

El DAR como pilar de la gobernanza GISTM: evaluación del impacto acumulativo de desviaciones en la gestión proactiva de riesgos de depósitos de jales. Estudio de Caso

DAR as a pillar of GISTM governance: evaluation of the cumulative impact of deviations in proactive tailings risk management. Case study

Adolfo LÓPEZ¹, Carlos FAUNDES¹, Thiare MAGALLANES¹ y Juan Carlos PAREDES¹

¹ Knight Piésold S.A. Santiago, Chile

INFORMACIÓN

Palabras clave:

- DAR
- GISTM
- Gestión de Riesgo
- Gestión de Cambios
- Gobernanza

RESUMEN

El Estándar Global de Gestión de Relaves (GISTM) exige un sistema formal de gestión de cambios, incluyendo el Reporte de Responsabilidad ante Desviaciones (DAR) (Requisito 6.5). Este documento presenta un enfoque para desarrollar un DAR basado en dos depósitos de jales de un mismo grupo minero, con contextos diversos que afectan su perfil de riesgo. El DAR consolida y evalúa el impacto acumulativo de desviaciones de diseño y operación sobre el nivel de riesgo del depósito. Se analizan desviaciones desde construcción y operación, como recrecimientos del bordo, roturas de geomembrana y reducciones temporales del bordo libre. Estas desviaciones se vinculan con Modos Potenciales de Falla (PFMs) y su impacto acumulativo sobre la probabilidad y consecuencias de fallas, reflejado en la matriz y perfil de riesgo del proyecto. La principal utilidad del DAR es fortalecer la gobernanza, al requerir evaluación técnica y aprobación jerárquica de las desviaciones, facilitando la actualización de documentos críticos como el Informe de Bases de Diseño y el Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia. La formalización del proceso mediante fichas DAR y una bitácora de cambios asegura un seguimiento proactivo y coherente con las condiciones reales del depósito. Los casos de estudio demuestran que, más allá de su cumplimiento normativo, el DAR es una herramienta clave para la gestión adaptativa del riesgo y la rendición de cuentas en depósitos de jales.

ABSTRACT

The Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM) requires a formal Management of Change system by incorporating the Deviation Accountability Report (DAR) (Requirement 6.5). This paper presents an approach for developing a DAR based on two tailings storage facilities within the same mining group, operating under differing contexts that influence their respective risk profiles. The DAR consolidates and evaluates the cumulative impact of design and operational deviations on the facility risk level. Deviations arising during construction and operation—such as embankment raises, geomembrane damage, and temporary reductions in freeboard—are analyzed. These deviations are linked to Potential Failure Modes (PFMs) and their cumulative effect on both the probability and consequences of failure, as reflected in the project risk matrix and risk profile. The primary value of the DAR lies in strengthening governance, by requiring technical evaluation and hierarchical approval of deviations, and by facilitating updates to critical documents such as the Design Basis Report and the Operation, Maintenance, and Surveillance Manual. Formalizing the process through DAR records and a change log ensures proactive tracking aligned with actual facility conditions. The case studies demonstrate that, beyond regulatory compliance, the DAR is a key tool for adaptive risk management and accountability in tailings storage facilities.

1 INTRODUCCIÓN

La Gestión de Cambios (GdC o MoC por su sigla en inglés) es un elemento crucial de la seguridad de procesos, fundamental para alcanzar el objetivo aspiracional de cero daños y cero tolerancia a fatalidades en instalaciones críticas como los depósitos de relaves. Su implementación es esencial para evitar la introducción inadvertida de nuevos peligros o el aumento no intencionado de riesgos existentes. A diferencia de la percepción común, la GdC no se limita a grandes modificaciones de capital; su alcance incluye cualquier cambio, ya sea en el equipo físico, la estructura organizacional, los procedimientos, o si son permanentes o temporales. Este proceso debe aplicarse de forma rigurosa a lo largo de todo el ciclo de vida de la instalación, abarcando desde la planificación conceptual y el diseño, hasta la construcción, la operación, el cierre y el post-cierre.

La relevancia de la GdC para la gobernanza es incuestionable, actuando como un pilar fundamental en marcos regulatorios avanzados como el Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (GISTM). Un sistema de gestión de cambios robusto disciplina y coordina el proceso de revisión, asegurando la continuidad de la operación segura y confiable del depósito. La implementación efectiva de la GdC exige una evaluación técnica y la aprobación jerárquica de todas las desviaciones y modificaciones.

La GdC, documentada por herramientas como el Reporte de Responsabilidad ante Desviaciones (DAR, por su sigla en inglés) - que consolida el impacto acumulativo de los cambios - permite una gestión adaptativa y proactiva del riesgo. Esta formalización asegura que la intención o concepto de diseño original se mantenga a pesar de la dinámica operacional y constructiva. Al forzar la actualización de documentos críticos como el Informe de Bases de Diseño (IBD o DBR por su sigla en inglés) y el Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia (OMS por su sigla en inglés), la GdC fortalece la rendición de cuentas (*accountability*) y la integridad a largo plazo de la instalación, mitigando activamente los riesgos que podrían evolucionar hacia fallas catastróficas. Por lo tanto, la GdC es más que un simple requisito; es el mecanismo de vigilancia dinámica que asegura la seguridad del depósito de relaves.

Este artículo tiene como propósito principal proponer, basado en casos reales de depósitos de jales en México, una metodología para la implementación del Reporte de Responsabilidad ante Desviaciones (DAR), en cumplimiento del requerimiento 6.5 del GISTM. El enfoque se centra en la formalización del proceso de Gestión de Cambios mediante el desarrollo de fichas DAR y una bitácora de cambios, herramientas esenciales que permiten al Ingeniero de Registro (EOR) consolidar y evaluar de

manera sistemática el impacto acumulativo de las desviaciones de diseño, constructivas y operacionales sobre el perfil de riesgo del depósito. El beneficio fundamental que se deriva de este proceso es el fortalecimiento de la gobernanza y la rendición de cuentas, ya que el DAR exige una evaluación técnica y aprobación jerárquica de las desviaciones, utilizando el perfil de riesgo del proyecto, y facilita la actualización continua de documentos críticos como el Informe de Bases de Diseño (DBR) y el Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia (OMS). En cuanto a las proyecciones futuras, el DAR proporciona una base para la gestión estratégica, incluyendo la implementación de medidas de mitigación para minimizar la influencia de las desviaciones en el perfil de riesgo y asegurar que los controles críticos y los programas de monitoreo se mantengan actualizados y efectivos.

2 HISTORIA Y EVOLUCIÓN DE LA GESTIÓN DE CAMBIOS, APLICADO A GESTIÓN DE JALES

2.1 Evolución desde la seguridad de procesos

La evolución de la gestión de cambios (GdC) es fundamental para la seguridad de procesos y refleja una respuesta histórica y disciplinada ante fallas catastróficas inducidas por modificaciones no controladas. Su importancia fue identificada de manera crucial en la industria de procesos químicos, donde los cambios no controlados contribuyeron a numerosos accidentes mayores (CCPS, 2008). Un evento clave que resaltó la urgencia de formalizar la GdC fue el accidente de la planta de Nypro en Flixborough en 1974, donde se producían precursores químicos, en el cual la falla de una modificación temporal en una tubería provocó una explosión que causó la muerte de 28 personas, evidenciando la necesidad de un sistema que hubiera identificado la secuencia de cambios que llevaron a la falla catastrófica (Kletz, 2009).

Según indica la guía de gestión de cambios para la seguridad de procesos (CCPS 2008), como respuesta ante tragedias químicas en México y Bhopal en 1985, se estableció el Center for Chemical Process Safety (CCPS). En 1989, el CCPS publicó sus guías pioneras, incluyendo la GdC como un elemento esencial de la gestión de la seguridad de procesos. La adopción de métodos y procesos fue impulsada por la regulación, notablemente la norma de Gestión de Seguridad de Procesos (PSM) de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) de EE. UU., promulgada en 1992. La PSM exigía procedimientos escritos de GdC que abordaran la base técnica, el impacto en la seguridad y salud, la autorización y la capacitación. Posteriormente, la norma de 1996 de la

EPA para la gestión de riesgos (RMP) incorporó requisitos de GdC, expandiendo la evaluación para incluir los potenciales impactos fuera del sitio.

La GdC se consolidó como el "sistema de control de evaluación de riesgos minuto a minuto" (Kletz, 2009). Su alcance se amplió para incluir no solo modificaciones físicas o procedimentales, sino también cambios organizacionales y fuentes sutiles de alteración. Las directrices de CCPS de 2008 promovieron un enfoque de Seguridad de Procesos Basada en Riesgos (RBPS), permitiendo que la rigurosidad del sistema se ajustara al nivel de riesgo, la demanda de recursos y la cultura de seguridad de la instalación.

La metodología robusta de GdC fue transferida e integrada en el sector minero, culminando en su incorporación como un requisito formal (Requisito 6.5) en el Estándar Global de Gestión de Relaves (GISTM) de 2020 (GTR, 2020). La GdC es vista como un principio fundamental para el marco de gobernanza de jales, esencial para evitar comprometer inadvertidamente la integridad de los depósitos de almacenamiento de jales (ICMM 2025). El GISTM exige que el sistema de gestión de cambios incluya la identificación, revisión, aprobación y documentación de cambios en el diseño, construcción, operación o monitoreo (GTR, 2020).

La evolución de la GdC en la minería introdujo un mecanismo especializado para la gestión de riesgos en estructuras de ciclo de vida prolongado: el Reporte de Responsabilidad ante Desviaciones (DAR). Este reporte, elaborado periódicamente por el Ingeniero de Registro (EOR), evalúa el impacto acumulativo de las desviaciones en el nivel de riesgo del depósito. El proceso consolida la rendición de cuentas (*accountability*) y la formalización de los procesos de revisión técnica y aprobación jerárquica por parte del Ejecutivo Responsable (Informe de Responsabilidad ante Desviaciones (DAR)). Finalmente, estándares como el protocolo Hacia una Minería Sostenible (TSM) de la Asociación Minera de Canadá (MAC) también exigen la gestión de cambios y sirven como base de mejores prácticas que se alinean con el GISTM (MAC, 2022).

2.2 GISTM: Gestión de cambios

La creación del Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (GISTM) en agosto de 2020 fue una respuesta necesaria para elevar los niveles de seguridad en la industria minera tras los colapsos catastróficos en Brasil (Fundão 2015 y Brumadinho 2019). Este estándar establece un compromiso con el objetivo de *cero daño* a las personas y al medio ambiente, junto con una tolerancia cero ante fatalidades humanas. Las investigaciones forenses de las fallas de Fundão y Brumadinho, ocurridas principalmente en depósitos contruidos mediante el método de aguas arriba,

revelaron que los desastres no suelen ser el resultado de un único error, sino de una acumulación progresiva de debilidades y desviaciones en el diseño y la operación. Para evitar el "creep" del riesgo que genera la suma de desviaciones, el GISTM exige la implementación del Requisito 6.5, que obliga a establecer un sistema formal de gestión de cambios. Este sistema tiene la tarea de evaluar, revisar, aprobar y documentar cualquier modificación propuesta en el diseño, construcción, operación o monitoreo de la instalación.

El mecanismo específico que introduce el estándar para gestionar estas deficiencias es el Reporte de Responsabilidad ante Desviaciones (DAR). Este documento, que debe ser elaborado de forma periódica por el Ingeniero de Registro (EOR), tiene como fin evaluar el impacto acumulativo de los cambios sobre el nivel de riesgo de la instalación construida. El DAR fortalece la rendición de cuentas (*accountability*) al consolidar las desviaciones y vincularlas con los Modos Potenciales de Falla (PFMs) para determinar su impacto en la probabilidad y consecuencias de un siniestro. Finalmente, el reporte debe contar con la aprobación del Ejecutivo Responsable, lo que garantiza que la alta dirección tenga visibilidad sobre las alteraciones en el perfil de riesgo y se asegure la actualización de la documentación crítica de diseño y operación.

2.3 Gestión de cambios más allá del GISTM

La necesidad de implementar la Gestión de Cambios (GdC) es un requisito fundamental que se encuentra articulado en varios estándares, guías de buenas prácticas y sistemas de seguridad de procesos relevantes para la industria minera y de manejo de relaves. A continuación, se listan los documentos clave y su relación con la implementación de la GdC para depósitos de jales:

Protocolos de Relaves

- Protocolos de Conformidad del GISTM (ICMM 2022). Este documento fue desarrollado para ayudar a los operadores y auditores a evaluar la conformidad con los 77 Requisitos del GISTM. El Protocolo de Conformidad asociado al Requisito 6.5 detalla los criterios para demostrar que un Sistema de Gestión de Cambios se ha establecido e implementado, incluyendo los procesos de identificación, evaluación, revisión, aprobación y documentación de los cambios a lo largo del ciclo de vida de la instalación.

Guías de Buenas Prácticas de ICMM

- Guía de Buenas Prácticas para la Gestión de Relaves del ICMM (ICMM, 2022 y 2025): Esta guía, que está alineada con el GISTM, incluye la gestión de cambios como uno de los seis elementos clave del marco de gobernanza de relaves (*tailings governance framework*). La guía recomienda que los procesos

para gestionar el cambio deben documentarse e implementarse para asegurar que los relaves sigan siendo gestionados de manera segura y responsable.

- Marco de Gobernanza de Relaves del ICMM (ICMM, 2022): Este marco, que precede al GISTM, requiere que los riesgos asociados con los posibles cambios sean evaluados, controlados y comunicados para evitar comprometer inadvertidamente la integridad de las Instalaciones de Almacenamiento de Relaves (TSF).

Estándares de Seguridad de Procesos y Gestión de Activos

- Guidelines for the Management of Change for Process Safety (CCPS, 2008): La Gestión de Cambios (GdC) se consolidó como un elemento esencial de la gestión de la seguridad de procesos tras su identificación como factor contribuyente en numerosos accidentes mayores en la industria química. Las directrices del Center for Chemical Process Safety (CCPS) de 2008 establecen la GdC como un sistema formal para evaluar y controlar modificaciones al diseño, operación, organización o actividades—antes de la implementación— para asegurar que no se introduzcan nuevos peligros o se incrementen los riesgos existentes.

- ISO 55001: Asset management — Asset management system — Requirements (2024): Aunque no está enfocado en la gestión de jales, este estándar internacional de gestión de activos requiere la planificación y control de cambios. El estándar establece que se debe planificar la introducción de cambios en el sistema de gestión de activos (cláusula 6.3) y que se debe controlar la modificación de los activos (cláusula 8.2).

Guías de Organizaciones de Ingeniería y Minería

- Towards Sustainable Mining (TSM) - Protocolo de manejo de relaves (MAC, 2022): El protocolo de MAC incluye la gestión de cambios como un principio central en su marco de gestión de riesgos.

- ICOLD Bulletin No. 194, Version 1.0 - Tailings Dam Safety (ICOLD, 2022): Este boletín documenta las prácticas recomendadas para la seguridad de los depósitos de jales y respalda los principios y prácticas del GISTM. En su sección de gobernanza de un depósito de jales, se incluye la gestión de cambios como uno de los elementos clave del marco de gobernanza, destacando que es crucial reconocer y documentar todos los cambios que pueden introducir riesgos para la seguridad del depósito.

2.4 Ejemplos de cambios que deben evaluarse en la gestión de cambios

La siguiente lista de ejemplos de cambios que deben ser evaluados incluye modificaciones físicas, procedimentales, operacionales y organizacionales a

lo largo de las distintas fases del ciclo de vida de un depósito de relaves:

2.4.1 Concepción y Diseño

Esta fase se centra en la evaluación de modificaciones a los parámetros de ingeniería y a la documentación fundacional:

- Cambios en los criterios de diseño o bases de diseño (DBR), incluyendo parámetros sísmicos, hidrológicos o geotécnicos
- Modificaciones en la tecnología de relaves (e.g., pasar de depósito hidráulico a *dry stack* o viceversa) o en la estrategia de emplazamiento
- Reversión en el sentido de flujo de fluidos (como en sistemas de bypass)
- Cambio en la Clasificación por Consecuencia de la instalación, lo cual afecta los criterios de diseño
- Modificación del diseño de la geometría o configuración de las etapas de recrecimiento
- Selección o cambio del Ingeniero de Registro (EOR) o del diseñador a cargo, lo cual requiere un plan de transferencia de conocimiento

2.4.2 Construcción

Esta fase se centra en las desviaciones físicas, la selección de materiales, y la gestión de la calidad:

- Modificaciones a las especificaciones técnicas o a la metodología de construcción (e.g., cambio de la técnica de compactación o alteración del método de elevación del muro)
- Cambios en el origen o el tipo de materiales de construcción (e.g., pasar a utilizar un material de empréstito no especificado en el diseño original)
- Desviaciones en la geometría o dimensiones de los terraplenes o estructuras auxiliares respecto a los planos aptos para construcción
- Cambios o adiciones a la infraestructura del sitio, como tuberías, canales, o sistemas de drenaje
- Implementación de soluciones provisionales o temporales que difieran del diseño aprobado (e.g., instalaciones temporales de bombeo)
- Alteraciones en los procedimientos de Control y Aseguramiento de la Calidad (QA/QC) o requisitos de testing y certificación

2.4.3 Operación

Esta fase abarca cambios en los procedimientos diarios, el monitoreo, el personal y las condiciones de operación:

- Modificaciones al Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia (OMS), incluyendo procedimientos de mantenimiento, vigilancia o de seguridad en el trabajo
- Alteración de las restricciones operacionales (e.g., límites de presión, límites de almacenamiento de agua en la laguna, caudal de descarga de relaves)

- Modificación de los TARP o de los umbrales de alerta
- Cambios en la estrategia de depósito de relaves (e.g., la reubicación de puntos de descarga o alteración de la granulometría de los relaves)
- Modificación del alcance del monitoreo o implementación de nuevos sistemas de instrumentación (e.g., cambio en la frecuencia de las inspecciones o adición de piezómetros)
- Cambios organizacionales o de personal clave con roles críticos para la seguridad del depósito (e.g., rotación del ingeniero responsable del depósito de jales (RTFE), reducción en el número de operadores por turno o externalización de servicios)

2.4.4 Cierre y Post-Cierre

Esta fase se enfoca en las modificaciones a la configuración final y la gestión de los riesgos a largo plazo:

- Modificaciones al plan de cierre, el diseño de la configuración final o el material de cobertura final del vaso
- Cambios en los objetivos de post-cierre (e.g., uso futuro del terreno)
- Cambios en el monitoreo de la instalación de relaves o de la infraestructura de control ambiental durante la fase de cuidado activo
- Implementación de medidas correctivas permanentes para riesgos residuales identificados durante el cierre
- Cambios en la gestión o estructuras de gobernanza destinadas al período de post-cierre

3 METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL DAR

A continuación, se propone un método estructurado en cinco pasos, integrando las lecciones de casos de estudio de depósitos de jales en México, proponiendo un nivel más alto de análisis para escenarios con mayor disponibilidad de datos técnicos.

1. Registro Centralizado y Documentación (Nivel Base)

El primer paso es la creación de una Bitácora de Cambios y Fichas DAR individuales para cada desviación detectada.

- Información requerida: Descripción técnica del cambio, el originador (quién solicitó el cambio), la motivación (razones económicas, operativas o constructivas), el nivel de importancia (baja, media, alta) y la documentación de respaldo (GTR, 2020).
- Nivel de detalle: Cada ficha debe referenciar cartas técnicas, informes de diseño o resultados de pruebas de laboratorio que verifiquen que la intención original del diseño no se ha visto comprometida por el cambio aislado.

2. Clasificación por Naturaleza del Impacto

Las desviaciones no deben evaluarse solo de forma aislada, sino según cómo interactúan con otros cambios en los mismos componentes de la instalación.

- Categorías sugeridas:
 - Efecto Individual: Cambios sin relación con otras modificaciones.
 - Desestimada: Cambios ya corregidos o que representan una mejora de diseño u operación.
 - Efecto Acumulativo: Desviaciones que afectan los mismos componentes (e.g., cambios en el núcleo arcilloso combinados con hallazgos de filtración).
- Profundización propuesta: Si se dispone de un modelo BIM o gemelo digital, se debe realizar un mapeo espacial para identificar "zonas calientes" donde convergen múltiples desviaciones físicas o geotécnicas (ICMM, 2025).

3. Vinculación con Modos Potenciales de Falla (PFMs)

Se debe traducir cada desviación acumulativa a un peligro físico real, vinculándola con los modos potenciales de falla (PFMs) identificados para el depósito, idealmente como resultado de un taller de gestión de riesgo o un taller PFMA.

- Análisis técnico: Identificar si el cambio actúa como un "gatillante" (trigger) para modos de falla como erosión interna/externa o inestabilidad y deformación.
- Nivel de detalle: Describir la secuencia lógica de eventos. Por ejemplo, una filtración no controlada (desviación) puede aumentar el nivel freático, reduciendo la resistencia efectiva de los materiales y aumentando la probabilidad de inestabilidad (ICOLD, 2022).

4. Evaluación del Riesgo Acumulado (Nivel Profundo)

Este paso determina si la suma de cambios ha desplazado el perfil de riesgo fuera de los umbrales de tolerabilidad (ALARP).

- Método Cualitativo: Uso de matrices de riesgo (probabilidad vs. consecuencias) para evaluar si el riesgo acumulado se mantiene en niveles "bajos o moderados" o tolerables (ALARP).
- Propuesta de Evaluación Profunda (SQRA/QRA): Si hay antecedentes detallados sobre probabilidades y consecuencias, se debe transitar hacia una evaluación de riesgos semicuantitativa o cuantitativa:
 - Probabilidades: Utilizar árboles de eventos para estimar la probabilidad anual de falla. Por ejemplo, si se conoce la frecuencia de sismos o lluvias extremas actualizada para efectos del cambio climático, es posible recalcular la probabilidad de rebose tras un asentamiento no previsto (Herza 2023).

◦ Consecuencias: Si una desviación altera la geometría o el volumen almacenado, se debe actualizar el análisis de rotura de presa para actualizar el área afectada, tiempos de llegada y potencial pérdida de vidas (PLL) (ICOLD, 2022).

5. Recomendaciones y Gobernanza

El DAR debe culminar en acciones concretas para mitigar el "creep del riesgo".

- Acciones: Proponer medidas de mitigación específicas (e.g., contrafuertes) y actualizar documentos fundamentales como el Informe de Bases de Diseño (DBR) y el Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia (OMS).
- Aprobación: El informe debe ser certificado por el Ingeniero de Registro (EOR) y aprobado formalmente por el Ejecutivo Responsable, asegurando que la alta dirección rinda cuentas por el perfil de riesgo acumulado (GTR, 2020).

4 RESULTADOS OBTENIDOS

Con base en los casos de estudio de implementación del DAR, los resultados más significativos obtenidos a partir de la implementación del Reporte de Responsabilidad ante Desviaciones (DAR) tienen relación con la sistematización del registro de desviaciones o modificaciones. El registro de cambios de un proyecto u operación (*change log*) puede ampliarse para identificar la relación de cada desviación con los modos de falla previamente evaluados en un taller de evaluación de riesgos, constatando la recurrencia o afectación de cambios individuales con un mismo modo de falla y sentando las bases para la evaluación periódica del efecto acumulativo de las desviaciones que afectan un mismo modo de falla. En términos prácticos y tangibles para la comunicación de riesgos, la evaluación del efecto acumulativo de las desviaciones en el perfil de riesgo de la instalación es un producto esencial del DAR, representado por el cambio de nivel de riesgo asociado a los modos de falla correspondientes, a través de la matriz de riesgo que combina probabilidad y consecuencia de cada modo de falla potencial.

La sistematización y ampliación del registro de cambios del proyecto también puede aportar los antecedentes necesarios para el requerimiento de Verificación de la Construcción contra la Intención del Diseño (VCID), requerimiento 6.2 del GISTM, ya que en la etapa constructiva el registro puede incluir, entre otros: soluciones de terreno o *redlines*; reportes de no-conformidades; cambios de diseño; cambios de personal clave en los Contratistas principales, en el equipo de diseño/CQA o en el equipo del dueño; eventos climáticos o sísmicos extremos. Por otro lado, la utilidad fundamental de los resultados del DAR es la de entregar una herramienta concreta

de Gobernanza, proporcionando resultados de evaluaciones periódicas que pueden utilizarse para sustentar recomendaciones de acciones correctivas y su priorización, comunicadas principalmente a través del EOR, y la toma de decisiones de quienes son dueño del riesgo en la organización del dueño. Es requisito específico del GISTM que el Ejecutivo Responsable tome conocimiento y apruebe formalmente el DAR, asegurando la visibilidad y rendición de cuentas al más alto nivel jerárquico.

4.1 Resultados obtenidos en los casos de estudio

Los casos de estudios corresponden a dos depósitos de jales en México que han experimentado cambios de diseño significativos desde su concepto original, además de desafíos constructivos y operativos a lo largo de los últimos años.

Una utilidad importante del resultado de implementación del método de evaluación de desviaciones para el DAR presentado en este artículo, evidenciada en los casos de estudio, ha sido formalizar un repositorio centralizado y más detallado de las desviaciones o cambios del proyecto, pasando de un registro fragmentado de incidencias a una evaluación del impacto acumulativo sobre el perfil de riesgo global. Se constató lo siguiente:

- Consolidación de la historia constructiva y operativa: En los casos de estudio, el proceso de consolidar modificaciones, desviaciones, no conformidades permitió consolidar un total de 24 desviaciones (17 cambios o ajustes de diseño y 7 desviaciones operacionales) que habían surgido desde 2020, lo cual es vital para evitar la pérdida de la "memoria institucional" ante cambios de personal o de diseñadores.

- Identificación de sinergias de riesgo: En los casos de estudio, la implementación del DAR permitió clasificar cambios que, individualmente, podrían parecer menores o ser "desestimados", pero que al interactuar o acumularse pueden afectar modos de falla potencial críticos. Por ejemplo, se identificó que las desviaciones clasificadas como acumulativas se concentraban en uno de los muros perimetrales y en eventos de infiltraciones/pérdida de agua no controlada desde la laguna, permitiendo destacar un sesgo hacia modos de falla específicos como la erosión interna y la inestabilidad.

5 RESULTADOS PROYECTADOS

5.1 Resultado esperado para la gestión de cambios

El resultado tangible del DAR es la formalización y trazabilidad del proceso de gestión de cambios a través de herramientas estandarizadas:

- Implementación de herramientas de control: Se espera que el DAR derive en el uso de "fichas DAR" y una bitácora de cambios más completa. Estas herramientas obligan a categorizar cada cambio por su naturaleza (diseño u operación) y temporalidad, asegurando que ninguna modificación ocurra sin una verificación técnica del concepto de diseño original.

- Ciclo de mejora continua: El informe no es meramente descriptivo; su resultado esperado es la generación de recomendaciones proactivas para la gestión de riesgos, cuando el resultado indica un aumento del nivel de riesgo de un modo de falla potencial hacia una zona de riesgo no tolerable. Esto permite que el sistema "aprenda" de las desviaciones y ajuste los planes futuros antes de que las anomalías escalen a condiciones de emergencia.

5.2 Impacto en la gestión y gobernanza de jales

El DAR impacta profundamente la gobernanza del dueño al alinear la operación técnica con la rendición de cuentas ejecutiva exigida a nivel corporativo y a través del GISTM.

- Responsabilidad del Ejecutivo Responsable (AE): Un impacto crítico es que el DAR debe ser aprobado por el Ejecutivo Responsable (GTR, 2020). Esto asegura que la alta dirección no sólo esté informada, sino que sea legal y corporativamente responsable del impacto acumulativo de los cambios o desviaciones en el perfil de riesgo de la instalación.

- Actualización de la base de conocimientos: El DAR asegura que los documentos fundamentales, como el Informe de Bases para el Diseño (DBR) y el Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia (OMS), se mantengan como documentos vivos y actualizados según las condiciones reales o conforme a obra ("as-built") del depósito.

- Validación de la intención de diseño: El proceso permite al Ingeniero de Registro (EOR) certificar que, a pesar de las desviaciones registradas, la intención del diseño original se mantiene o ha sido ajustada adecuadamente para preservar la seguridad del depósito, como complemento del VCID al final de la etapa constructiva.

5.3 Gestión y Gobernanza más allá del DAR

El Reporte de Responsabilidad ante Desviaciones (DAR) cumple la función técnica específica de evaluar el impacto acumulado de los cambios físicos y operacionales en el nivel de riesgo del depósito. Sin embargo, al ser una herramienta derivada del Requisito 6.5 del GISTM, el DAR se centra en el "creep" del riesgo técnico y excluye elementos sistémicos de gobernanza y bases de conocimientos sociales que pueden ser igualmente decisivos para una gestión proactiva e integral de un depósito de jales.

La siguiente lista detalla algunas exclusiones de elementos de gobernanza y buenas prácticas que no forman parte del DAR pero son decisivas para el éxito de un proyecto de depósito de jales, en todas sus etapas del ciclo de vida.

Nivel de Alta Dirección e Inversionistas: Políticas e Incentivos

El DAR se limita a la verificación técnica de desviaciones, pero deja fuera compromisos de alto nivel que aseguran la sostenibilidad financiera y ética:

- Vínculo de Incentivos con la Seguridad: Una práctica proactiva esencial es que las revisiones de desempeño y pagos de incentivos para los roles con responsabilidad en jales se basen en la integridad de la instalación y la seguridad pública (GTR, 2020).

- Política del Directorio: El DAR no cubre la obligación de la Junta Directiva de publicar una política de gestión segura que incluya la recuperación tras una falla (ICMM 2021).

- Capacidad Financiera y Seguros: No forma parte del DAR la revisión periódica para confirmar que se cuenta con la capacidad financiera y seguros adecuados para el cierre y post-cierre (ICMM, 2025).

Nivel de Relaciones Sociales y Comunidad: Derechos Humanos

Mientras el DAR analiza principalmente "modos de falla" físicos, la gestión proactiva requiere también abordar los riesgos con un enfoque en impactos sociales:

- Debita Diligencia en Derechos Humanos: el DAR excluye la evaluación de riesgos a los derechos humanos asociados a escenarios de falla creíbles, requisito fundamental para los inversionistas modernos (GTR, 2020).

- Consentimiento y Compromiso: El DAR no documenta el trabajo para obtener y mantener el Consentimiento Libre, Previo e Informado de los pueblos indígenas o comunidades afectadas, elemento vital para la licencia social (ICMM, 2021).

Nivel de Gestión Operativa y Cultura Organizacional

El DAR recomienda herramientas de registro como las "fichas DAR", pero la gestión proactiva depende de factores humanos no capturados en estos documentos:

- Protección a denunciantes (*whistleblowers*): Un elemento crítico ausente en el DAR es el establecimiento de mecanismos confidenciales que protejan de represalias a empleados que reporten desviaciones y peligros (Afriyie y Morrison, 2023).

- Cultura de aprendizaje: El DAR es un informe periódico, pero no sustituye los mecanismos para incorporar el conocimiento basado en la experiencia de los operadores en la planificación diaria (GTR, 2020).

- Factores humanos en investigaciones: La gestión proactiva exige que las lecciones aprendidas de incidentes no solo se enfoquen en la técnica (como el DAR), sino específicamente en factores humanos y organizacionales (ICMM, 2025).

Nivel de Diseño y Ciclo de Vida: Planificación del Cierre

Mayoritariamente, el DAR se enfoca en desviaciones de diseño, construcción y operación que son reflejo de la situación reciente, excluyendo la visión de largo plazo, por ejemplo:

- Diseño para el Cierre: El DAR evalúa si los cambios afectan la estabilidad hoy, pero no necesariamente si esos cambios pueden comprometer la transición a una configuración de cierre autosustentable y segura a perpetuidad (ICOLD, 2022).

- Recuperación a Largo Plazo: No forma parte del DAR el diseño de estrategias de respuesta social y ambiental de mediano y largo plazo posteriores a una falla catastrófica (GTR 2020).

6 CONCLUSIONES

La implementación del Reporte de Responsabilidad ante Desviaciones (DAR) ha demostrado ser mucho más que una exigencia del Requisito 6.5 del GISTM; constituye el mecanismo de vigilancia dinámica de las desviaciones y cambios para evaluar la deriva del perfil de riesgo y la necesidad de medidas correctivas para asegurar la integridad a largo plazo de los depósitos de jales. La transición desde un registro fragmentado de desviaciones o cambios hacia una evaluación técnica centralizada permite también capturar la historia y el impacto acumulado de la dinámica constructiva y operativa.

Hallazgos de los casos de estudio. Los resultados obtenidos en los casos de estudio en México validan la eficacia del DAR para diagnosticar la "deriva del riesgo" (risk creep) y para sentar las bases de lo siguiente:

- Consolidación Histórica: El proceso permitió documentar hasta un total de 24 desviaciones (17 cambios de diseño y 7 operacionales) acumuladas desde 2020, rescatando la "memoria institucional" frente a la rotación de personal y diseñadores.

- Identificación de Sinergias: El análisis técnico reveló que las desviaciones acumulativas se concentraban críticamente en un muro perimetral y en eventos de filtraciones no controladas, permitiendo identificar un sesgo de deriva del riesgo hacia modos de falla específicos como la erosión interna y la inestabilidad.

- Vinculación con PFMs: Al vincular cada desviación con peligros físicos reales a través de los Modos Potenciales de Falla (PFMs) e identificar su potencial acumulativo con otras desviaciones vinculada a un mismo modo potencial de falla, los resultados del DAR

proporcionan una base científica para alertar sobre el aumento del perfil de riesgo y para priorizar acciones correctivas antes de que las anomalías escalen a emergencias.

Impacto en la Gobernanza y la Planificación Estratégica. La utilidad fundamental del DAR radica en su capacidad para alinear la operación técnica con la rendición de cuentas (*accountability*) ejecutiva, a través de lo siguiente:

- Responsabilidad Ejecutiva: Al requerir la certificación/autoría del EOR y la aprobación formal del Ejecutivo Responsable (AE), el DAR eleva las desviaciones técnicas al nivel de decisiones corporativas estratégicas, promoviendo que la alta dirección sea legal y corporativamente responsable del perfil de riesgo acumulado.

- Documentación Viva: El proceso del DAR gatilla la actualización periódica del Informe de Bases de Diseño (DBR) y el Manual de Operación, Mantenimiento y Vigilancia (OMS), asegurando que estos documentos reflejen fielmente la condición "as-built" y la realidad operativa del sitio.

- Complemento de la VCID: El DAR complementa y amplía el requisito de Verificación de la Construcción contra la Intención de Diseño (VCID) de la etapa constructiva, incorporando un análisis más amplio en origen de las desviaciones y una identificación del impacto acumulativo.

Desafíos Críticos y Proyecciones Futuras. A pesar de los beneficios observados, la estandarización plena del DAR enfrenta desafíos significativos:

- Evolución Metodológica: La evaluación del impacto acumulativo de desviaciones sugiere la necesidad de transitar desde evaluaciones de probabilidad cualitativa hacia evaluaciones de riesgo semicuantitativas (SQRA) o cuantitativas (QRA) para reducir la subjetividad en la estimación del cambio en el nivel de riesgo de los modos potenciales de falla.

- Transformación digital y consolidación de la información histórica: El éxito futuro dependerá de la integración de la información desde fuentes digitales y registros manuales, con procesamiento de la información que agilice el desarrollo de un mapeo espacial de "zonas calientes" donde converjan múltiples desviaciones, optimizando la evaluación y toma de decisiones por parte del dueño del riesgo.

REFERENCIAS

- Afriyie, G., Morrison, K.F. (2023). "Process Safety Approach for Reviewing Critical Controls on Tailings Storage Facilities". *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2023*. Vancouver: UBC Library Open Collections.
- CCPS (2008). *Guidelines for the Management of Change for Process Safety*. New York: Wiley-Interscience.

- GTR (2020). Estándar Global de Gestión de Relaves para la Industria Minera (GISTM). Londres: Global Tailings Review.
- Herza, J. (2023). “*Proceedings of Tailings Dams Risk Assessment Short Course*”. ICOLD 2023, 91st Annual Meeting. Gotemburgo: ICOLD.
- ICMM (2021). *Conformance Protocols Global Industry Standard on Tailings Management*. Londres: International Council on Mining and Metals.
- ICMM (2022). “Adapting the ICMM Tailings Management Good Practice Guide into Training Materials”. *The Hub*. Londres: International Council on Mining and Metals.
- ICMM (2025). *Tailings Management Good Practice Guide*. Londres: International Council on Mining and Metals.
- ICOLD (2022). *Tailings Dam Safety, Bulletin No. 194*. París: International Commission on Large Dams.
- ISO (2024). *ISO 55001 Asset management — Asset management system — Requirements*. Ginebra: International Organization for Standardization.
- Kletz, T.A. (2009). *What Went Wrong?: Case Histories of Process Plant Disasters*. Boston: Elsevier.
- MAC (2022). *Protocolo de manejo de relaves – junio de 2022*. Mining Association of Canada.