

Comparison of Bishop and Janbu Methods for Stability Assessment of Four Tailings Dams in Caravelí, Arequipa, Peru

Abigail María Arica Gutiérrez, Bach.¹, Mariela Hermelinda Huamani Huayhua, Bach.², Italo Treviño-Zevallos, Dr.³
^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú (UTP), Av. Tacna y Arica 160, Arequipa, Perú
U19304529@utp.edu.pe, U19301749@utp.edu.pe, itrevino@utp.edu.pe

Abstract– Tailings dam stability is a critical aspect of mining safety, as structural failures can cause severe environmental and socioeconomic impacts. This study compares the Bishop and Janbu methods for assessing the stability of four tailings dams in the province of Caravelí, Arequipa (Peru), using SLIDE software. The objective is to determine which of these methods provides more precise and reliable safety factors (FS) under different geotechnical and environmental conditions. To achieve this, site-specific data were collected, the dams were modeled, and both methods were applied under static and pseudo-static loading scenarios. The results reveal significant differences in the sensitivity of the calculated FS values. The Bishop method, which considers moment equilibrium, tends to be more conservative, yielding higher FS values. In contrast, the Janbu method, based on force equilibrium, is more flexible and better accounts for variations in soil properties. The choice of method should be based on site conditions and project requirements, considering soil saturation, seismic loads, and material heterogeneity. This comparative analysis enhances the design and management of tailings dams, optimizing structural safety and ensuring the sustainability of mining operations in Caravelí.

Keywords– Stability, dam, safety factor, design, modeling.

Comparación de los métodos de Bishop y Janbu para la evaluación de la estabilidad de cuatro presas de relaves en Caravelí, Arequipa, Perú

Abigail María Arica Gutiérrez, Bach.¹, Mariela Hermelinda Huamani Huayhua, Bach.², Italo Treviño-Zevallos, Dr.³

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú (UTP), Av. Tacna y Arica 160, Arequipa, Perú

U19304529@utp.edu.pe, U19301749@utp.edu.pe, itrevino@utp.edu.pe

Resumen— La estabilidad de presas de relaves es un aspecto crítico en la seguridad minera, ya que fallas estructurales pueden generar impactos ambientales y socioeconómicos severos. Este estudio compara los métodos de Bishop y Janbu en la evaluación de estabilidad de cuatro presas de relaves en la provincia de Caravelí, Arequipa (Perú), utilizando el software SLIDE. El objetivo es determinar cuál de estos métodos proporciona factores de seguridad (FS) más precisos y confiables bajo distintas condiciones geotécnicas y ambientales. Para ello, se recopilaron datos específicos de la región, se modelaron las presas y se aplicaron ambos métodos en escenarios de carga estática y pseudoestática. Los resultados muestran diferencias significativas en la sensibilidad de los FS calculados. Se observó que el método de Bishop, al considerar el equilibrio de momentos, tiende a ser más conservador, proporcionando FS más elevados. En contraste, el método de Janbu, basado en el equilibrio de fuerzas, es más flexible y responde mejor a variaciones en las propiedades del suelo. La elección del método debe basarse en las condiciones del sitio y requerimientos del proyecto, considerando saturación del suelo, cargas sísmicas y heterogeneidad del material. Este análisis comparativo mejora el diseño y gestión de presas de relaves, optimizando la seguridad estructural y garantizando la sostenibilidad de las operaciones mineras en Caravelí.

Palabras clave— Estabilidad, presa, factor de seguridad, diseño, modelado.

I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de las presas de relaves constituye un aspecto crítico para la seguridad minera, pues cualquier falla estructural puede desencadenar impactos ambientales y socioeconómicos de gran magnitud. Según [1], los colapsos en presas de relaves pueden deberse tanto a errores de ingeniería como a factores humanos, los cuales pueden evitarse mediante un diseño, construcción y monitoreo adecuados. Una de las principales causas de inestabilidad es el aumento de la presión de poros debido a un drenaje deficiente, lo que compromete la resistencia del suelo y puede desencadenar fallas progresivas. Asimismo, factores naturales como lluvias intensas, inundaciones y actividad sísmica pueden incrementar significativamente el riesgo de deslizamientos y licuefacción estática, afectando la seguridad estructural de estas presas [2].

Investigaciones previas han identificado mecanismos de falla en presas de relaves y han desarrollado metodologías cualitativas para evaluar su estabilidad [3]. Estos enfoques consideran atributos estructurales, condiciones geológicas y registros históricos de desempeño para calcular índices de

riesgo. Adicionalmente, diversos estudios han destacado la relevancia de la mecánica de suelos y rocas en la evaluación de la estabilidad de estas estructuras, subrayando la influencia de la actividad sísmica y la filtración de contaminantes en la integridad de las presas de relaves [4]–[6]. Profundizando en los procesos que comprometen la estabilidad, se ha demostrado que la licuefacción estática puede activarse por precipitaciones prolongadas o por el crecimiento acelerado de presas sin compactación adecuada [7]. Las pruebas en mesa de vibración, al reproducir distintos niveles de aceleración sísmica, permiten cuantificar la susceptibilidad de los depósitos y optimizar parámetros críticos como el grado de compactación y la cohesión interna del material [8]. Además, el comportamiento de los relaves no saturados controlado por la interacción aire-agua-sólido resulta decisivo bajo variaciones climáticas, lo que exige barreras que limiten la infiltración y un monitoreo continuo de la humedad y las presiones internas [9].

Para evaluar la estabilidad de taludes en presas de relaves, se han desarrollado diversos métodos de análisis, siendo los más utilizados el método de Bishop y el método de Janbu. El método de Bishop se basa en el análisis de equilibrio límite con superficies de falla circulares y permite calcular el factor de seguridad considerando las fuerzas normales y tangenciales en un posible deslizamiento [10]. Es ampliamente empleado en suelos homogéneos y bajo condiciones de carga estática debido a su simplicidad y precisión. En contraste, el método de Janbu incorpora una formulación más avanzada que tiene en cuenta la resistencia al corte efectivo y los efectos de las tensiones intersticiales, lo que lo hace más adecuado para terrenos con condiciones heterogéneas y presencia de filtraciones [11]. Estudios recientes han demostrado que este método ofrece una mejor representación de la estabilidad de taludes en terrenos con alta saturación de agua, una condición frecuente en presas de relaves [12].

En la provincia de Caravelí (Arequipa-Perú), la evaluación de la estabilidad de presas de relaves es de particular importancia debido a la intensa actividad minera y a su vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos y actividad sísmica. En este contexto, la selección del método de análisis más adecuado es fundamental para optimizar el diseño y monitoreo de estas estructuras, garantizando su seguridad y reduciendo el riesgo de colapso de taludes. Investigaciones recientes han destacado

la utilidad del software SLIDE en la modelación de estabilidad de taludes, permitiendo realizar simulaciones detalladas que optimizan la toma de decisiones en el diseño y mantenimiento de estas infraestructuras críticas [13].

A partir de estos antecedentes, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál de los dos métodos, Bishop o Janbu, es el más apropiado para evaluar la estabilidad de las presas de relaves en Caravelí, considerando el riesgo de colapso de taludes, a través de un análisis comparativo utilizando el software SLIDE?

El objetivo principal de esta investigación es realizar un análisis comparativo entre los métodos de Bishop y Janbu en la evaluación de la estabilidad de taludes en cuatro concesiones mineras en Caravelí. Este estudio busca determinar cuál de estos métodos proporciona una evaluación más precisa y efectiva en términos de seguridad estructural y mitigación del impacto ambiental. Asimismo, los resultados obtenidos contribuirán al desarrollo de estrategias de diseño y monitoreo que permitan optimizar la estabilidad de las presas de relaves, minimizando riesgos para las comunidades y ecosistemas circundantes.

II. METODOLOGÍA

Área de estudio

La provincia de Caravelí se encuentra ubicada en el sector occidental de la región Arequipa, Perú. Limita al norte con las provincias de La Unión, Condesuyos y Camaná, y al oeste con el océano Pacífico. Sus coordenadas geográficas son 15°46'22" S, 73°21'57" O. El presente estudio se llevó a cabo en los distritos de Chaparra, Acari, Chala y Bella Unión, abarcando cuatro concesiones mineras seleccionadas para el análisis de estabilidad de presas de relaves (Fig. 1). Estas concesiones incluyen Santa Bárbara S.A.C., Cuprica S.A., La Bonita y la Planta de Beneficio Belén, cada una con características geológicas, topográficas e hidrológicas distintas.

La zona de estudio presenta una topografía variada, compuesta por terrenos con estratificación cruzada, áreas semiplanas con ondulaciones de origen aluvial y coluvial, lomas y cerros intrusivos, así como terrazas aluviales de relieve casi plano. Destacan formaciones como el sector de Los Altos y el cerro tutelar Indio Viejo, junto con la presencia del río Caravelí, que influye significativamente en la estabilidad de los suelos y la dinámica de las presas de relaves [14]. Desde el punto de vista geológico, la región está conformada por una combinación de rocas ígneas intrusivas (dioritas, granodioritas, tonalitas), sedimentos relacionados a intrusivos (calcopirita, malaquita, crisocola) y depósitos de vetiformes con filones mineralógicos asociados a cuarzo lechoso. Estos materiales pueden afectar el comportamiento

geotécnico de las presas, especialmente en términos de estabilidad estructural y susceptibilidad a la erosión.

El área de estudio se encuentra en un rango altitudinal amplio, desde los 95 m.s.n.m. en la Planta de Beneficio Belén, hasta los 2,335 m.s.n.m. en las concesiones Santa Bárbara S.A.C. y La Bonita. Las temperaturas también varían significativamente, con valores máximos que oscilan entre 21.9°C y 32°C, y temperaturas mínimas de 5°C a 14.7°C, lo que puede influir en los procesos de erosión y compactación del suelo. Hidrológicamente, la zona de estudio está influenciada por diversas cuencas, como la cuenca del río Caravelí, la cuenca hidrográfica de HuanuHuanu y otras seis subcuencas que atraviesan la Planta de Beneficio Belén. Estas condiciones pueden afectar el régimen hídrico de las presas de relaves, incrementando la presión de poros y el riesgo de desestabilización en condiciones de saturación prolongada.

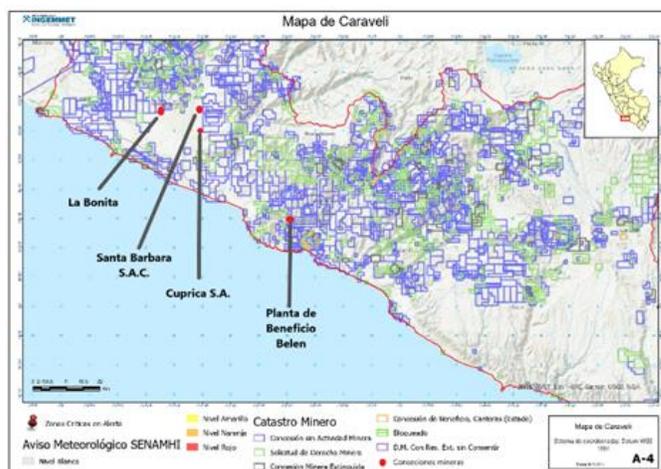


Fig. 1 Mapa de la provincia de Caravelí

Características Geotécnicas

El análisis geotécnico incluyó la evaluación de tres parámetros fundamentales que influyen en la estabilidad del talud: Densidad ($\gamma\gamma$) determina la relación entre la masa y el volumen del suelo, afectando su resistencia ante cargas externas; Cohesión (CC), representa la capacidad de las partículas del suelo para mantenerse unidas, contribuyendo a la resistencia al corte y Ángulo de fricción interna ($\phi\phi$) que indica la resistencia del material al deslizamiento sobre superficies de falla. Estos parámetros fueron determinados mediante revisión bibliográfica y estudios geotécnicos disponibles para los distintos materiales presentes en las concesiones mineras Santa Bárbara S.A., Cuprica S.A.C., La Bonita y Planta de Beneficio Belén, diferenciando entre fundación, relaves finos y relaves gruesos. La Tabla I resume las propiedades geotécnicas obtenidas.

Tabla I

Propiedades geotécnicas de los materiales de las concesiones de la provincia

de Caravelí

CONCESIONES	MATERIALES	CRITERIO	PROPIEDADES GEOTECNICAS DE LOS MATERIALES		
			Densidad (KN/m ³)	Cohesion (Kpa)	Phi (°)
SANTA BARBARA S.A.	FUNDACION		26.60	60.78	57.32
	RELAVE FINO		26.30	152.45	51.19
	RELAVE GRUESO A		26.50	165.80	52.15
	RELAVE GRUESO B		26.20	134.20	56.78
CURPICA S.A.C.	FUNDACION	Mohr	15.60	23.00	30.35
	RELAVE FINO		16.30	22.00	32.60
	RELAVE GRUESO A		20.00	20.00	31.20
	RELAVE GRUESO B		16.00	22.00	30.60
LA BONITA	FUNDACION	Coulomb	17.40	4.00	25.67
	RELAVE FINO		17.00	0.00	27.90
	RELAVE GRUESO A		15.00	1.00	25.40
	RELAVE GRUESO B		15.30	0.94	29.93
PLANTA DE BENEFICIO BELEN	FUNDACION		19.50	21.00	30.00
	RELAVE FINO		20.00	0.00	43.00
	RELAVE GRUESO A		15.00	24.00	0.00
	RELAVE GRUESO B		22.00	30.00	32.00

Evaluación de la Estabilidad del Talud

Para evaluar la estabilidad de los taludes en las presas de relaves en la provincia de Caravelí, se aplicaron los métodos de Bishop y Janbu, considerando los parámetros geotécnicos clave: densidad, cohesión y ángulo de fricción interna de los materiales presentes en las concesiones mineras. Ambos métodos fueron implementados en el software SLIDE, una herramienta computacional en 2D especializada en análisis geotécnico, la cual permite modelar la estabilidad de taludes y predecir posibles fallas estructurales [15].

El proceso de análisis en SLIDE incluyó la definición de la geometría del talud mediante la entrada de coordenadas X e Y, la asignación de propiedades geotécnicas como la densidad, cohesión y ángulo de fricción interna, y la selección del método de análisis, permitiendo visualizar la estabilidad del talud en función del factor de seguridad (FS). Los resultados fueron representados en una escala de 0 a 6+, con colores degradados para indicar la estabilidad de la estructura: valores menores a 1.5 fueron marcados en rojo y naranja, señalando zonas críticas, mientras que valores mayores a 1.5 aparecieron en amarillo y azul, indicando estabilidad estructural aceptable.

III. RESULTADOS

El análisis de estabilidad del talud en las cuatro concesiones mineras de la provincia de Caravelí se llevó a cabo mediante los métodos de Bishop y Janbu, implementados en el software SLIDE. Los resultados obtenidos permitieron identificar diferencias significativas en la estabilidad de cada estructura, evaluando la distribución de fuerzas y su efecto en la seguridad de las presas de relaves. En esta sección, se presentan y analizan los factores de seguridad obtenidos para cada método, destacando sus implicancias en el diseño y mantenimiento de las estructuras mineras.

A. Evaluación de la Estabilidad del Talud mediante el Método de Bishop

En la Fig. 2, se presentan los resultados obtenidos mediante el método de Bishop, el cual considera una

superficie de falla circular para el análisis de estabilidad. Los valores de seguridad varían según la concesión minera:

- *Concesión Minera Santa Bárbara S.A.C.:* La estabilidad del talud es elevada, con un factor de seguridad de 3.035, reflejado en colores verde y azul, indicando condiciones estructurales seguras.
- *Concesión Minera Cúprica S.A.:* Se obtiene un FS de 1.162, mostrando color amarillo, lo que indica estabilidad aceptable. Sin embargo, en ciertas zonas, el FS disminuye, lo que sugiere la necesidad de monitoreo continuo.
- *Concesión Minera La Bonita:* El FS es 0.580, representado en color rojo, lo que indica una estabilidad marginal. A mayor profundidad, el color cambia a amarillo, sugiriendo la necesidad de intervención geotécnica para mejorar la seguridad del talud.
- *Planta de Beneficio Belén:* Se registra el menor FS, 0.372, reflejado en color rojo, indicando alta vulnerabilidad. La estabilidad se compromete aún más en cortes más profundos, requiriendo medidas correctivas inmediatas.

Estos resultados sugieren que el método de Bishop tiende a proporcionar factores de seguridad más elevados, siendo adecuado para evaluar condiciones de estabilidad en taludes homogéneos y en escenarios de carga estática.

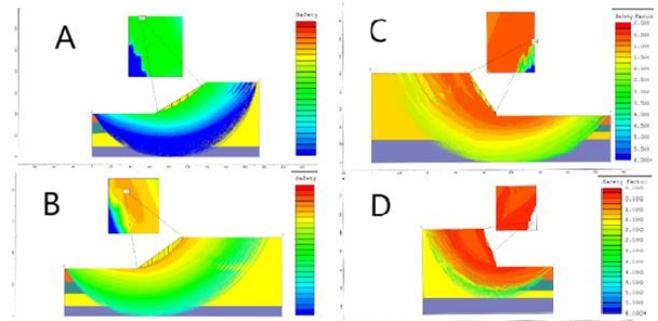


Fig. 2 Estabilidad por el método Bishop mediante el software Slide: A. Concesión Minera Santa Bárbara S.A.C.; B. Concesión Minera Cúprica S.A.; C. Concesión Minera La Bonita; D. Planta de Beneficio Belén.

B. Evaluación de la Estabilidad del Talud mediante el Método de Janbu

La Fig. 3 presenta los resultados obtenidos mediante el método de Janbu, el cual incorpora fuerzas horizontales en la evaluación de estabilidad. Según la Tabla II, se observa que los valores de FS obtenidos son ligeramente inferiores a los del método de Bishop, lo que indica que el enfoque de Janbu es más sensible a las condiciones de carga y deformación del talud.

- *Concesión Minera Santa Bárbara S.A.C.:* Registra un FS de 2.967, lo que sigue indicando una alta estabilidad. Aunq el valor es menor que el obtenido con Bishop, la

estructura sigue mostrando colores verdes y azules, lo que confirma su seguridad estructural.

- Concesión Minera Cúprica S.A.: Se obtiene un FS de 1.119, situándose ligeramente por debajo del umbral de estabilidad aceptable (1.5). La representación gráfica muestra zonas críticas en colores naranjas y verdes, lo que sugiere que ciertas áreas del talud pueden requerir medidas de refuerzo o drenaje.
- *Concesión Minera La Bonita*: Con un FS de 0.558, el análisis refleja una estabilidad marginal, con predominancia de color rojo en la representación gráfica. Aunque el talud no presenta fallas inmediatas, se encuentra en el límite de seguridad, lo que sugiere la necesidad de revisión del diseño estructural.
- *Planta de Beneficio Belén*: Presenta el FS más bajo (0.291), indicando condiciones críticas de estabilidad. Se observa un predominio de color rojo, confirmando que el talud está en riesgo de falla si no se implementan medidas de reforzamiento estructural.

la Planta de Beneficio Belén, los valores están por debajo de 0.4, lo que confirma la necesidad de acciones inmediatas para reforzar el talud y evitar fallas estructurales.

Tabla II
Factores de seguridad entre los métodos de BISHOP y JAMBU

CONCESIONES	FACTOR DE SEGURIDAD	
	MÉTODO BISHOP	MÉTODO JAMBU
SANTA BARBARA S.A.C.	3.035	2.967
CUPRICA S.A.	1.162	1.119
LA BONITA	0.580	0.558
BELEN	0.372	0.291

Estos resultados sugieren que el método de Bishop es más adecuado para condiciones de carga estática y suelos homogéneos, mientras que el método de Janbu es más apropiado para evaluaciones en terrenos con mayor variabilidad geotécnica, donde la estabilidad puede estar comprometida por fuerzas horizontales o configuraciones geométricas más complejas.

A. Implicaciones para el Diseño y Construcción de Presas de Relaves

Los resultados obtenidos en este estudio resaltan la importancia de seleccionar el método de análisis más adecuado según las características geotécnicas del terreno. En concesiones con alta estabilidad como Santa Bárbara S.A.C., el método de Bishop ofrece una evaluación suficiente para garantizar la seguridad del talud. Sin embargo, en concesiones con menor estabilidad, como La Bonita y Belén, el método de Janbu proporciona una evaluación más conservadora y realista de la estabilidad estructural.

Con base en estos hallazgos, se recomienda implementar medidas de reforzamiento estructural, tales como muros de contención, drenajes superficiales y compactación adicional del material de relleno, en las concesiones que presentan factores de seguridad inferiores a 1.5. Además, se sugiere realizar monitoreo geotécnico continuo para evaluar la evolución de la estabilidad de los taludes y prevenir fallas catastróficas en el futuro.

IV. DISCUSIÓN

La estabilidad de los taludes en presas de relaves es un aspecto crucial en la ingeniería geotécnica, ya que su falla puede generar impactos ambientales y sociales significativos. En este estudio, se aplicaron los métodos de Bishop y Janbu para evaluar la estabilidad de taludes en cuatro concesiones mineras de la provincia de Caravelí, utilizando el software SLIDE y siguiendo la normativa peruana que establece un factor de seguridad (FS) mínimo de 1.5 para condiciones de drenaje a largo plazo y entre 1.0 y 1.2 para condiciones post sísmicas.

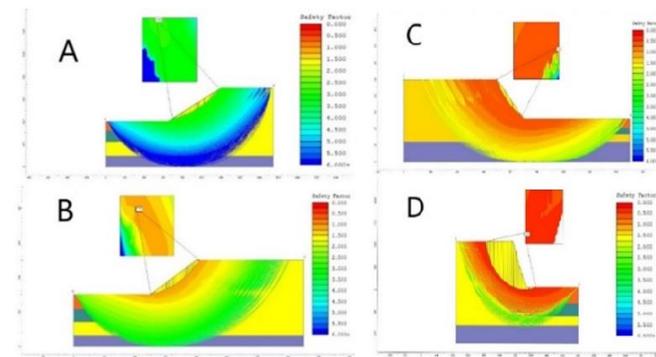


Fig. 3 Estabilidad del talud por el método Janbu mediante el software Slide: A. Concesión Minera Santa Bárbara S.A.C.; B. Concesión Minera Cúprica S.A.; C. Concesión Minera La Bonita; D. Planta de Beneficio Belén.

Los resultados obtenidos con el método de Janbu reflejan que este modelo tiende a ofrecer factores de seguridad más bajos, debido a su mayor sensibilidad a las fuerzas horizontales y condiciones de carga. Esto lo hace más adecuado para el análisis de taludes con geometrías irregulares o terrenos heterogéneos.

C. Comparación entre los Métodos de Bishop y Janbu

Al comparar ambos métodos, se observa que el método de Bishop tiende a proporcionar factores de seguridad ligeramente más altos que el método de Janbu en todas las concesiones mineras evaluadas. Esto se debe a que Bishop se basa en el equilibrio de momentos, mientras que Janbu considera el equilibrio de fuerzas horizontales, lo que puede reflejar condiciones más críticas de estabilidad.

Los valores de la Tabla II también muestran que en concesiones como Santa Bárbara S.A.C., ambos métodos proporcionan factores de seguridad por encima de 2.9, lo que indica altos niveles de estabilidad estructural. En contraste, en

El método de Bishop ha sido ampliamente utilizado para calcular el FS debido a su capacidad para analizar fuerzas actuantes, ofreciendo un enfoque simplificado pero eficaz. Estudios previos [16][17] resaltan la utilidad de este método para análisis preliminares, ya que proporciona una estimación razonable del FS en suelos homogéneos. Sin embargo, también se han señalado sus limitaciones en suelos heterogéneos y en superficies de falla no circulares, donde su precisión puede verse afectada. En este sentido, [18] es necesario utilizar métodos más detallados para estudios críticos, recomendando el método de Janbu para terrenos más complejos.

El método de Janbu, a diferencia del de Bishop, descarta las fuerzas cortantes y se apoya únicamente en el equilibrio de fuerzas horizontales. Diversos autores subrayan su pertinencia cuando dichas fuerzas dominan la estabilidad del talud [18]. La incorporación de software especializado, como SLIDE, perfecciona el análisis al brindar una visualización gráfica de los resultados; la representación en escalas de colores facilita la detección de zonas críticas y respalda la toma de decisiones en el diseño y monitoreo de presas de relaves [19]. No obstante, algunos estudios advierten que este enfoque puede resultar incompleto en determinados escenarios, por lo que recomiendan reforzarlo con metodologías complementarias [20]. Esta cautela cobra especial importancia en regiones con elevada sismicidad, donde se aconseja integrar criterios más conservadores para garantizar la estabilidad de los taludes [21]. Esto coincide con los hallazgos de este estudio, donde las representaciones gráficas permitieron identificar zonas críticas en las concesiones mineras de La Bonita y Belén, donde los valores de FS se encuentran por debajo del umbral de seguridad aceptable.

Por otro lado, [22] realizó un análisis de estabilidad de taludes utilizando distintos métodos y encontró que los valores de FS varían dependiendo del enfoque empleado. En su estudio, el método Spencer ofreció valores óptimos en taludes homogéneos, mientras que el método de Janbu simplificado reportó los valores más bajos. Esto concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo, donde el método de Janbu presentó valores de FS menores en comparación con Bishop, reflejando un análisis más conservador de la estabilidad.

En una comparación más amplia, [23] evaluaron diferentes enfoques para calcular el FS y concluyeron que el método de reducción de resistencia por elementos finitos (SRFEM) supera a los enfoques tradicionales de equilibrio límite. Sus hallazgos indicaron que, aunque los métodos convencionales como Bishop y Janbu proporcionan resultados razonables, el uso de modelos numéricos más avanzados puede mejorar la precisión en la identificación de superficies de deslizamiento y zonas de deformación plástica. En este contexto, el criterio 3 empleado en su estudio mostró valores de FS más cercanos a los obtenidos mediante métodos de

equilibrio límite, recomendándose su aplicación para estudios de estabilidad estática en presas de relaves.

En síntesis, ambos métodos tienen fortalezas y limitaciones. Mientras que Bishop es adecuado para suelos homogéneos y análisis preliminares, Janbu proporciona una evaluación más detallada en terrenos con condiciones geotécnicas más complejas. La integración de ambos enfoques, complementados con herramientas avanzadas como SLIDE, permite obtener una evaluación más precisa y completa de la estabilidad de taludes en presas de relaves, lo que resulta esencial para garantizar la seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras a largo plazo.

V. CONCLUSIONES

El análisis comparativo entre los métodos de Bishop y Janbu para evaluar la estabilidad de presas de relaves en cuatro concesiones de la provincia de Caravelí, utilizando el software SLIDE, permitió identificar diferencias clave en la determinación del factor de seguridad (FS). Los resultados obtenidos indican que el método de Janbu proporciona una evaluación más precisa y realista de la estabilidad estructural en diversas condiciones geotécnicas. Su capacidad para considerar fuerzas horizontales lo hace más sensible a escenarios complejos, permitiendo una identificación más ajustada de zonas críticas que podrían comprometer la integridad de la estructura. En contraste, el método de Bishop, aunque ampliamente utilizado y robusto, mostró una tendencia a sobreestimar la estabilidad en ciertos casos, al asumir superficies de falla circulares y no considerar fuerzas horizontales. Si bien este enfoque es útil para análisis preliminares y suelos homogéneos, puede no reflejar con precisión la realidad operativa de presas de relaves en terrenos con mayor heterogeneidad. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para la gestión de presas de relaves en la región. Se recomienda la adopción del método de Janbu como estándar para las evaluaciones de estabilidad, especialmente en suelos con variabilidad geotécnica. Su implementación debe complementarse con herramientas computacionales como SLIDE, que permiten una modelación integral y detallada de los factores que influyen en la estabilidad de los taludes.

Asimismo, se enfatiza la importancia de establecer programas de monitoreo continuo, basados en los resultados del método de Janbu, con el objetivo de detectar de manera temprana cualquier signo de inestabilidad y tomar medidas preventivas oportunas. La realización de reevaluaciones periódicas contribuirá a mantener la seguridad operativa de las presas de relaves, protegiendo tanto el medio ambiente como a las comunidades cercanas. Finalmente, este estudio subraya la necesidad de utilizar métodos de análisis que reflejen con mayor precisión las condiciones reales de las presas de relaves, incluyendo la validación de los resultados mediante ensayos *in situ* (sondeos SPT / CPT y piezometría), con

extensión del análisis a modelos numéricos avanzados (SRFEM y MPM) y aplicar el protocolo comparativo a presas de relaves en otras cuencas alto-andinas con variabilidad litológica y sísmica. La combinación de metodologías avanzadas y software especializado fortalece la toma de decisiones en el diseño, operación y mantenimiento de estas infraestructuras críticas, minimizando riesgos y garantizando su estabilidad a largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] M.-S. Kim, E. Chae, H.-G. Min, and J.-G. Kim, "Applicability of Brassica juncea as a bioindicator for As contamination in soil near the abandoned mine area," *J Environ Manage*, vol. 358, p. 120805, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120805>.
- [2] J. Menéndez and S. Muñoz, "Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros," *Paideia XXI*, vol. 11, no. 1, pp. 141–154, Feb. 2021, doi: 10.31381/paideia.v11i1.3622.
- [3] G. Hancock and T. Coulthard, "Tailings dams: Assessing the long-term erosional stability of valley fill designs," *Science of The Total Environment*, vol. 849, p. 157692, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157692>.
- [4] R. Burden and G. W. Wilson, "Commingling of Waste Rock and Tailings to Improve 'Dry Stack' Performance: Design and Evaluation of Mixtures," *Minerals*, vol. 13, no. 2, 2023, doi: 10.3390/min13020295.
- [5] X. Huang, X. Cai, P. Yang, X. Zheng, S. Zhang, and J. Bo, "Study on the dynamic pore water pressure model of centerline tailings sand based on dynamic triaxial tests," *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, vol. 9, no. 1, 2023, doi: 10.1007/s40948-023-00619-y.
- [6] C. D. Navarro et al., "Quantifying the potential seepage from porphyry copper tailing impoundments using a multi-isotopic approach," *Science of the Total Environment*, vol. 890, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164446.
- [7] J. Guo, "Exploring the effect of stress-strain behavior of cemented tailings backfill on the stability of inclined sill mat: A numerical study," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 72, pp. 295–305, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.03.048.
- [8] L. L. Guo, Z. M. Xu, and W. L. Liu, "Shaking Table Test Studies of the Tailings Under Earthquake," *Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology*, vol. 42, no. 9, pp. 89–96, 2020, doi: 10.3963/j.issn.1671-4431.2020.09.012.
- [9] G. Bella and G. Musso, "Hydro-Mechanical Behaviour and Critical State Conditions of Unsaturated Silty Tailings," in *World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*, 2023. doi: 10.11159/icgre23.114.
- [10] A. W. Bishop, "The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes," *Géotechnique*, vol. 5, no. 1, pp. 7-17, 1955.
- [11] N. Janbu, "Slope stability computations," in *Embankment-Dam Engineering*, R. C. Hirschfeld and S. J. Poulos, Eds. New York: John Wiley & Sons, 1973, pp. 47-86.
- [12] D. G. Fredlund and J. Krahn, "Comparison of slope stability methods of analysis," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 429-439, 1977.
- [13] GEO-SLOPE International Ltd., "Stability Modeling with SLOPE/W 2007," Calgary, Alberta, Canada, 2008.
- [14] E. Arcos, C. Loaiza, and F. Calderón, "Dirección de Recursos Minerales y Energéticos Equipo de Investigación: Actividad minera artesanal en la región Arequipa INGEMMET, Boletín Serie E: Minería N° 17," 2022.
- [15] Rocscience, "Manual Slide Uso Interno Tutorial de Arranque Rápido."
- [16] J. M. Duncan, "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes."
- [17] S. G. Wright, M. J. Duncan, and T. L. Brandon, "Soil Strength and Slope Stability."
- [18] S. G. Vick, *Planning, design, and analysis of tailings dams*. BiTech, 1990.
- [19] D. G. Fredlund, H. Rahardjo, and M. D. Fredlund, *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2012. [Online]. Available: www.wiley.com/go/permissions.
- [20] W. T. Lambe and R. V. Whitman, "Mecánica de Suelos."
- [21] J. Woodward, "An Introduction to Geotechnical Processes."
- [22] M. I. Khan and S. Wang, "Comparing the various slope stability methods to find the optimum method for calculating factor of slope safety," *Materials and Corrosion Engineering Management*, vol. 1, no. 1, pp. 06–09, Jun. 2020, doi: 10.26480/macem.01.2020.06.09.
- [23] M. Li, L. Liang, and X. Li, "Comparison analysis among different calculation methods for the static stability evaluation of tailing dam." [Online]. Available: www.proceedings.blucher.com.br/evento/10wccm