

Estabilidad de una presa de jales en etapa de cierre considerando diferentes criterios de evaluación

Stability of a tailings dam in the closure stage considering different evaluation criteria

Romy VALDIVIA¹, Denys PARRA² y Benjamín DELGADO¹

¹ Anddes, México

² Anddes, Perú

INFORMACIÓN

Palabras clave:

- Jál
- Estabilidad
- Licuación
- CDA
- GISTM

RESUMEN

Las instalaciones de almacenamiento de jales deben garantizar su desempeño seguro durante la etapa de cierre, que es cuando cesa la supervisión y el monitoreo del desempeño, en estas condiciones los efectos de largo plazo se vuelven predominantes. Este trabajo presenta la evaluación de estabilidad de un depósito de jales ubicado en el norte del estado de Chihuahua, México, desarrollada a partir de un programa integral de investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio, orientado a caracterizar los materiales del depósito y la cimentación. Con base en el modelo geotécnico definido, se realizaron análisis de estabilidad estática, pseudoestática y post licuación, aplicando los criterios establecidos por la *Canadian Dam Association* (CDA, 2019) y el *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM, 2020), los cuales difieren en la demanda sísmica para depósitos de jales en la etapa de cierre, siendo los criterios del GISTM más rigurosos e independientes del nivel de consecuencia. Los análisis estáticos y pseudoestáticos mostraron factores de seguridad por encima de los mínimos exigidos para ambos criterios. La evaluación de licuación con los criterios del GISTM indicaron la ocurrencia de licuación de los jales saturados, mientras que la licuación no se presenta cuando se utilizan los criterios de la CDA. La evaluación post licuación mostró factores por debajo de los mínimos recomendados, evidenciando condiciones potencialmente inestables según los criterios más conservadores del GISTM, requiriendo medidas de estabilización. No obstante, bajo los lineamientos basados en consecuencias de la CDA, el depósito presenta estabilidad aceptable en condiciones de cierre. Los resultados destacan la importancia de seleccionar criterios coherentes con el contexto y el nivel de consecuencias del sitio.

ABSTRACT

Tailings storage facilities (TSF) must ensure their safe performance during the closure phase, when performance monitoring and supervision cease; under these conditions, long-term effects become predominant. This paper presents the stability assessment of a TSF located in northern Chihuahua, Mexico, developed from a comprehensive program of geotechnical field and laboratory investigations aimed at characterizing the materials of the tailings and the foundation soils. Based on the defined geotechnical model, static, pseudo-static, and post-liquefaction stability analyses were performed, applying the criteria established by the Canadian Dam Association (CDA, 2019) and the Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM, 2020). These standards differ in their assessment of seismic demands for TSF during closure, with the GISTM criteria being more rigorous and independent of the consequence level. The static and pseudo-static analyses showed safety factors above the minimum requirements for both criteria. The liquefaction assessment using GISTM criteria indicated the occurrence of liquefaction of the saturated tailings, while liquefaction was not observed when using CDA criteria. The post-liquefaction assessment showed factors below the recommended minimums, indicating potentially unstable conditions according to the more conservative GISTM criteria, requiring stabilization measures. However, under the CDA's consequences-based guidelines, the tailings deposit exhibits acceptable stability under closure conditions. These results highlight the importance of selecting criteria consistent with the site context and consequences level.

1 INTRODUCCIÓN

La estabilidad de presas de jales en etapa de cierre constituye un aspecto crítico para la gestión segura de este tipo de instalaciones, debido a que en esta etapa cesan las actividades operativas y se reducen significativamente o se eliminan la supervisión y el monitoreo del desempeño. Durante el cierre, es decir, una etapa de largo plazo, las condiciones geotécnicas del depósito de jales pueden cambiar, por lo que se requiere de una evaluación rigurosa de la estabilidad física, en particular cuando existen zonas de jales saturados con potencial de experimentar pérdida de resistencia bajo cargas sísmicas en el largo plazo.

El depósito de jales analizado en este estudio se ubica en una región remota al norte del estado de Chihuahua, México. Con el objetivo de caracterizar adecuadamente los materiales del depósito y de la cimentación, se llevó a cabo un programa integral de investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio. Con base en los resultados obtenidos, se elaboró un modelo geotécnico representativo para la evaluación de la estabilidad en condiciones estáticas, pseudoestáticas y post licuación.

El análisis se realizó aplicando de manera comparativa los criterios establecidos por la *Canadian Dam Association* (CDA, 2019) y el *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM, 2020) para condiciones de cierre. Mientras que el GISTM propone criterios más rigurosos orientados a garantizar un comportamiento robusto considerando la elección del sismo de diseño para un periodo de retorno de 10,000 años, que correspondería a una consecuencia extrema, la CDA basa su enfoque sugiriendo una demanda sísmica en función de las consecuencias de una potencial falla del depósito de jales y no necesariamente de una consecuencia extrema. Esta diferencia puede conducir a resultados muy diferentes respecto al desempeño esperado de la presa en condiciones de cierre.

El presente artículo expone los resultados obtenidos para el depósito estudiado, analiza la influencia del criterio seleccionado sobre las conclusiones de estabilidad y discute la pertinencia de cada enfoque en el contexto particular de un sitio de baja exposición y remota ubicación.

2 METODOLOGÍA

2.1 Investigaciones geotécnicas de campo y laboratorio

El programa de exploración geotécnica incluyó 6 perforaciones diamantinas con recuperación de muestras alteradas e inalteradas, alcanzando profundidades entre 12 y 18 m en sectores representativos del depósito. En cada perforación se realizaron ensayos SPT, con el fin de caracterizar la

densidad relativa y la consistencia de los jales y materiales de cimentación. Además, se ejecutaron 4 sondeos CPTu, que permitieron obtener perfiles continuos de resistencia por punta (q_c), fricción lateral (f_s) y presión de poros (u), facilitando la identificación de zonas saturada y potencialmente licuables. Se excavaron 5 pozos a cielo abierto en el sector superficial del depósito para observar la estratigrafía, condiciones de humedad *in situ* y obtención de muestras.

Las muestras recuperadas fueron sometidas a ensayos de laboratorio que incluyeron: humedad natural, peso volumétrico seco y húmedo, granulometría, límites de Atterberg, corte directo y ensayos triaxiales CD y CU con medición de presión de poros. Este conjunto de ensayos permitió definir los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos efectivos (c' , ϕ') y las relaciones de resistencia no drenada en los jales saturados y parcialmente saturados.

Los ensayos de disipación realizados como parte de los sondeos CPT y los resultados de la saturación obtenidos a partir de ensayos de laboratorio realizados en muestras de las barrenaciones, permitieron detectar un nivel piezométrico (asumiendo un grado de saturación $S \geq 80\%$) aún existente en algunas zonas en el interior del depósito de jales debido a que estos materiales retienen humedad a largo plazo. Este nivel piezométrico se ubica principalmente en la base del depósito entre 5 a 6 m por encima de la cimentación, si bien en algunos sectores se ha detectado altos niveles piezométricos cerca del centro del depósito que, sin embargo, no afectan la estabilidad, la cual está controlada principalmente por las condiciones de los jales cerca del talud.

2.2 Modelo geotécnico

Con la información generada se construyó un modelo geotécnico del depósito, incorporando lo siguiente:

- Estratigrafía predominante y la variación lateral de espesores. En la Figura 1 se muestra el modelo geotécnico de la sección principal del depósito de jales.
- Posición de las superficies piezométricas en diferentes zonas del depósito.
- Distribución de jales saturados y parcialmente saturados por debajo del nivel piezométrico y no saturados por encima de dicho nivel.
- Parámetros de resistencia cortante.

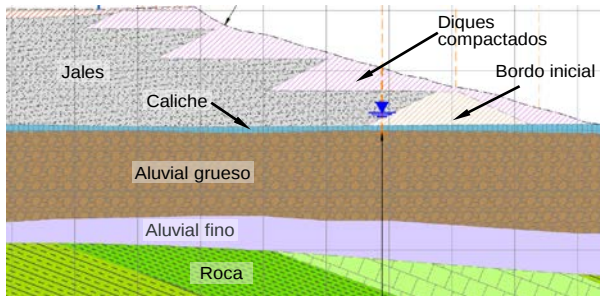


Figura 1. Modelo geotécnico de la sección principal del depósito de jales.

2.3 Demanda y coeficiente sísmicos

De acuerdo con el análisis de rotura llevado a cabo, la clasificación del depósito de jales resulta en “Significativa”, por lo tanto, de acuerdo con la CDA (2019) en condiciones de cierre le corresponde un sismo con un periodo de retorno de 2475 años, mientras que de acuerdo con el GISTM (2020) el periodo de retorno corresponde a 10,000 años.

El coeficiente sísmico para el análisis pseudoestático fue estimado a partir del criterio del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (USACE) (Hynes y Franklin, 1984), que sugiere el uso de un k_s igual al 50% de la aceleración pico del terreno (PGA), resultando en un $k_s=0.152$ (GISTM) y $k_s=0.086$ (CDA). Si bien la práctica moderna recomienda la estimación del coeficiente sísmico a partir de un desplazamiento admisible del depósito (criterio de desempeño), se utilizó la recomendación del USACE debido a que, a pesar de ser muy conservadora, la zona es de muy baja sismicidad, aceptándose un criterio como el utilizado.

2.4 Evaluación del potencial de licuación

El potencial de licuación de los jales por debajo del nivel piezométrico se evaluó empleando los criterios de Boulanger & Idriss (2014) y Robertson (2016), con base en los resultados de CPTu y SPT obtenidos en campo. Se estimó la relación de resistencia cíclica (CRR) y se compararon con la demanda sísmica (CSR) sobre la base de lo propuesto por Seed e Idriss (1971) para identificar zonas susceptibles a pérdida significativa de resistencia bajo cargas sísmicas de largo plazo. Las aceleraciones en la superficie requeridas en el cálculo del CSR, fueron asumidas iguales al PGA del espectro de peligro uniforme para suelo tipo C, tanto para el caso de 2475 años, como para 10,000 años, es decir, criterios de la CDA y del GISTM, respectivamente.

En general, de acuerdo con los resultados de los análisis realizados, se concluye que para las condiciones que representan la demanda sísmica estimada según el GISTM (2020), los jales saturados presentarán licuación por debajo del nivel piezométrico, sin embargo, cuando se utilizan los

criterios de la CDA (2019) se observa la no ocurrencia de licuación de los jales saturados, tal como se ilustra en el ejemplo de evaluación mostrado en la Figura 2.

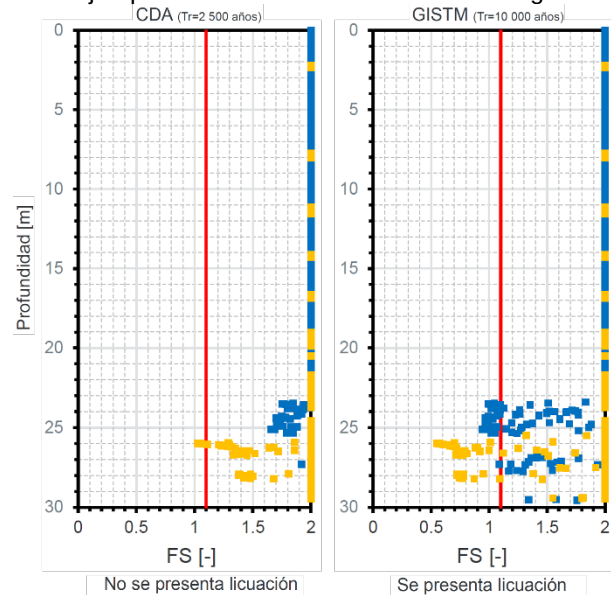


Figura 2. Evaluación de licuación en un sondaje CPT.

2.5 Resistencia residual de los jales saturados

Para estimar la resistencia residual no drenada de los jales saturados posterior a un evento de licuación, se utilizaron las correlaciones propuestas por Olson y Stark (2002), Robertson (2022), Idriss y Boulanger (2015) y, como se muestra en la Figura 3, en base a los resultados del CPT, resultando en una relación de resistencia residual de $s_{ur}/\sigma'_v=0.06$, la cual se obtuvo a partir del promedio del percentil 30 (P.30) de todos los valores obtenidos de las correlaciones utilizadas.

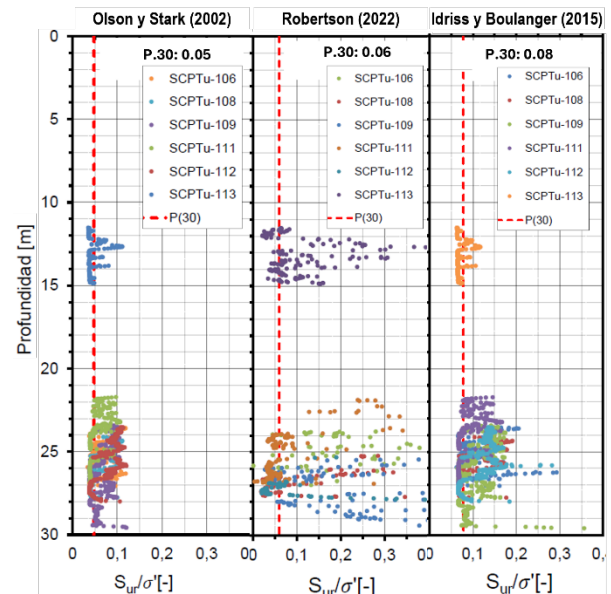


Figura 3. Estimación de la resistencia residual no drenada de los jales.

2.6 Análisis de estabilidad

Los análisis de estabilidad se realizaron mediante el método de equilibrio límite aplicando el procedimiento de Spencer (1967), con superficies de falla circulares y no circulares según la estratigrafía y geometría del depósito. En Figura 4 se presentan las secciones de estabilidad analizadas, las que fueron seleccionadas considerando geometría, espesor de jales, variabilidad estratigráfica y superficies piezométricas, a fin de analizar los escenarios críticos de estabilidad. Se analizaron las siguientes condiciones: estática, pseudoestática y post licuación, utilizando los parámetros de resistencia cortante correspondientes a cada condición, tomando en cuenta lo siguiente.

- Para los análisis estáticos de los jales no saturados del depósito, se utilizaron parámetros drenados, mientras que para los análisis pseudoestáticos se redujo esta resistencia en 20% (jal degradado), de acuerdo con las recomendaciones de varios autores resumido por Duncan et al. (2014).
- En el caso de los jales saturados por debajo del nivel piezométrico, los análisis estáticos fueron realizados con parámetros drenados y los pseudoestáticos con resistencia no drenada pico.
- Para el análisis post licuación se utilizó la resistencia residual no drenada de los jales por debajo del nivel piezométrico.

En la Tabla 1 se presenta el resumen de los parámetros de resistencia cortante utilizados en el presente trabajo.

2.7 Criterios de evaluación

Los factores de seguridad obtenidos fueron comparados con los requerimientos establecidos por guías internacionales como la CDA (2019) y las mejores prácticas de la industria, las cuales establecen 1.5 para el análisis estático a largo plazo, 1.0 en condiciones pseudoestáticas y 1.2 para el análisis post licuación.

Tabla 1. Resumen de parámetros - modelo geotécnico

Material	γ_{total} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	S_{up}/σ'_v	S_{ur}/σ'_v
Bordo inicial	20	21	5	36	-	-
Jal	17	18	5	32	-	0.06
Jal degradado	17	18	5	26	0.25	-
Cobertura	20	21	5	35	-	-
Aluvial grueso	20	21	5	36	-	-
Aluvial fino	18	19	10	32	-	-
Caliche	20	21	10	35	-	-
Suelo residual	20	21	10	36	-	-
Roca	25	26	100	45	-	-

γ_{total} : peso específico total del suelo, γ_{sat} : peso específico saturado del suelo, c' : cohesión, ϕ' : ángulo de fricción interna, S_{up}/σ'_v : relación de resistencia no drenada pico, S_{ur}/σ'_v : relación de resistencia no drenada residual



Figura 4. Vista en planta de las secciones de estabilidad analizadas del depósito de jales.

3 RESULTADOS

Con base en el modelo geotécnico y las condiciones descritas en la sección anterior, se realizaron los análisis de estabilidad del depósito de jales en las secciones representativas seleccionadas. Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas para las condiciones estática, pseudoestática y post licuación.

Tabla 2. Resultados del análisis de estabilidad en condición estática, pseudoestática y post licuación

Sección	Tipo de falla	FS _{estático}	FS _{pseudoestático}		FS _{post licuación}
			CDA Ks=0.086	GISTM Ks=0.152	$S_{ur}/\sigma'_v=0.06$
1-1'	Global	1.96	1.24	1.04	0.91
2-2'	Global	2.10	1.30	1.09	1.07
3-3'	Global	2.77	1.83	1.53	2.21
4-4'	Global	1.67	1.34	1.16	1.68
5-5'	Global	2.04	1.32	1.00	1.00
6-6'	Global	2.33	1.94	1.58	NA

3.1 Estabilidad estática

Los análisis estáticos realizados mostraron factores de seguridad globales comprendidos entre 1.67 y 2.77, dependiendo de la geometría y de la presencia de jales saturados en las zonas inferiores del depósito. En todos los casos, los factores de seguridad cumplieron con los requisitos mínimos indicados anteriormente ($FS \geq 1.5$). Estos resultados indican un comportamiento global estable en ausencia de cargas sísmicas y una adecuada resistencia efectiva de los materiales del depósito y de la cimentación. La Figura 5 muestra un resultado típico de análisis estático.

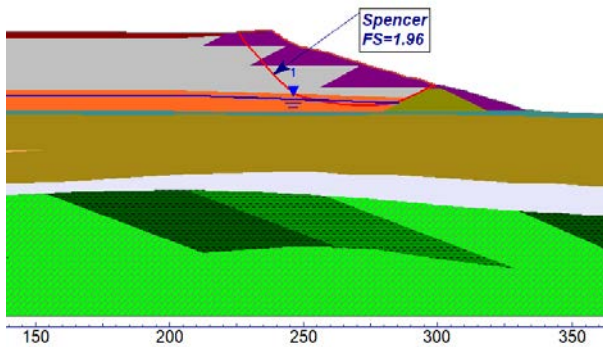


Figura 5. Sección 1-1' - análisis estático - FS=1.96.

3.2 Estabilidad pseudoestática

La estabilidad pseudoestática fue analizada considerando que por alguna razón los jales saturados del depósito no presentarán licuación durante el sismo de diseño, aún para la demanda que representa los criterios del GISTM. Utilizando coeficientes sísmicos horizontales $k_s=0.086$ (CDA) y 0.152 (GISTM), los factores de seguridad pseudoestáticos mínimos obtenidos fueron de 1.24 y 1.0, respectivamente. En estas condiciones, todas las secciones evaluadas cumplen con el factor mínimo requerido, indicando un comportamiento estable ante las solicitaciones sísmicas indicadas anteriormente. La Figura 6 muestra un resultado típico de análisis pseudoestático.

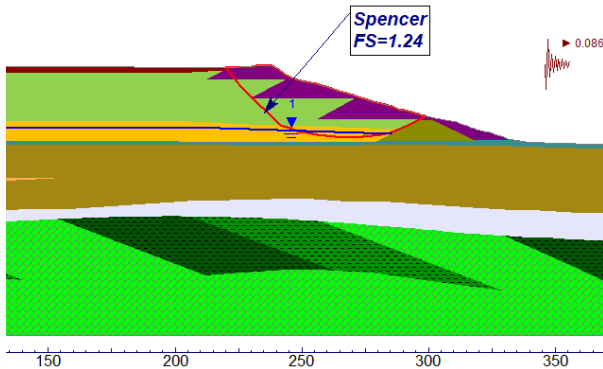


Figura 6. Sección 1-1' - análisis pseudoestático - FS=1.24 ($k_s=0.086$).

3.3 Evaluación post licuación

El análisis post licuación fue realizado para los criterios del GISTM cuya demanda sísmica induce licuación en los jales saturados del depósito. El análisis fue realizado considerando una relación de resistencia residual $s_{ur}/\sigma'_v=0.06$, obteniéndose factores de seguridad menores que 1.2 en varias de las secciones analizadas, evidenciando condiciones potencialmente inestables para estas secciones. Por lo tanto, según los criterios del GISTM, los resultados obtenidos son críticos y sugieren la necesidad de medidas de estabilización, por ejemplo, mediante la

construcción de un contrafuerte en el talud aguas abajo, mientras que bajo los criterios de la CDA no se requiere de medidas adicionales de estabilización ya que no se presenta licuación para la demanda sísmica esperada según estos criterios. La Figura 7 muestra un resultado típico de análisis post licuación.

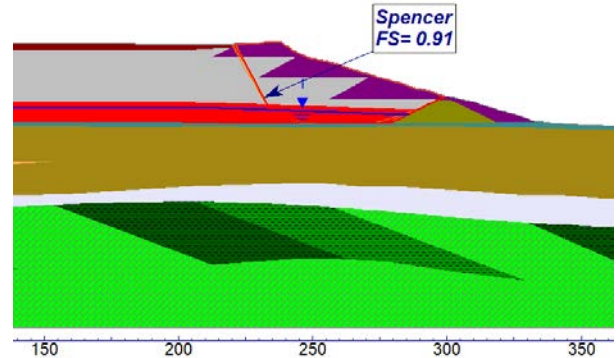


Figura 7. Sección 1-1' - análisis post licuación - FS=0.91.

4 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian diferencias significativas en la interpretación de los resultados de los análisis de estabilidad de un depósito de jales según el criterio de evaluación de la CDA y del GISTM. Cabe indicar que las condiciones de exposición y riesgo difieren significativamente con relación a los depósitos en operación. Mientras la CDA permite concluir que el depósito presenta un comportamiento estable en condiciones estáticas y pseudoestáticas, sin la ocurrencia de licuación de los jales saturados, los criterios del GISTM son más rigurosos en cuanto a la demanda sísmica, lo cual induce licuación de los jales saturados, requiriéndose medidas de estabilización que implican mayores costos de las obras de cierre. La diferencia entre los criterios de la CDA (2019) y del GISTM (2020) es especialmente relevante en proyectos de cierre debido a que los criterios del GISTM resultan más rigurosos en esta etapa.

El GISTM establece criterios conservadores, orientados a garantizar altos márgenes de seguridad independientemente del nivel de consecuencia del lugar del proyecto. Como resultado, al aplicar el GISTM, los análisis post licuación, es decir, escenarios extremos de pérdida de resistencia, conducen a factores de seguridad por debajo de los mínimos recomendados en este tipo de análisis, sugiriendo potencial inestabilidad incluso en condiciones donde el riesgo real para terceros es limitado.

Por otro lado, la CDA propone un marco basado en la clasificación de consecuencias de falla, permitiendo ajustar los requisitos de estabilidad de acuerdo con el nivel real de exposición del depósito. En un sitio remoto, sin poblaciones aguas abajo y con impactos

ambientales y sociales limitados, como el analizado, los criterios de la CDA ofrecen una evaluación más coherente con el contexto. Bajo este enfoque, los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos son considerados aceptables para el caso analizado en etapa de cierre, mientras que los resultados post licuación pueden interpretarse como escenarios de sensibilidad y no necesariamente como condiciones de cierre.

La diferencia metodológica entre ambos criterios tiene implicaciones directas en la toma de decisiones para depósitos de jales en México. En particular, el análisis post licuación se vuelve crítico en regiones sísmicamente activas o con alta exposición, pero su interpretación debe contextualizarse adecuadamente en sitios de baja sismicidad donde el riesgo es menor. Forzar la aplicación de criterios muy conservadores en depósitos remotos podría conducir a conclusiones que no reflejan el riesgo real ni las necesidades técnicas del cierre.

En este caso, la adopción de los criterios de la CDA para la evaluación definitiva resulta técnicamente justificable debido al nivel de exposición del depósito, la ausencia de poblaciones vulnerables y la coherencia entre los resultados de estabilidad estática y pseudoestática. Asimismo, la comparación entre ambos marcos resalta la importancia de seleccionar criterios de diseño basados en una comprensión integral del contexto, evitando interpretaciones muy conservadoras que no contribuyen de manera proporcional a la reducción del riesgo residual del sitio.

5 CONCLUSIONES

El estudio realizado permitió evaluar de manera integral la estabilidad de un depósito de jales en etapa de cierre, considerando la caracterización geotécnica obtenida y la aplicación comparativa de los criterios de evaluación de la CDA (2019) y del GISTM (2020). Con base en los análisis desarrollados, se concluye lo siguiente:

- La investigación geotécnica y la caracterización detallada de los jales del depósito y los suelos de cimentación son fundamentales para definir un modelo representativo y obtener parámetros confiables de resistencia y del potencial de licuación.
- El depósito presenta condiciones de estabilidad adecuadas en condiciones estáticas y pseudoestáticas bajo los criterios de la CDA; según estos criterios la demanda sísmica no es lo suficientemente alta para inducir licuación de los jales saturados. Estos resultados son consistentes con el comportamiento esperado para un depósito de consecuencias inclusive significativas en etapa de cierre ubicados en zonas remotas.

- Al aplicar los criterios del GISTM, algunos sectores presentan potencial inestabilidad en la condición post licuación. Este criterio, al ser más conservador, conduce a conclusiones más restrictivas, aun en sitios con bajo nivel de exposición.
- Los criterios basados en las consecuencias de una eventual falla, como los establecidos por la CDA, permiten conclusiones más adecuadas al contexto real del sitio, ya que incorporan explícitamente el nivel de exposición, la ausencia de población aguas abajo y el carácter remoto del depósito. Su aplicación evita sobreestimar la criticidad donde el riesgo residual es limitado.
- La metodología y los análisis aplicados en este estudio son replicables para otros depósitos de jales en México, tanto en condiciones de operación como de cierre, en los que es necesario evaluar la estabilidad bajo condiciones estáticas, pseudoestáticas y post licuación. Este enfoque puede servir como referencia técnica para proyectos de depósito de jales en zonas de baja sismicidad.
- En conjunto, los resultados subrayan la importancia de seleccionar criterios de evaluación coherentes con el contexto del depósito y de interpretar los análisis post licuación como escenarios de sensibilidad y no como condiciones de cierre definitivas, especialmente en sitios de baja exposición.
- Es importante destacar que un depósito de jales ubicado en una zona de baja o muy baja sismicidad puede estar afectada por una alta demanda sísmica si es que se aplican condiciones extremas como las sugeridas por el GISTM, con aceleraciones relativamente altas para periodos de retorno de 10,000 años. En estas condiciones, los depósitos de jales construidos con el método aguas arriba se vuelven vulnerables ya que podrían experimentar licuación por sismo, como el presentado en este trabajo.

6 REFERENCIAS

- Boulanger, R.W. y Idriss, I.M. (2014). *Cyclic Failure and Liquefaction Resistance of Sand: Technical Report UCD/CGM-14/01*. Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis.
- Canadian Dam Association (2019). *Dam Safety Guidelines*. Canadian Dam Association, Edmonton, Canada.
- Duncan, J., Wright, S. and Brandon, T. (2014) *Soil Strength and Slope Stability*. 2nd Edition, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2015). *Soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, California.

- International Council on Mining & Metals (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM)*. ICMM, Londres.
- Olson, S.M. & Stark, T.D. (2002). "Liquefied strength ratio from liquefaction flow failures." *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3): 629-647.
- Robertson, P.K. (2016). "Cone Penetration Test (CPT)-Based Soil Behavior Type Classification System—An Update". *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12): 1910-1927.
- Robertson, P. K. (2022). Evaluation of flow liquefaction and liquified strength using cone penetration test - an update, *Canadian Geotechnical Journal*, 59, pp. 620-624.
- Seed, H.B. y Idriss, I.M. (1971). *Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential*. University of California, Berkeley.
- Spencer, E. (1967). "A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces". *Geotechnique*, 17(1): 11-26.