

Metodología para la definición de umbrales de respuesta en piezómetros de presas de relaves basada en análisis numérico de estabilidad empleando el software GeoStudio®

Methodology for defining response thresholds in tailings dam piezometers based on numerical stability analysis using GeoStudio® software

Jenny Granja¹, Raúl Robles², Jorge Albuja³

¹ KCB Ecuador Consulting S.A., Cuenca, Ecuador, 010204, jgranja@klohn.com, 0000-0003-4005-3687

² KCB Ecuador Consulting S.A., Cuenca, Ecuador, 010204, rrobles@klohn.com, 0009-0004-8414-2897

³ Multidisciplinary Engineering Research Hub (MER Hub), Faculty of Habitat, Infrastructure, and Creativity, Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), Quito 170143, Ecuador, jdalbuja@puce.edu.ec, 0000-0003-3981-2201

Resumen: Este estudio presenta una metodología sistemática para la definición de umbrales de respuesta en piezómetros de presas de relaves, basada en análisis numéricos de estabilidad mediante el software GeoStudio® (SLOPE/W). A partir de un modelo hipotético representativo de presas construidas sobre saprolito en la región andina, se evaluaron escenarios críticos de variación de presión de poros (coeficiente B-bar) y elevación del nivel freático, y se correlacionaron directamente con el factor de seguridad (FoS). Los resultados muestran que un incremento de B-bar de 0.1 a 0.9 reduce el FoS de 1.49 a 1.12, mientras que un ascenso del nivel freático de 0 a 10 m sobre la interfase relleno-cimentación disminuye el FoS de 1.53 a 1.40. Estos valores permitieron establecer umbrales de respuesta (verde, amarillo, naranja, rojo) vinculados a niveles de estabilidad estructural, alineados con estándares internacionales (CDA, 2013; MEM, 2023). La metodología se contextualiza con fallas históricas como Fundão (2015) y Cadia (2018), demostrando su potencial para detectar condiciones críticas antes de que se conviertan en fallas. Se destaca que los umbrales propuestos son una guía técnica que debe calibrarse con datos reales y revisarse periódicamente. Este enfoque representa un avance frente a metodologías puramente empíricas, al integrar modelación mecanicista con monitoreo instrumental para una gestión de riesgos más robusta.

Palabras clave: Geostudio, monitoreo, piezómetros, Presa de relaves, umbrales de alerta.

Abstract: This study proposes a systematic methodology for defining response thresholds for piezometers in tailings dams using numerical slope stability analysis with GeoStudio® (SLOPE/W). A representative hypothetical dam built on saprolite, based on real Andean tailings facilities, was analyzed under critical scenarios of pore pressure variation (B-bar from 0.1 to 0.9) and rising water table (up to 10 m above the foundation interface). Results show that increasing B-bar from 0.1 to 0.9 reduces the factor of safety (FoS) from 1.49 to 1.12, while raising the water table from 0 to 10 m decreases FoS from 1.53 to 1.40. These trends were used to define color-coded response thresholds (green, yellow, orange, red) aligned with stability limits (FoS > 1.5 for stable, < 1.2 for critical), providing a mechanistic link between instrumental readings and structural safety. The methodology was evaluated against historical failures (e.g., Fundão, 2015; Cadia, 2018), demonstrating its potential to detect early warning signs. Although the thresholds are based on a hypothetical model, they are calibrated using realistic geotechnical parameters and can be adapted to real-world cases. This framework enhances traditional monitoring practices by integrating numerical modeling into decision-making, offering a practical and technically grounded approach for risk-informed dam safety management.

Keywords: Geostudio, monitoring, piezometers, Tailings Storage Facility, alert thresholds.

1 Introducción

Las presas de relaves son estructuras críticas cuyo correcto funcionamiento es esencial para la seguridad de las comunidades, el medio ambiente y las operaciones mineras. Una falla en este tipo de estructura puede tener consecuencias devastadoras, por lo que su monitoreo continuo es una práctica indispensable. Motivo por el cual, las presas modernas incorporan sistemas de instrumentación para monitorear su comportamiento en el tiempo.

Entre los equipos de monitoreo más comunes utilizados en presas de relaves destacan los piezómetros de cuerda vibrante y de tubo abierto, inclinómetros, medidores de asentamiento y tecnologías más recientes como radares e InSAR. Estos sistemas registran información esencial sobre presiones de poro, desplazamientos del terreno y variaciones del nivel freático.

Además del registro de datos, es importante también su correcta interpretación. De este análisis en conjunto con modelos numéricos, se obtiene una visión clara del comportamiento esperado y se identifican posibles anomalías tempranas. Por ello, contar con umbrales de respuesta es esencial para la seguridad operativa de la presa, ya que nos indican límites de comportamiento normal, alerta y emergencia.

Los umbrales de repuesta sirven como guía para facilitar la lectura de los datos, transformándolos en indicadores útiles para la gestión. Cuando un piezómetro registra una presión de poros mayor a la habitual, el límite correspondiente permite identificar si la situación es normal, si requiere atención o actuar inmediatamente. De esta manera, se mejora la capacidad de respuesta frente a posibles escenarios críticos.

Es importante resaltar que la instrumentación no reemplaza la supervisión humana. Peck (1972) ya señalaba que el ojo entrenado de un observador constituye uno de los instrumentos más valiosos. En consecuencia, las inspecciones visuales y el monitoreo instrumental son actividades complementarias (ICMM, 2021).

Para la ubicación e instalación del sistema de auscultación se requiere identificar previamente las zonas más vulnerables de la presa, asegurando que cada instrumento tenga un propósito definido y aporte información relevante para la evaluación de la estructura.

La metodología propuesta permite determinar umbrales de respuesta en piezómetros, para una configuración típica de una presa de relaves con recrecimiento aguas abajo con el objetivo de proporcionar una herramienta operativa que vincule las lecturas de los instrumentos con el estado real de estabilidad de la estructura, fortaleciendo así un manejo del riesgo más preciso.

Aunque el modelo corresponde a un caso conceptual, su configuración geométrica y los parámetros geotécnicos se definieron a partir de información obtenida en presas reales construidas sobre saprolito, entre ellas Mirador y FDN en Ecuador y Cobre Panamá en Panamá. Esto permite considerar que la representación adoptada es técnicamente consistente y verosímil.

1.1. Estado del Arte

Existen lineamientos internacionales (CDA, 2013; ICMM, 2021; MEM, 2023) para definir umbrales de respuesta, y la gran mayoría no incorpora un método cuantitativo que relacione las lecturas tomadas de la instrumentación con la estabilidad del talud. Los criterios usuales se apoyan en valores empíricos o históricos, sin un retroanálisis geotécnico que los sustente.

Por esta razón, este enfoque combina modelación numérica con SLOPE/W y simulaciones de presión de poros para definir umbrales basados en el factor de seguridad. Con ello, se supera la naturaleza descriptiva de otros métodos y se introduce una relación directa entre la respuesta hidráulica y la estabilidad del talud.

Esta metodología es de fácil uso y accesible mediante el software GeoStudio®, a diferencia de otros métodos probabilísticos como los modelos basados en inteligencia artificial para el monitoreo de presas (e.g., Sun et al., 2022, Computers and Geotechnics) o los propuestos por Christian et al. (1994) o Zhang et al. (2020) en Geotechnique. Sin embargo, esta metodología no sustituye métodos avanzados de análisis de riesgo, pero facilita la conexión entre la instrumentación habitual y las decisiones técnicas.

1.2. Limitaciones

Este estudio se limita a escenarios de carga estática (final de la construcción y largo plazo), donde las variaciones hidráulicas son las principales amenazas. No obstante, es necesario la evaluación completa de la seguridad de la presa y se deberá incorporar un análisis sísmico en futuras etapas del monitoreo. Esta metodología puede adaptarse a condiciones dinámicas mediante software como Plaxis o FLAC, estos permiten definir umbrales adicionales para aceleraciones o deformaciones sísmicas.

Asimismo, el tratamiento del saprolito como un medio uniforme constituye una limitación importante, ya que estos materiales suelen presentar variaciones marcadas y anisotropías producto de la alteración y de la geología local, lo que puede generar una representación incompleta de la distribución de presiones de poros en sectores con debilidad o con flujos concentrados. Para mejorar la confiabilidad del modelo, se recomienda adoptar esquemas estratificados o zonificados y calibrarlos con información obtenida directamente en terreno.

1.3. Definiciones

Niveles de seguridad: funcionan como referencias operativas que establecen los rangos aceptables de comportamiento para cada instrumento instalado en la presa, y deben definirse de manera particular para cada caso a partir de evaluaciones de estabilidad. Por lo general, se agrupan en cuatro categorías: normal, atención, alerta y emergencia.

Su finalidad es identificar condiciones que reflejen cambios en la estabilidad asociados a variaciones en la presión de poros o en la elevación del nivel piezométrico, estos parámetros son monitoreados mediante piezómetros de cuerda vibrante o piezómetros de tubo abierto tipo Casagrande. Este esquema de control permite actuar oportunamente ante situaciones que pueden evolucionar hacia estados críticos o indicar un posible inicio de falla, de esta manera se puede decidir la implementación de medidas preventivas o correctivas.

Análisis de Estabilidad de taludes: Este análisis consiste en evaluar el comportamiento y la seguridad de una masa de suelo o roca dispuesta en pendiente, para determinar si puede mantenerse en equilibrio frente a distintas condiciones de carga. Este proceso permite identificar posibles deslizamientos, estimar el factor de seguridad y definir medidas de diseño o mitigación.

La evaluación puede realizarse mediante varios métodos de equilibrio límite, técnicas numéricas como elementos o diferencias finitos, o probabilísticos. En todos los casos se consideran variables como las propiedades geomecánicas del material, la geometría del talud, la presencia de agua, cargas externas y efectos sísmicos.

Factor de seguridad: El factor de seguridad (FoS) en el análisis de estabilidad de taludes es un coeficiente adimensional que expresa la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes que tienden a provocar la falla de un talud. Se define como:

$$FS = \frac{\text{Resistencia al deslizamiento disponible}}{\text{Solicitud al deslizamiento (fuerzas desestabilizadoras)}}$$

En términos prácticos, un talud se considera estable cuando el factor de seguridad es mayor que 1.0, lo que indica que las fuerzas resistentes (principalmente la fricción y cohesión del suelo o roca) superan las fuerzas que inducen el movimiento (como el peso propio, cargas externas o presión de poros).

Valores típicos de FoS aceptados en ingeniería varían según el tipo de obra, condición de carga (estática o sísmica), y nivel de riesgo, siendo comúnmente requeridos valores mínimos entre 1.3 y 1.5 para condiciones normales de operación.

El FoS puede obtenerse mediante diferentes metodologías, tales como métodos de equilibrio límite (e.g., Bishop, Janbu, Morgenstern-Price), o a través de análisis numéricos avanzados (por elementos finitos o diferencias finitas).

Nivel Freático: El nivel freático es la superficie dentro del cuerpo de presa bajo la cual todos los poros del material se encuentran completamente saturados con agua. En el contexto de presas de relaves, el nivel freático es de vital importancia, ya que influye directamente en la presión intersticial (poropresión), la estabilidad del talud y el potencial de flujo interno dentro del depósito.

135 En presas de relaves, un nivel freático elevado o mal controlado puede generar condiciones críticas de
136 inestabilidad, debido a la reducción efectiva de las tensiones de corte disponibles (por disminución del esfuerzo
137 efectivo), facilitando así fenómenos como licuefacción, erosión interna (piping) o falla por deslizamiento.

138 El monitoreo de este parámetro es fundamental para el control de los sistemas de drenaje, como filtros, drenes
139 horizontales o chimeneas, y se mide en los piezómetros de tubo abierto o de cuerda vibrante.

140 **Presión de poros:** La presión de poros o presión intersticial es el esfuerzo ejercido por el agua contenida en
141 los vacíos del material. En presas de relaves, este parámetro adquiere un rol determinante en la estabilidad del
142 sistema.

143 Durante cada recrecimiento, el depósito recibe nuevas cargas verticales que modifican el estado de esfuerzos
144 en la cimentación. Si esta presenta baja permeabilidad y un alto grado de saturación, la capacidad de disipar el
145 incremento de presión es limitada, generando aumentos transitorios de presión de poros que pueden
146 comprometer la estabilidad.

147 **B-bar:** El coeficiente B-bar representa la parte del incremento de carga total que se traduce en presión de poros
148 bajo condiciones de drenaje limitado, como ocurre en recrecimientos de presas de relaves. Se define como:

149
$$\bar{b} = \frac{\Delta\mu}{\Delta\sigma}$$

150 Donde:

- 151 • $\Delta\mu$ = incremento de presión de poros
152 • $\Delta\sigma$ = incremento de carga total

153 El valor de B-bar muestra cuánto del aumento de carga vertical genera presión de poros, disminuyendo el
154 esfuerzo efectivo y la resistencia al corte de la cimentación.

- 155 • B-bar=0: Todo el incremento de carga es absorbido por el esqueleto del suelo.
156 • B-bar=1: Todo el incremento de carga se transforma en presión de poros.

157 **Geostudio, extensión W/Slope:** SLOPE/W es uno de los módulos principales del software GeoStudio (de la
158 empresa Geo-Slope International), y está diseñado para realizar análisis de estabilidad de taludes mediante
159 métodos de equilibrio límite. Su uso está ampliamente difundido en la ingeniería geotécnica, y es especialmente
160 útil en el análisis de presas de relaves, tanto en fase de diseño como en operación.

161 2 Metodología

162 2.1 Configuración del Modelo

163 Para el desarrollo de esta metodología se simulará un escenario de recrecimiento aguas abajo en una presa de
164 relaves, de modo que se pueda evaluar la variación de las condiciones piezométricas y sus implicancias con
165 respecto al proceso construcción. La configuración del modelo incorpora: (i) perfiles del suelo de cimentación
166 y del lecho rocoso; y (ii) la elevación actual y propuesta de la presa. Los detalles se presentan en la Tabla 1.

167 La configuración existente presenta una pendiente de 1.5H:1V hasta la cota de cresta (El. 1471msnm), con un
168 banco intermedio de 3 m de ancho. El talud local aguas abajo presenta una pendiente de 2H:1V con bancos de
169 ancho variable. Considerando un talud global aguas debajo de aproximadamente 3.5H:1V. La presa está
170 construida de un material gravoso grueso angular TM. 35 cm denominado “Relleno Masivo”, asimismo, posee
171 un filtro inclinado de material gravo-arenoso denominado “Material Filtrante”, y un dren colector principal en
172 la base del lecho conformado por material granular grueso angular sin arenas ni finos TM. 25 cm denominado

“Material Triturado”. Se considera que el nivel freático previo a la construcción se encuentra a nivel de base del dren principal. Los parámetros geotécnicos de los materiales se describen en la Tabla 2.

El recrecimiento en análisis considera un recrecimiento de la elevación de la presa hasta la cota 1483msnm. De esta manera el modelo de la sección crítica se presenta en la Figura 1.

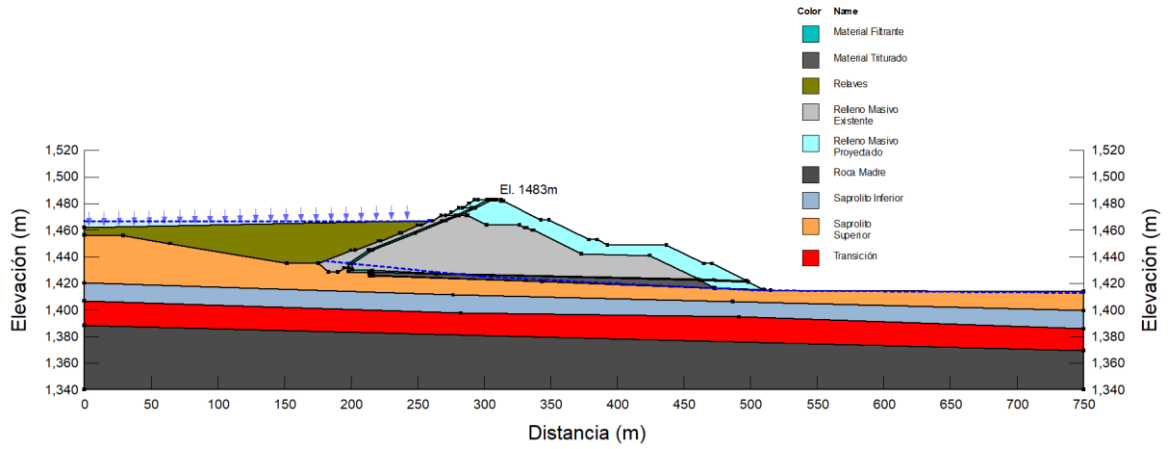
Tabla 1 Configuración de la presa de relaves

Configuración Actual de la Presa				Configuración proyectada
Elevación de la cresta (msnm)	Altura de presa (m)	Elevación máxima del relave (msnm)	Elevación del embalse (msnm)	Elevación de la cresta (msnm)
1471.0	48	1467	1467	1483.0

Tabla 2 Parametros geotécnicos de materiales de cimentación y relleno

Tipo	Material	Densidad Humedad (kN/m3)	Parámetros geotécnicos	
			Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)
Cimentación	Saprolito Superior	17.8	10	18
	Saprolito Inferior	18.2	25	24
	Transición	20.0	0	40
	Roca Madre	Impenetrable		
Relleno	Relleno Masivo	23.0	0	35
	Material Filtrante	21	0	32
	Material Triturado	20.0	0	38

Figura 1 Sección de análisis



2.2 Análisis de estabilidad

En los análisis de estabilidad, se ha utilizado el método de equilibrio límite de Morgenstern-Price (modelo con constant). Los factores de estabilidad recomendados se presentan en la Tabla 3. De acuerdo con las referencias evaluadas CDA (2013) recomienda un Factor de Seguridad (FoS) mínimo de 1.3 para el análisis de taludes en su condición de corto plazo o final de construcción; y FoS de 1.5 para los taludes en su condición de largo plazo o final de operación. Además, el MEM (2023) recomienda un valor de 1.5 para el análisis de taludes en su condición largo plazo.

3 Tabla 3 Factores de Seguridad Recomendados

Tipo de Análisis	Condición	Factor de Seguridad Mínimo	Referencia
Análisis Estático	Corto Plazo: final de construcción	1.3	CDA (2013)

Tipo de Análisis	Condición	Factor de Seguridad Mínimo	Referencia
	Largo plazo: final de operación	1.5	MEM (2023) y CDA (2013)

3.1 Umbrales propuestos

La determinación de los umbrales de respuesta se basa en la relación directa entre las lecturas instrumentales (presión de poros y nivel freático) y el estado de estabilidad del talud, evaluado mediante el factor de seguridad (FoS) calculado con el software SLOPE/W.

A partir de los resultados de los análisis paramétricos, se establecieron umbrales de clasificación que vinculan las condiciones piezométricas con el margen de seguridad estructural. El umbral verde (FoS > 1.5) representa un estado de estabilidad adecuado, consistente con los criterios de largo plazo establecidos por CDA (2013) y MEM (2023), y corresponde a condiciones normales de operación donde las presiones de poros y el nivel freático se encuentran bajo control, sin tendencias críticas.

Los umbrales de alerta se definen progresivamente a medida que el FoS disminuye: el umbral amarillo (FoS entre 1.4 y 1.5) indica una reducción leve en el margen de seguridad, asociada a un incremento controlado de presiones de poros o un ascenso moderado del nivel freático, lo que requiere monitoreo reforzado. El umbral naranja (FoS entre 1.2 y 1.4) señala una condición de alerta, típicamente provocada por excesos B-bar o un nivel freático elevado sin tendencia a la disipación, lo que exige la evaluación inmediata de medidas correctivas. Finalmente, el umbral rojo (FoS menor 1.2) representa una situación crítica, con FoS cercano a la falla, asociado a B-bar excesivo o un nivel freático cercano a la superficie del talud, lo que demanda la activación inmediata del plan de emergencia y la intervención técnica para mitigar el riesgo.

Tabla 4 Factores de Seguridad por Umbrales de Respuesta

Tipo de Análisis	Alerta	Condición	Factor de Seguridad Mínimo
Análisis Estático	Verde	Estable	> 1.5
	Amarilla	Moderada	> 1.4
	Naranja	Critico	> 1.2
	Roja	Peligro	< 1.2

Los umbrales propuestos son una referencia derivada de análisis numéricos, pero deben ajustarse a cada presa según sus condiciones específicas. Su aplicación requiere calibración con datos históricos, validación en terreno y revisión periódica por especialistas para asegurar su efectividad en la gestión del riesgo.

2.1 Escenarios de Análisis

Los escenarios de análisis para determinar los umbrales de respuesta para este análisis se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5 Escenarios de análisis

Parámetro evaluado	Valores de análisis	Consideraciones
Variación de presión de poros	B-bar variando de 0.1 a 0.9	Todo el relleno del recrecimiento será colocado “instantáneamente” generando una variación de presión de poros en los materiales de cimentación (saprolito superior e inferior)
Variación de nivel freático	Línea piezométrica se alzaré cada 5m hasta 20m medido desde la interfase de relleno/cimentación	El nivel freático incrementa en el cuerpo del dique debido a la obstrucción del dren basal.

2.2 Escenarios de Análisis Calibración del modelo y análisis de sensibilidad

El modelo numérico fue construido en GeoStudio® utilizando una malla de elementos finitos con refinamiento en zonas críticas (base de la presa, interfase relleno-cimentación y zona de drenaje). Para el análisis de estabilidad, se utilizó el método de Morgenstern-Price con función de fuerza normal constante, y se verificó la convergencia del factor de seguridad con una tolerancia de 0.001.

Los parámetros geotécnicos asignados al saprolito superior e inferior (Tabla 2) se basan en datos obtenidos de ensayos triaxiales y de corte directo realizados en proyectos mineros en el oriente (o región “selva”) particularmente en las unidades mineras Mirador y Fruta del Norte (Ecuador), y Cobre Panamá (Panamá), reportados en estudios geotécnicos internos y públicos. Los valores de ángulo de fricción (18° y 24°) y cohesión (10 kPa y 25 kPa) son coherentes con los rangos típicos reportados en la literatura para saprolitos de alteración intermedia a avanzada en rocas ígneas (e.g., Bray et al., 2015; D’Hollanda Barbosa et al., 2018). Adicionalmente, los valores de densidad y permeabilidad se ajustaron para reproducir condiciones de campo observadas en presas de relaves de condiciones similares, donde el nivel freático se mantiene generalmente por debajo de la base del dren principal en condiciones normales. Esta calibración cualitativa con comportamientos reales refuerza la representatividad del modelo, aunque se reconoce que la heterogeneidad natural del saprolito puede introducir incertidumbre en la respuesta local.

Asimismo, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de los principales parámetros geotécnicos del saprolito superior (ángulo de fricción, cohesión y densidad) sobre el factor de seguridad. Se varió cada parámetro $\pm 10\%$ respecto a su valor nominal, manteniendo las demás constantes. Los resultados indican que el ángulo de fricción es el parámetro más sensible, con una variación del 10% provocando un cambio del $\pm 6\%$ en el FoS. La densidad tuvo un efecto del 3% en el FoS, mientras que la cohesión mostró un impacto menor ($\pm 1\%$). Esta sensibilidad confirma que la resistencia al corte está dominada por la fricción en este tipo de material. Estos hallazgos refuerzan la importancia de una estimación precisa del ángulo de fricción en la definición de umbrales de respuesta.

3 Resultados

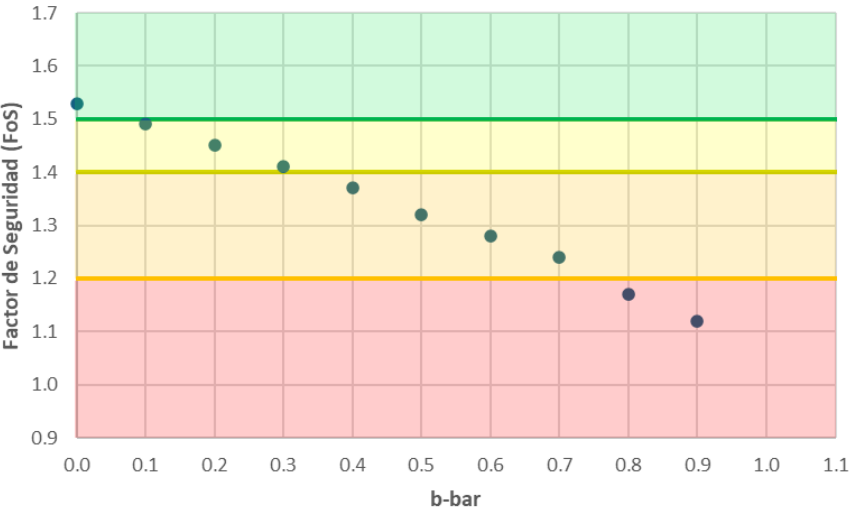
Los resultados de los análisis de estabilidad obtenidos con el software Slope/W (Geostudio 2021) se muestran en la Tabla 6 y Tabla 7 para la evaluación de variación de presión de poros y de nivel freático respectivamente. En el mismo sentido, los resultados se muestran en las Figura 2 y Figura 3 respectivamente.

Tabla 6 Resultados para la evaluación de variación presión de poros

B-bar	Factor de Seguridad	Alerta	Condición
0.0	1.53	Verde	Estable
0.1	1.49	Amarilla	Moderada
0.2	1.45	Amarilla	Moderada
0.3	1.41	Amarilla	Moderada
0.4	1.37	Naranja	Critico
0.5	1.32	Naranja	Critico
0.6	1.28	Naranja	Critico
0.7	1.24	Naranja	Critico
0.8	1.17	Roja	Peligro
0.9	1.12	Roja	Peligro

248

Figura 2 Resultados para la evaluación de variación presión de poros



249

250

Tabla 7 Resultados para la evaluación de variación nivel freático

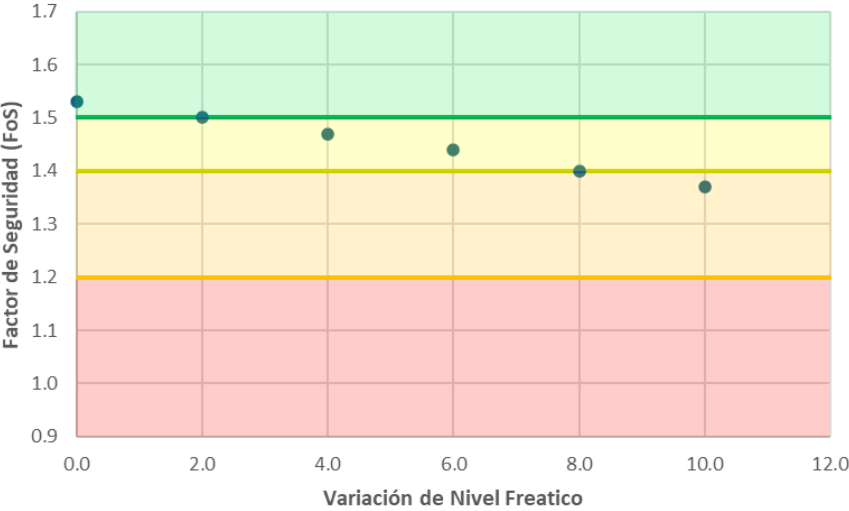
251

Elevación del Nivel Freático (m)	Factor de Seguridad	Alerta	Condición
0	1.53	Verde	Estable
2	1.50	Verde	Estable
4	1.47	Amarilla	Moderada
6	1.44	Amarilla	Moderada
10	1.40	Amarilla	Moderada

252

253

Figura 3 Resultados para la evaluación de variación nivel freático



254

255

2.3 DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE RESPUESTA

256

257

258

259

Los valores de umbral deben establecerse para cada instrumento y deben revisarse periódicamente durante la construcción, y de nuevo antes del inicio de las operaciones, y luego regularmente (por ejemplo, como parte de las revisiones anuales) durante las operaciones. Los umbrales iniciales de este análisis son presentados en la Tabla 8. Estos niveles de seguridad pueden clasificarse en niveles, conforme a los siguientes criterios:

- Nivel verde: Corresponde al comportamiento esperado de la estructura, establecido durante la elaboración del plan de auscultación o derivado del historial de lecturas, sustentado en los criterios definidos en el proyecto.
- Nivel amarillo: Representa un comportamiento estructural ligeramente fuera de los rangos esperados y establecidos previamente en el plan de auscultación.
- Nivel naranja: Indica una desviación del comportamiento esperado, con resultados que se apartan del patrón definido para la seguridad de la estructura. Esta condición requiere especial atención y un monitoreo continuo. En caso de que las lecturas evidencien una tendencia sostenida de cambio, podrán adoptarse medidas correctivas de seguridad.
- Nivel rojo: Corresponde a una evolución del nivel de atención, en la cual los resultados no satisfactorios muestran una tendencia continua de agravamiento. En esta etapa, es indispensable implementar acciones o intervenciones destinadas a mitigar o corregir los efectos observados, requiriéndose medidas correctivas de seguridad de forma inmediata.

Se han establecido límites de umbrales amarillo, naranja y rojo basándose en los resultados obtenidos empleando el software Geostudio en su extensión W/Slope, sin embargo, en la práctica estos valores deberán ser contrastados con información registrada en piezómetros existentes para la instrumentación instalada.

Tabla 8 Valores de umbral propuestos

Tipo de instrumento	Tipo de umbral	Nivel verde	Nivel amarillo	Nivel naranja	Nivel rojo
Piezómetros	Elevación del nivel freático	Registros menores al nivel de alerta amarillo	D/S Piezómetros en cimentación y relleno de presa: El nivel del agua está por encima de 2m de la interfase relleno/cimentación	D/S Piezómetros en cimentación y relleno de presa: El nivel del agua está por encima de 8m de la interfase relleno/cimentación	D/S Piezómetros en cimentación y relleno de presa: El nivel del agua está por encima de 12m de la interfase relleno/cimentación
	Exceso de presión de poros	Registros menores al nivel de alerta amarillo	Piezómetros en cimentación: Bbar > 0.1 y no se observa ninguna tendencia a la disipación.	Piezómetros en cimentación: Bbar > 0.3 y no se observa ninguna tendencia a la disipación.	Piezómetros en cimentación: Bbar > 0.7 y no se observa ninguna tendencia a la disipación.

Nota: D/S: aguas abajo

4 Discusión

Lecciones de fallas históricas y aplicabilidad de la metodología

La metodología propuesta podría haber proporcionado señales tempranas en eventos como el colapso de la presa de Fundão (2015, Brasil), donde un nivel freático elevado y la acumulación de presiones de poros no disipadas tras múltiples recrecimientos fueron factores críticos (Bussière et al., 2017). En ese caso, la ausencia de umbrales basados en modelos de estabilidad dificultó la detección temprana de condiciones críticas.

De manera similar, en el incidente de la presa de relaves de Cadia (2018, Australia), se observó un aumento sostenido de presiones de poros en la cimentación sin una respuesta adecuada, a pesar de la presencia de instrumentación. La aplicación de umbrales como los propuestos aquí —por ejemplo, un umbral naranja para $B\text{-bar} > 0.7$ sin tendencia a la disipación— podría haber activado medidas correctivas antes del fallo.

La metodología es transferible a distintos tipos de presas (homogéneas, con núcleo, de escorias) y contextos geológicos (saprolito, suelos blandos, roca fracturada), siempre que se realice una calibración adecuada del modelo con datos locales. Su principal limitación radica en la necesidad de contar con parámetros geotécnicos confiables y un sistema de monitoreo bien distribuido.

5 Conclusiones

Esta investigación presenta una metodología estructurada para la definición de umbrales de respuesta en piezómetros de presas de relaves, basada en análisis de estabilidad mediante SLOPE/W. Los umbrales propuestos (verde, amarillo, naranja, rojo) están vinculados directamente al factor de seguridad, lo que aporta un fundamento técnico robusto frente a enfoques puramente empíricos.

La aplicación a una configuración hipotética demostró que incrementos en $B\text{-bar}$ y en el nivel freático reducen significativamente el FoS , permitiendo establecer límites operativos claros. Sin embargo, la metodología tiene

limitaciones: depende de la calidad de los parámetros geotécnicos, la calibración del modelo y la disponibilidad de datos instrumentales históricos. Se recomienda su validación con casos reales y su integración con análisis probabilísticos o sistemas de monitoreo en tiempo real. Futuras líneas de investigación incluyen la automatización del cálculo de umbrales mediante scripts en GeoStudio®, la incorporación de modelos de flujo transitorio (SEEP/W), y el desarrollo de interfaces para su uso en planes de emergencia.

Conflicto de Interés

Los autores no reportan conflictos de interés relacionados con esta investigación.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

En la preparación de este artículo, se utilizó la herramienta de inteligencia artificial generativa Qwen de manera limitada, exclusivamente como apoyo en la redacción preliminar y mejora gramatical de la sección teórica (introducción y estado del arte). El contenido generado fue posteriormente revisado, corregido y validado críticamente por los autores. La mayor parte del manuscrito, incluyendo el análisis, resultados y conclusiones, fue desarrollada íntegramente por los autores. Todos los autores han aprobado la versión final del documento.

Contribución de los Autores

Conceptualización, R.R. y J.G.; metodología, R.R. y J.G.; validación, R.R. y J.G.; análisis formal, R.R. y J.G.; investigación, R.R. y J.G.; recursos, R.R. y J.G.; curación de datos, R.R. y J.G.; redacción—preparación del borrador original, R.R. y J.G.; redacción—revisión y edición, J.A.; visualización, R.R. y J.G.; supervisión, R.R.; administración del proyecto, R.R.; adquisición de financiamiento, R.R. y J.G. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

Referencias

- J. D. Bray, N. B. Aughenbaugh, and G. D. Norris, “Shear strength of weathered rock for slope stability analyses,” in *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- Canadian Dam Association, *Dam Safety Guidelines*, Toronto, ON, Canada, 2013.
- J. T. Christian, C. C. Ladd, and G. B. Baecher, “Reliability applied to slope stability analyses,” *Géotechnique*, vol. 44, no. 3, pp. 467–484, 1994.
- F. D’Hollanda Barbosa, D. F. de Carvalho, and A. P. de Assis, “Geotechnical characterization of saprolite soils in tropical regions: A case study from Brazil,” *Engineering Geology*, vol. 246, pp. 227–240, 2018.
- J. M. Duncan, “Factors of safety and reliability in geotechnical engineering,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 126, no. 4, pp. 307–316, 2000.
- International Council on Mining and Metals, *Tailings Management – Good Practice Guide*, London, UK, 2021.
- Ministerio de Energía y Minas del Ecuador, “Anexo II: Norma Técnica de Seguridad para el Proyecto, Construcción y Puesta en Servicio de Presas y Embalses,” Quito, Ecuador, 2023.
- R. B. Peck, “Observation and instrumentation: Some elementary considerations,” in *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, Mexico, 1972, vol. 5, pp. 15–28.
- Y. Sun, L. Zhang, and Y. Wang, “Machine learning for real-time monitoring and early warning of dam safety,” *Computers and Geotechnics*, vol. 146, Art. no. 104714, 2022.
- J. Zhang, H. Huang, and C. H. Juang, “Probabilistic analysis of rainfall-induced landslides using the Monte Carlo method,” *Engineering Geology*, vol. 262, Art. no. 105319, 2020.