheng, Zhang Congsong.
Revisión y edición: Jorge Carrasco, Anahí Ordoñez, Alexis Muela.
Software y visualización: Alexis Muela.

DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos operativos utilizados en este manuscrito pertenecen a Ecuacorriente S.A. y contienen información sensible de operación. No pueden hacerse públicos por restricciones de confidencialidad. Códigos utilizados, así como consultas SQL y plantillas de tableros necesarias para reproducir los indicadores, podrán compartirse previa solicitud razonable al autor de correspondencia y sujeto a aprobación interna de ECSA y acuerdos de confidencialidad.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores son empleados/colaboradores de Ecuacorriente S.A. en el momento de la realización de este estudio. La empresa no influyó en el diseño del análisis, la interpretación de los resultados ni en la decisión de someter el manuscrito, más allá de autorizar el uso de datos y la revisión institucional de confidencialidad. No existen otros conflictos de interés que declarar.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049

aci avances en ciencias e ingenierías

REFERENCIAS

[1] Das, M. R., Satapathy, S., & Pothal, L. K. (2023). A study on waste management in iron mining. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.368

[2] Carvalho, D. W. (2020). The Brumadinho Dam rupture disaster, Brazil 2019. *Revista de Estudos Constitucionais, Hermenêutica e Teoria do Direito (RECHTD), 12*(2), 227–238. https://doi.org/10.4013/rechtd.2020.122.04

[3] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2020). *Instructivo para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y mantenimiento de depósitos de relaves para la mediana y gran minería* (Acuerdo Nro. MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM).

[4] Canadian Dam Association. (2013). *Dam safety guidelines* (2013 ed.).

[5] Tschuschke, W., Wróżyńska, M., & Wierzbicki, J. (2017). Quality control for the construction of a tailings dam. *Acta Geotechnica Slovenica, 14*(1), 3–9.

[6] PostgreSQL Global Development Group. (2023). *PostgreSQL 16* [Software]. https://www.postgresql.org/docs/release/16.0/

[7] Wang, Y., Zhang, W., Qi, X., & Ching, J. (2022). Data analytics in geotechnical and geological engineering. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 16*(1), 1. https://doi.org/10.1080/17499518.2022.2038205

[8] Tableau Software, LLC. (2024). *Tableau Desktop 2024.1* [Software]. https://www.tableau.com/2024-1-features

[9] chwabish, J. (2021). *Better data visualizations: A guide for scholars, researchers, and wonks*. Columbia University Press.

[10] Rashidi, M., & Haeri, S. M. (2017). Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9*(4), 709–725. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.12.003

[11] ASTM International. (2021). *Standard test methods for density of in-place soil and rock materials by the water replacement method in a test pit* (ASTM D5030/D5030M-21). https://doi.org/10.1520/D5030_D5030M-21

[12] ASTM International. (2017). *Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis* (ASTM D6913/D6913M-17). https://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-17

[13] ASTM International. (2019). *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass* (ASTM D2216-19). https://doi.org/10.1520/D2216-19

[14] ASTM International. (2018). *Standard test method for field vane shear test in saturated fine-grained soils* (ASTM D2573/D2573M-18). https://doi.org/10.1520/D2573_D2573M-18

[15] Wexler, S., Shaffer, J., & Cotgreave, A. (2017). *The big book of dashboards: Visualizing your data using real-world business scenarios*. Wiley.

[16] Paré, R. C., Casillas, L., Costal, D., Gibert, M., Martín, C., & Pérez, O. (2005). *Bases de datos*. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya.

[17] Clarkson, L., Williams, D., & Seppälä, J. (2020). Real-time monitoring of tailings dams. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1740280

[18] Mwanza, J., Mashumba, P., & Telukdarie, A. (2024). A framework for monitoring stability of tailings dams in real-time using digital twin simulation and machine learning. *Procedia Computer Science, 232*, 2279–2288. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.047

[19] Lumbroso, D., Roca Collell, M., Petkovšek, G., Davison, M., Liu, Y., Goff, C., & Wetton, M. (2021). DAMSAT: An eye in the sky for monitoring tailings dams. *Mine Water and the Environment, 40*(1), 113–127. https://doi.org/10.1007/s10230-020-00727-1

[20] Cacciuttolo, C., Guzmán, V., Catriñir, P., & Atencio, E. (2024). Sensor technologies for safety monitoring in mine tailings storage facilities: Solutions in the Industry 4.0 era. *Minerals, 14*(5), 446. https://doi.org/10.3390/min14050446

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.4049