

Digitalización y Estándares Internacionales en el Cierre de Minas: Alineamiento Técnico con ICMM/GISTM bajo Minería 5.0 en el Perú

Yannick Patrick Carrasco Merma, Pontificia Universidad Católica del Perú

Resumen

La creciente adopción de estándares internacionales para el cierre de minas y la gestión de relaves ha intensificado la necesidad de que los operadores mineros demuestren conformidad técnica, transparencia y una gobernanza de largo plazo a lo largo de todo el ciclo de vida del activo. En el Perú, este desafío se ve además condicionado por la evolución de la normativa de cierre, el fortalecimiento de los requisitos de garantías financieras, los informes periódicos y la validación del cumplimiento por parte de las autoridades reguladoras. En este contexto, la digitalización, enmarcada bajo los principios de la Minería 5.0, es reconocida cada vez más como un habilitador clave para alinear las prácticas de cierre de minas con el Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), promovido por el International Council on Mining and Metals (ICMM).

Este trabajo adopta un enfoque cualitativo basado en estudios de caso, apoyándose en divulgaciones públicas de operaciones mineras peruanas que informan avances hacia la conformidad con el GISTM, complementadas con contribuciones a congresos revisadas por pares sobre la toma de decisiones en cierre de minas apoyada digitalmente. El análisis se centra en los sistemas de monitoreo digital, la gobernanza centralizada de datos, la trazabilidad de la evidencia técnica y el uso de indicadores verificables (KPIs) para apoyar la planificación del cierre, el monitoreo del postcierre y el aseguramiento regulatorio; dimensiones que son identificadas explícitamente como desafíos críticos en el contexto del cierre de minas en el Perú.

Los resultados muestran que la digitalización no sustituye el diseño de ingeniería ni las obligaciones regulatorias, sino que refuerza su ejecución al mejorar la continuidad de los datos, la visibilidad del riesgo y la rendición de cuentas institucional a lo largo de las etapas de cierre y postcierre. Las herramientas digitales contribuyen a estimaciones más robustas de los costos de cierre, al monitoreo de largo plazo del agua y de las instalaciones de relaves, y a una alineación más clara entre la normativa nacional de cierre de minas y los estándares internacionales. El trabajo concluye que la Minería 5.0, cuando se entiende como una transformación digital orientada a la gobernanza y al aseguramiento, y no como un paradigma puramente tecnológico, proporciona un marco práctico y creíble para mejorar la efectividad y la legitimidad de los procesos de cierre de minas en el Perú.

Palabras Clave

Cierre de Minas; Minería 5.0; Digitalización; GISTM; ICMM; Perú; Tailings Management

Abstract

The increasing adoption of international standards for mine closure and tailings management has intensified the need for mining operators to demonstrate technical conformance, transparency and long-term governance across the full asset lifecycle. In Peru, this challenge is further shaped by evolving closure regulations, strengthened requirements for financial assurances, periodic reporting and the validation of compliance by regulatory authorities. Within this context, digitalization, framed under the principles of Mining 5.0, is increasingly recognized as a key enabler for aligning mine closure practices with the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) promoted by the International Council on Mining and Metals (ICMM). This paper adopts a qualitative case study approach, drawing on publicly disclosed Peruvian mining operations reporting progress toward GISTM conformance, complemented by peer-reviewed conference contributions on digitally supported mine closure decision-making. The analysis focuses on digital monitoring systems, centralized data governance, traceability of technical evidence and the use of verifiable indicators (KPIs) to support closure planning, post-closure monitoring, and regulatory assurance; dimensions that are explicitly identified as critical challenges in the Peruvian closure landscape.

The results show that digitalization does not substitute engineering design or regulatory obligations, but strengthens their execution by improving data continuity, risk visibility and institutional accountability throughout closure and post-closure stages. Digital tools contribute to more robust closure cost estimation, long-term water and tailings facility monitoring and clearer alignment between national mine closure regulations and international standards. The paper concludes that Mining 5.0, when understood as a governance and assurance-oriented digital transformation, rather than a purely technological paradigm; provides a practical and credible framework for enhancing the effectiveness and legitimacy of mine closure processes in Peru.

Keywords

Mine Closure; Mining 5.0; Digitalization; GISTM; ICMM; Peru; Tailings Management

Introducción

La adopción del Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) establece un marco de 6 tópicos, 15 principios y 77 requisitos auditables para instalaciones de relaves (TSF), cubriendo explícitamente cierre y postcierre, incluyendo monitoreo, gobernanza y divulgación pública (Global Tailings Review, 2020). En paralelo, la International Council on Mining and Metal (ICMM) promueve el cierre integrado como proceso dinámico e iterativo a lo largo del ciclo de vida del activo, con énfasis en gestión basada en riesgos y oportunidades (Integrated Mine Closure, 2025).

Para el contexto peruano, el reto técnico no es sólo ‘cumplir’, sino demostrar cumplimiento mediante evidencia verificable: datos instrumentales, criterios de estabilidad, revisiones independientes, control documental y KPIs de postcierre. A partir de este enfoque, la incorporación de la Minería 5.0 (Chen et. al, 2023; Carrasco, 2025) se interpreta como el resultado de una transformación digital con orientación a la gobernanza y al cumplimiento (trazabilidad, continuidad de datos y rendición de cuentas).

Finalmente, este paper tiene tres objetivos: (i) describir, sobre casos peruanos divulgados públicamente, cómo se evidencian elementos de alineamiento con ICMM/GISTM; (ii) diferenciar explícitamente qué exigencias provienen del estándar (qué) y qué corresponde a decisiones de implementación de la compañía (cómo); y (iii) presentar un marco de gobernanza de cierre y postcierre entendible para una audiencia técnica (roles, assurance, evidencias y KPIs).

Metodología

Se utiliza un enfoque cualitativo de estudio de casos basado en evidencia pública, como resultado de reportes recopilados por GISTM y/o ICMM. En este sentido, cobra relevancia el análisis de las divulgaciones GISTM a las siguientes instalaciones peruanas de relaves: Mina Justa (Marcobre, 2025), Cortadera TSF–Quellaveco (Anglo American, 2025) y Quebrada Honda TSF–Toquepala/Cuajone (Grupo México/Southern Copper Corporation, 2025). Además, se incorpora una contribución revisada por pares sobre toma de decisiones de cierre apoyada por herramientas analíticas y modelos de calidad de agua en un caso peruano (Sanders & Fitzpatrick, 2022).

El análisis se organiza en cuatro ejes: (i) exigencias del estándar (principios, evidencia, niveles de revisión y divulgación); (ii) decisiones corporativas de implementación (arquitectura digital, instrumentación, QA/QC, analítica, workflows); (iii) evidencia técnica reportada (diseño, monitoreo, estabilidad, planes de cierre, conformance); y (iv) gobernanza de cierre/postcierre (roles, assurance, KPIs y continuidad).

Estudio de Casos

Mina Justa (Marcobre/Minsur): El reporte describe un TSF ubicado aproximadamente 1 km al sureste de la planta, a una elevación promedio de 760 msnm, en un ambiente árido con alta evaporación. La estructura principal reportada es una presa de enrocado compactado de 23 m; el embalse cubre 263 ha y la capacidad de almacenamiento es 42.3 millones de toneladas secas (Marcobre, 2025).

La gobernanza del sistema TMS incorpora niveles y roles: Responsible Tailings Facility Engineer (RTFE), Engineer of Record (EoR) (Knight Piésold), un Independent Geotechnical and Tailings Review Board (IGTRB) y un Surveillance Committee. En gestión del riesgo, se emplea FMEA; se reporta ausencia de modos creíbles y 18 modos no creíbles/remotos (2023–2025). En assurance y desempeño, se reportan inspecciones semanales, un Annual Performance Report (2024) por el EoR, revisión IGTRB (abril 2025) y programación de un Dam Safety Review (2026). En emergencias, se actualiza el EPRP (junio 2024). En cierre/finanzas, se indica la aprobación del plan de cierre actualizado por MINEM (noviembre 2024) incluyendo garantías.

Cortadera TSF (Quellaveco, Anglo American): La divulgación reporta una instalación active, downstream-raised, con arenas cicloneadas compactadas, altura actual 180 m y altura final 315 m (Quellaveco, 2025).

El plan de cierre aprobado incluye reshaping, cobertura resistente a erosión y manejo de aguas superficiales para asegurar una condición free-draining. El reporte describe validación por terceros bajo protocolos ICMM mediante muestreo representativo (~50/77 requisitos) cubriendo los 6 tópicos y 15 principios, además de prácticas de emergencia basadas en dam breach analysis y ejercicios reportados para 2025.

Quebrada Honda TSF (Toquepala–Cuajone, Southern Peru Copper): Se describe una instalación activa con presa principal downstream (143 m) y presa lateral centerline (63 m). La estabilidad se apoya en monitoreo con topografía, piezómetros e inclinómetros, reportando factores de seguridad (FoS) superiores a mínimos aceptables para condiciones normal, PMF y MCE (incluido post-sismo) (Southern, 2025).

Se reporta operación desde 1996, tratamiento y almacenamiento asociado a 210,000 dtpd, y un método constructivo con hidrociclones, compactación por capas y pendientes 4H:1V (downstream) y 3H:1V (upstream). El plan de cierre aprobado unifica presas a 1246.5 msnm con cobertura resistente a erosión y manejo de aguas superficiales para asegurar free-draining; se reporta conformance (Meets/Meets with a plan/N/A) y ejercicios de emergencia (octubre 2025).

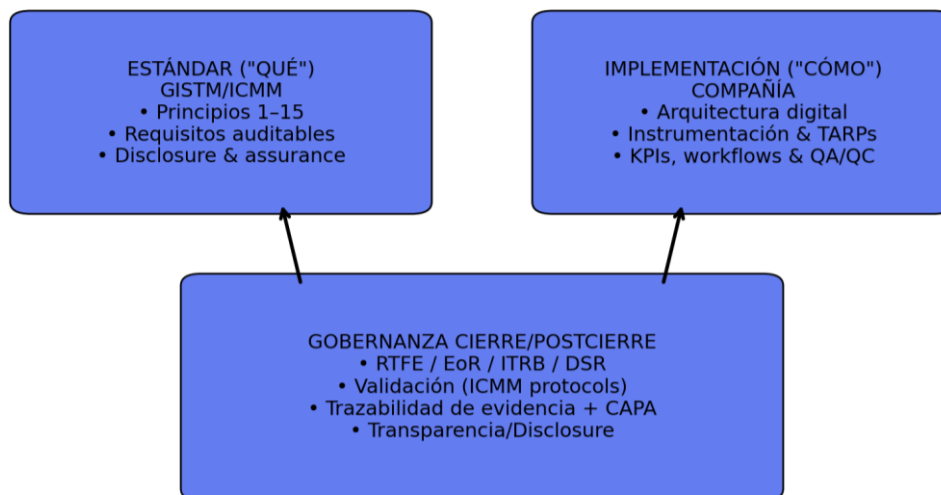
Resultados

El presente estudio ha identificado una base de conocimiento según las normativas y los distintos criterios técnicos la *Tabla 1*, presenta por un lado las exigencias de los estándares antes citados y por otro, las decisiones de implementación; que finalmente se consolidaron.

Elemento Técnico	Exigencia del Estándar (Qué)	Decisión de la Compañía (Cómo)
Monitoreo y TARPs	Principio 7: diseñar/operar sistemas de monitoreo para gestionar riesgo en todo el ciclo, incluyendo cierre.	Instrumentación (IoT/SCADA), telemetría, QA/QC, analítica, alarmas, TARPs y tableros de condición.
Gobernanza y Accountability	Principio 8: políticas, sistemas y responsabilidades para la integridad y seguridad.	Comités, RACI, GRC, repositorios de evidencia, control de cambios y auditoría interna.
Engineer of Record	Principio 9: nombrar y empoderar un EoR.	Criterios de independencia, alcance de revisión, workflow de recomendaciones y cierres.
Niveles de Revisión	Principio 10: implementar niveles de revisión (p. ej., ITRB/DSR) en todo el ciclo.	Calendario de revisiones, CAPA, gestión de hallazgos, seguimiento y evidencia verificable.
Divulgación Pública	Principio 15: disclosure y acceso a información para accountability.	Portal, data room, automatización de reporting y trazabilidad por requisito.

(Tabla 1): Clasificación de Exigencias y Decisiones TSF. Fuente: Elaboración Propia.

En cuento un Modelo de Gobernanza y como resultado de alinear las exigencias con las decisiones, la *Figura 1*, revela el cómo el estándar y la implementación pueden conformar este a partir de determinados elementos.



(Figura 1): Gobernanza para alinear estándar e implementación. Fuente: Elaboración Propia.

Conclusiones

Los casos peruanos revisados muestran que el alineamiento con ICMM/GISTM se operacionaliza mediante gobernanza (roles RTFE/EoR/boards y niveles de revisión), monitoreo e instrumentación con verificación de estabilidad por escenarios, planes de cierre orientados a control de erosión y manejo de agua, y divulgación con evidencia trazable. En este sentido, el aporte de Minería 5.0, respecto a la digitalización, no sustituye diseño de ingeniería ni obligaciones regulatorias, sino que fortalece su ejecución al mejorar continuidad de datos, visibilidad de riesgo y rendición de cuentas institucional en cierre y postcierre; en un modelo de gobernanza y cumplimiento. Todo ello, a través de un marco práctico para incrementar efectividad y legitimidad del cierre en el Perú.

Bibliografías

Quellaveco (2025). *GISTM Disclosure Report: Copper Peru (Cortadera TSF)*. Anglo American. <https://www.angloamerican.com/~/-/media/Files/A/Anglo-American-Group-v9/PLC/tailings-database-items/gistm/2025-gistm-disclosure-peru-stage-5-vf.pdf>

Carrasco, Y. (2025). *Minería 5.0: Un Enfoque de Innovación Verde para el Sector Minero. Estudio de Casos*. Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28459.76320>

Global Tailings Review. (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*. GISTM. <https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard-on-tailings-management.pdf>

Southern (2025). *GISTM Disclosure Report: Toquepala–Cuajone (Quebrada Honda TSF)*. Grupo México. <https://desarrollosustentable.gmexico.com/wp-content/uploads/2025/12/GISTM-disclosure-Toquepala-Cuajone.pdf>

Integrated Mine Closure. (2025). *Integrated mine closure: Good practice guide*. ICMM. <https://www.icmm.com/integrated-mine-closure>

L. Chen, J. Xie, X. Zhang, J. Deng, S. Ge and F. -Y. Wang, (2023). *Mining 5.0: Concept and Framework for Intelligent Mining Systems in CPSS* IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. <https://10.1109/TIV.2023.3285417>

Marcobre. (2025). *Responsible tailings management: Mina Justa tailings storage facility*. GISTM disclosure. https://stportalwebminsurprd.blob.core.windows.net/documentos/File_48e26e0f-8db0-4b10-b421-c1a7ebda3c03

Sanders, J., & Fitzpatrick, A. (2022). *A Peruvian case study: optimising mine planning through mine closure decision assessment*. Mine Closure 2022: Proceedings of the 15th International Conference on Mine Closure. Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2215_51