Marco de Diseño de Gemelos Digitales para el Control Avanzado de Relaves Mineros

Yannick Patrick Carrasco Merma, Pontificia Universidad Católica del Perú

Resumen

Un gemelo digital es una réplica virtual de un sistema físico que integra datos en tiempo real obtenidos mediante sensores y tecnologías de análisis, permitiendo la simulación, monitoreo y optimización de su comportamiento. La implementación de esta tecnología permite la integración de activos de fabricación e instrumentación, mejorar el mantenimiento preventivo, la detección de anomalías en sistemas ciberfísicos y tomar decisiones más informadas y eficientes según su campo de aplicación. Este trabajo aborda la introducción del concepto de Gemelo Digital en la implementación de soluciones de control avanzado de relaves mineros para una gestión eficiente y segura de los desechos. Como antecedentes, la implementación de gemelos digitales ha sido probada en operaciones como Anglo American (Perú), aplicado a la optimización de recursos y en BHP (Australia y Chile); para el incremento de la vida útil de depósitos de relaves y mejora de la reutilización del agua. La base teórica de aplicación de los gemelos digitales en minería se fundamenta en varias disciplinas tecnológicas y científicas que permiten la integración de modelos virtuales con procesos físicos; tales como: Sistemas Ciberfísicos, Modelado y Simulación Computacional, Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático, Internet de las Cosas y Optimización de Procesos Mineros. La metodología empleada corresponde a un enfoque de investigación descriptivo cualitativo, donde se examina el diseño y aplicación del gemelo digital en el sector de estudio. En el contexto de los Relaves Mineros, el gemelo digital aplicado como control avanzado permite mejorar la seguridad, eficiencia y sostenibilidad de la gestión de residuos. Entre las aplicaciones clave del gemelo digital asociado al control avanzado de relaves mineros tenemos: Simulación y Predicción de Comportamiento, Optimización del Uso de Recursos, Monitoreo en Tiempo Real, Evaluación Geotécnica y Reducción de Costos y Tiempos de Inactividad. Respecto al marco de diseño del gemelo digital a describir, integra varias capas tecnológicas que permiten la integración de datos, simulaciones y optimización de procesos. Entre los componentes que conforman la arquitectura de solución de los gemelos digitales, se tienen los siguientes: Sensores y Adquisición de Datos, Plataforma de Integración y Procesamiento, Motor de Simulación y Modelado, Inteligencia Artificial y Optimización e Interfaz de Visualización y Control.

Palabras Clave

Gemelo Digital; Depósito Relaves; Gestión Riesgo Geotécnico; Minería 4.0; Gestión Sostenible Relaves

Introducción

Gestión de Relaves y Gobernanza del Registro

Los depósitos de relaves son estructuras de tierra extensas y evolutivas diseñadas para almacenar subproductos y agua de proceso a largo plazo. Su comportamiento está condicionado por la compleja interacción entre la presión de poros, filtración, consolidación, deformaciones, la secuencia de deposición, la geometría de la playa, el balance hídrico, la solicitación sísmica y la variabilidad climática. Por ello, su gestión eficaz exige una conciencia situacional continua, una interpretación interdisciplinaria y la capacidad de actuar ante señales débiles antes de que deriven en una condición crítica.

Sin embargo, en muchas operaciones, la instrumentación, las inspecciones, los balances hídricos, los modelos numéricos y los controles operacionales coexisten en repositorios aislados. Esta fragmentación dificulta reconstruir la trazabilidad de las decisiones: qué se sabía, bajo qué supuestos se actuó y qué evidencia respaldó cada acción. Esta brecha no es solo tecnológica, sino también de gobernanza de datos, aseguramiento y rendición de cuentas.

Gestión de Relaves y Gobernanza del Registro Minería 4.0

La Minería 4.0 integra IoT industrial, conectividad, Big Data, Computación en la Nube y en el Borde, sistemas ciberfísicos, automatización e inteligencia artificial. Un Gemelo Digital (DT) es una representación virtual dinámica vinculada con un activo, proceso o cadena de valor mediante datos y modelos predictivos (ML), con capacidad para monitorear, simular y apoyar decisiones (Zhang & Gao, 2022; Carrasco, 2023).

En ingeniería geotécnica, la adopción continúa en una fase temprana por la complejidad del modelado, la demanda computacional, la heterogeneidad de datos y las barreras de interoperabilidad (Tan et al., 2025). Los marcos DT+ML para presas de relaves articulan datos en tiempo real, simulación, detección y predicción, pero requieren validación, calibración, control de falsas alarmas y documentación de incertidumbre (Mwanza et al., 2024).

Metodología

La investigación adopta un enfoque cualitativo descriptivo y de diseño conceptual. No busca atribuir causalidad ni reportar mejoras geotécnicas verificadas en un Depósito de Relaves en producción. Su propósito es transformar conocimiento científico y evidencia pública de aplicaciones industriales en una arquitectura implementable y sujeta a validación; en ese sentido la secuencia a seguir para el diseño del Gemelo Digital es como sigue:

- Revisión de literatura sobre GISTM, Gemelos Digitales geotécnicos, monitoreo de relaves, inteligencia artificial y Minería 4.0.
- Codificación temática de capacidades para el Gemelo Digital: Capturar, integrar, modelar, detectar, decidir y auditar.

- Estudio de Casos a través de análisis documental comparativo de Anglo American y BHP, considerando propósito, datos, simulación y conexión con decisiones.

Las fuentes corporativas se utilizaron como evidencia de aplicaciones y resultados comunicados por las propias compañías. Por otro lado, el Journal *Mining Technology* se empleó como fuente secundaria especializada. Estas fuentes no sustituyen una evaluación independiente ni permiten extrapolar resultados de producción a la estabilidad geotécnica de un Depósito de Relaves.

Estudio de Casos

Anglo American: Quellaveco

Anglo American informa que Quellaveco utiliza Gemelos Digitales en la planta de procesos y menciona aplicaciones en molienda, flotación, manejo de relaves, control de agua y sistema eléctrico. Las réplicas virtuales reciben información de sensores, permiten ensayos predictivos y son gestionadas desde el Centro Integrado de Operaciones (Anglo American, 2025)

Un caso publicado por *Revista Minería* describe un Gemelo Digital aplicado a la operación autónoma para gestionar la calidad del mineral alimentado a planta. La solución integró datos de diversos sistemas, simuló el avance horario y comparó escenarios. El escenario optimizado redujo la variabilidad de recuperación documentada frente al escenario tradicional; este resultado demuestra integración de datos, simulación y decisión, pero no constituye validación geotécnica de un Depósito de Relaves (Carrillo & Mansilla, 2025).

Quellaveco aporta tres principios transferibles: Integración de fuentes heterogéneas, simulación previa a la intervención física y conexión con un centro operacional. Cabe indicar que la información pública revisada no especifica métricas de precisión geotécnica, anticipación de alertas o reducción del riesgo en un Depósito de Relaves.

BHP: BMA, Copper South Australia y Escondida

BHP documenta aplicaciones en BMA, Copper South Australia y Escondida para predecir resultados e identificar impulsores, riesgos y oportunidades. En una operación autónoma de BMA, la compañía reporta que una aplicación reciente facilitó un incremento anual de 10% en movimiento productivo (BHP, 2025).

En Escondida, BHP utiliza analítica avanzada, un Gemelo Digital de cadena de valor y modelos de IA para informar tronadura y mezclado, identificar zonas con características mineralógicas desafiantes y apoyar el control predictivo del molino SAG. Un aspecto relevante, es que BHP reportó una reducción promedio de 70% en pérdidas mensuales de producción asociadas a la granulometría. Se trata de un resultado de procesamiento, no de desempeño geotécnico de relaves (BHP, 2025).

La integración con IA generativa permite explorar escenarios en lenguaje natural. BHP subraya que el valor requiere datos de calidad, participación operacional, casos de uso claros e integración con rutinas de planificación y gobernanza. La adopción debe ajustarse a la madurez, complejidad, preparación de datos y perfil de riesgo de cada activo (BHP, 2025; Vella, 2026).

Síntesis Comparativa de Casos de Estudio y Directrices de Diseño

El análisis cruzado de las implementaciones desarrolladas por Anglo American (Quellaveco) y BHP (BMA, Copper South Australia y Escondida) revela una convergencia en la madurez tecnológica hacia la analítica avanzada, pero también expone una brecha crítica en su aplicación a infraestructuras de relaves.

El modelo de Quellaveco (Anglo American, 2025; Carrillo & Mansilla, 2025) demuestra la viabilidad de acoplar la simulación predictiva con la toma de decisiones en tiempo real mediante Centros Integrados de Operaciones. Sin embargo, su enfoque principal se mantiene circunscrito a la optimización metalúrgica y al control de variabilidad en planta. Por otro lado, la aproximación de BHP (BHP, 2025; Vella, 2026) destaca por su visión macroscópica de la cadena de valor end-to-end y la incorporación de Inteligencia Artificial generativa para la exploración de escenarios.

Esta asimetría sectorial evidencia que, si bien la gran minería posee las capacidades arquitectónicas para integrar datos heterogéneos y romper silos operacionales, el verdadero desafío radica en transferir estos principios de la cadena de producción hacia la gobernanza del riesgo catastrófico. La **Tabla 1** sistematiza este contraste analítico, traduciendo los éxitos operativos de ambos referentes en implicaciones directas, brechas de evidencia y requerimientos funcionales para el diseño de un Gemelo Digital especializado en la estabilidad y sustentabilidad a largo plazo de los TSF.

Dimensión	Anglo American	BHP	Implicación TSF
Escala	Planta y sistemas de proceso, incluidos relaves y agua.	Cadena de valor desde mina hasta puerto.	Integrar el subsistema geotécnico con variables de la cadena.
Decisión	Ensayos predictivos y Centro Integrado de Operaciones.	Escenarios end-to-end, planificación e IA generativa.	Conectar señales con escenarios, responsables y acciones.
Seguridad	Prueba virtual antes del cambio físico.	Evaluación de interacciones y condiciones operativas.	Evaluar límites y efectos cruzados.
Evidencia	Sin métricas públicas específicas de TSF en la fuente revisada.	Resultados productivos, no validación geotécnica TSF.	Validar con piloto y métricas específicas.

Tabla 1. Síntesis Comparativa Anglo American y BHP. Elaboración Propia.

Resultados

Los resultados de esta investigación demuestran que el valor estratégico de un Gemelo Digital aplicado a Depósitos de Relaves (**Tailings Storage Facilities, TSF**) trasciende la mera representación virtual. Su verdadero potencial radica en consolidarse como una infraestructura integrada para la gobernanza del riesgo, capaz de articular el monitoreo,

el modelado, el análisis predictivo y la toma de decisiones a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación. Esta visión, sintetizada en la **Figura 1**, converge con los principios del **GISTM** y refleja la evolución de los gemelos digitales: de herramientas de visualización estática a plataformas de inteligencia operacional para sistemas mineros complejos.

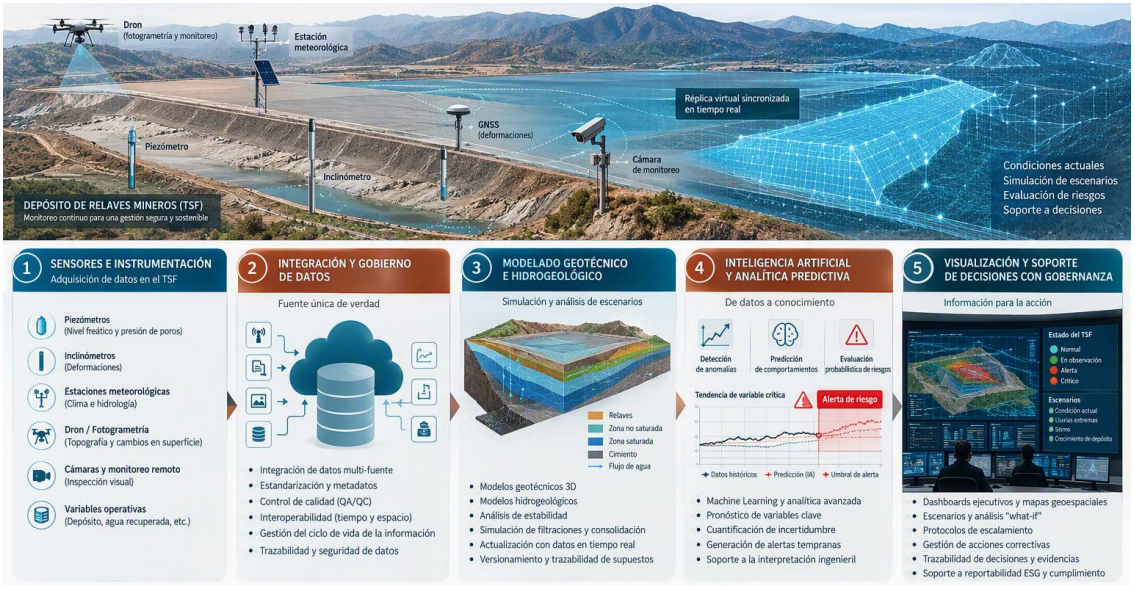

Figura 1. Gemelo Digital TSF. Elaboración propia mediante *Microsoft Copilot*.

Respecto al diseño de la arquitectura conceptual del Gemelo Digital, esta se estructura en cinco capas fundamentales: (1) Sensado y Adquisición; (2) Integración y Gobierno de Datos; (3) Modelado y Simulación; (4) Inteligencia y Analítica; y (5) Visualización y Soporte a la Decisión. Los componentes, funciones y la interrelación de estos niveles se sintetizan a continuación en la **Tabla 2**:

Capa	Función	Salida
Sensado	Piezometría, deformación, clima, agua, inspecciones y operación.	Datos con tiempo, ubicación, calibración y calidad.
Datos	Normalización, QA/QC, metadatos, seguridad y linaje.	Repositorio interoperable y auditable.
Modelado	Filtración, consolidación, estabilidad, deformación y escenarios.	Versiones, supuestos e incertidumbre.
Analítica	Anomalías, pronóstico e inferencia probabilística.	Señales explicables y límites de confianza.
Decisión	Visualización, escalamiento, asignación y cierre.	Registro de decisiones, responsables y evidencias.

Tabla 2. Arquitectura Conceptual de Gemelo Digital TSF. Elaboración Propia.

Conclusiones

El marco de diseño propuesto amplía el concepto tradicional de Gemelo Digital geotécnico al incorporar cinco capas funcionales interdependientes: Sensado, gobierno de datos, modelado geotécnico-hidrogeológico, inteligencia analítica y soporte a decisiones. La integración de estas capacidades permite transformar grandes volúmenes de datos heterogéneos en conocimiento accionable, garantizando trazabilidad,

auditabilidad y coherencia entre la evidencia técnica y las decisiones operacionales. Esta arquitectura proporciona una base conceptual para la evolución de los TSF hacia sistemas ciberfísicos inteligentes alineados con los principios de la Minería 4.0.

Los casos de referencia analizados evidencian dos enfoques complementarios de madurez digital aplicables a la gestión de relaves. Anglo American demuestra la viabilidad de integrar gemelos digitales con procesos mineros, manejo de agua, gestión de relaves y Centros Integrados de Operaciones, mientras que BHP evidencia el potencial de los Gemelos Digitales de cadena de valor para simular escenarios complejos, gestionar interdependencias operacionales e incorporar inteligencia artificial generativa como mecanismo de democratización del conocimiento y soporte avanzado a decisiones.

Bibliografías

Anglo American Perú. (2025). *Gemelos digitales: tecnología para la seguridad y productividad*. Anglo American Perú. Disponible en: https://peru.angloamerican.com/innovacion/future-smart-mining/gemelos-digitales-tecnologia-para-la-seguridad-y-productividad.aspx

BHP. (2025). *The role of digital twins and AI in enhancing decision-making in the mining industry*. BHP Insights. Disponible en: https://www.bhp.com/news/bhp-insights/2025/02/the-role-of-digital-twins-and-ai-in-enhancing-decision-making-in-the-mining-industry

Carrasco Merma, Y. P. (2023). *Mining 4.0: A digital transformation approach to the mining sector: A Peruvian case study*. En Proceedings of PICMET 2023.

Carrillo, F., & Mansilla, J. (2025). *Impact of digital twins on the efficiency and productivity of autonomous mines: The Quellaveco Mine case study*. Revista Minería. Disponible en: https://revistamineria.com.pe/english/impact-of-digital-twins-on-the-efficiency-and-productivity-of-autonomous-mines:-the-quellaveco-mine-case-study

Global Tailings Review. (2020). *Estándar global de gestión de relaves para la industria minera*. Disponible en: https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-industry-standard_ES.pdf

International Council on Mining and Metals. (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*. Disponible en: https://www.icmm.com/our-principles/gistm

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

Tan, W., Wu, S., Li, Y., & Guo, Q. (2025). *Digital twins' application for geotechnical engineering: A review of status and future directions in China*. Applied Sciences, 15(15), 8229. https://doi.org/10.3390/app15158229

Vella, H. (2026). *The optimization of digital twins for mine safety*. Mining Technology. Disponible en: https://www.mining-technology.com/features/the-optimisation-of-digital-twins-for-mine-safety/

Zhang, D., & Gao, X. (2022). *A digital twin dosing system for iron reverse flotation*. Journal of Manufacturing Systems, 63, 238-249.