

Modelación de escenarios de seguridad para presas de colas

Safety scenario modeling for tailings dams

Teresa Hernández-Columbié^{1*}, Rafael Guardado-Lacaba¹, Raquel Vinardell-Peña¹

¹Universidad de Moa, Cuba.

*Autor para la correspondencia: tcolumbie@ismm.edu.cu

Resumen

La modelación de los escenarios de seguridad para las presas robustece la efectividad de los planes de gestión de riesgos de desastres en estas obras al reducir el riesgo de fallos que puedan ocasionar daños de magnitud considerable. Este trabajo tuvo el propósito de proponer, para las presas de colas de la industria cubana del Ni, una metodología de modelación de escenarios de seguridad que determine los mecanismos e indicadores de fallos, a fin de lograr la detección temprana de riesgos y su reducción, así como minimizar los impactos negativos sobre la población, la economía y el medio ambiente a través de un plan de gestión de riesgos de desastres.

Palabras clave: presa de colas; gestión de riesgos; modelación; escenarios de seguridad.

Abstract

Modeling safety scenarios for dams strengthens effectiveness of disaster risk management plans in this kind of work by reducing risk of failures that can cause considerable damage. The aim of the present paper was a proposal of a modeling methodology for safety scenarios in tailing dams from the Cuban nickel industry, to determine indicators and failure mechanisms, in order to achieve early detection risks and their reduction, as well as to minimize the negative impacts on the economy, the population, and the environment through a risk and disaster management plan.

Keywords: tailings dam; risk management; modeling; safety scenarios.

1. INTRODUCCIÓN

La seguridad en la disposición de los residuales de la actividad minera es un asunto apremiante en la actualidad, teniendo en cuenta el incremento de los riesgos asociados a este proceso. En Cuba, los volúmenes de producción de Ni + Co en la región oriental superan las 37 000 toneladas de producto final anualmente y miles de toneladas de residuos deben almacenarse de forma segura en presas de colas. En la actualidad, en Cuba se aplican metodologías internacionales, las cuales no se ajustan a las particularidades de las presas de colas cubanas, debido a las condiciones y singularidad de estas obras, al existir en condiciones climáticas y sismológicas particulares, además de proyectos ajustados a los criterios constructivos del país.

Las presas con mayor ocurrencia de fallos son las que se construyen por el método de aguas arriba, siendo el peligro de fallos mayor en la medida que el depósito de colas gana en altura (Martínez-Silva et al. 2015).

Los análisis de los incidentes históricos de las presas de colas (Oldecop & Rodríguez 2007) demuestran que existe una relación directamente proporcional entre los mecanismos de fallos por deslizamientos de taludes, sismos, erosión y sobrepaso, el método constructivo aguas arriba y el número de incidentes de fallos ocurridos

La ICOLD (International Commission On Large Dams) (2015) revela que los fallos de las presas de colas activas a nivel mundial están relacionados con deslizamientos del talud (22 %), terremotos (17 %), sobrepaso (18 %), otros fallos (27 %) y de origen desconocidos (16 %). Una investigación realizada por De la Cruz-Fernández (2017) concluye que el agua es el principal factor que influye en las condiciones de fallo o rotura para que se produzca una liberación de residuos al medio ambiente.

Los trabajos realizados por Hernández & Guardado (2014a, 2014b y 2015) y Hernández & Ulloa (2014) sobre sistemas de gestión de riesgos para presas de colas en Cuba aportan valiosos resultados para el conocimiento del riesgo que representan estas obras para el medio ambiente, la población y la economía del país. La inexistencia de modelos de seguridad para estas estructuras, de alta vulnerabilidad ante peligros como intensas lluvias o la ocurrencia de un sismo, favorece el incremento de los riesgos de desastres.

Los escenarios de seguridad son análisis de las dimensiones del riesgo, presentado en forma escrita, cartográfica o diagramada utilizando técnicas cuantitativas y cualitativas de la magnitud del riesgo que afecta a territorios y grupos sociales determinados. Significa una consideración pormenorizada de los peligros y vulnerabilidades y, como metodología, ofrece una base para

la toma de decisiones sobre la intervención en reducción, revisión y control de riesgo (Lavell et al. 2003). La modelación de los escenarios de seguridad en las presas aumenta la efectividad de los planes de gestión de riesgos de desastres, al reducir el riesgo de fallos.

Este trabajo tuvo el propósito de proponer, para las presas de colas cubanas, una metodología de modelación de escenarios de seguridad que determine los mecanismos e indicadores de fallos, a fin de lograr la detección temprana de riesgos y su reducción, así como minimizar los impactos negativos sobre la población, la economía y el medio ambiente a través de un plan de gestión de riesgos de desastre.

2. METODOLOGÍA

La metodología para la modelación de los escenarios de seguridad se realizó a través de indicadores de fallos de las presas de colas (Figura 1), los cuales se evalúan a través de un conjunto de matrices de impacto. Los métodos de evaluación utilizados para los indicadores de fallos son de carácter cualitativo y cuantitativo; se emplearon los datos de registros históricos del sistema instrumental del monitoreo, datos de inspecciones de seguridad, reportes estadísticos de incidentes y accidentes ocurridos en las presas, además de las informaciones aportadas por entrevistas y encuestas a personal de alta experiencia en la construcción y operación de presas de colas.

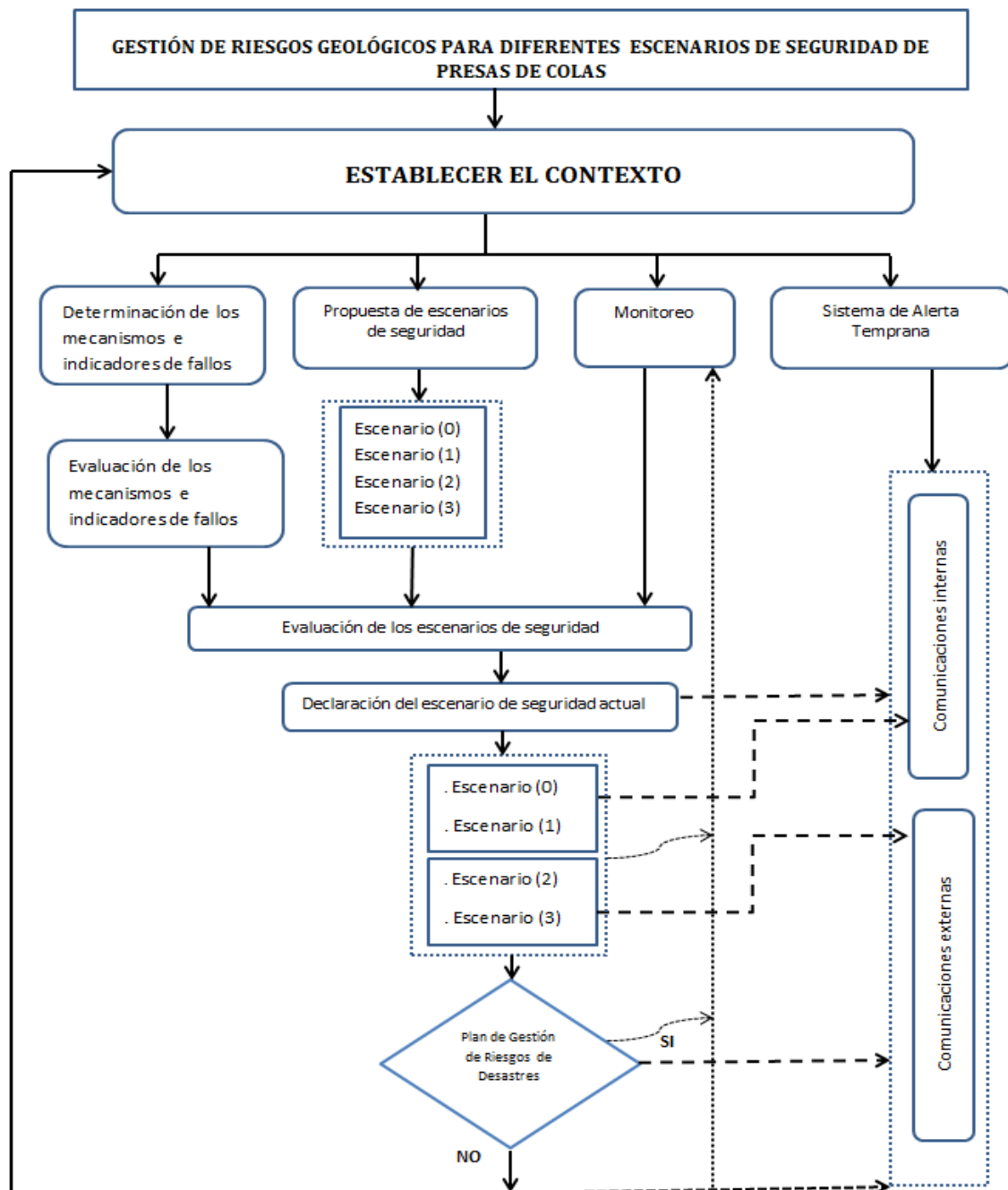


Figura 1. Organigrama de la metodología de modelación de escenarios de seguridad propuesta para presas de colas.

2.1. Contexto

Para establecer el contexto se analizan en detalle las particularidades del proyecto general de la presa de colas, las normativas nacionales e internacionales, licencias ambientales, estudios ambientales, de riesgos y documentación técnica vinculada con la obra.

2.2. Determinación de los mecanismos e indicadores de fallos

Los mecanismos de fallos son los procesos inducidos por un evento en particular, que resulta en una inestabilidad de la presa y la pérdida de almacenamiento de las colas. Varios autores han revisado fallos históricos de presas de colas, clasificándolas según tipo de fallo, consecuencias (por ejemplo, personas afectadas y volumen liberado), tipos de depósitos, métodos constructivos, entre otras características (Foster et al. 2000 y Villavicencio et al. 2013). Respecto a los tipos de fallos identificados, los más comunes corresponden a inestabilidad de taludes estática y sísmica, licuación, sobrepaso y vaciamiento, deformaciones excesivas del dique resistente, erosión interna, inestabilidad del suelo de fundación, y erosión del dique resistente por efecto hídrico.

Kempena et al (2017) analizan de forma detallada los efectos devastadores de la erosión en suelos poco cohesivos ante la ocurrencia de lluvias intensas. En las presas de colas la erosión puede desencadenar varios mecanismos de fallos lo que induce la ocurrencia de daños de mayor envergadura debido a las propiedades de las colas que favorecen la ocurrencia de este fenómeno, por lo que se le debe prestar especial atención en el monitoreo.

Los indicadores de fallos son los patrones de referencia tomados de las legislaciones, normativas que rigen el diseño de los proyectos de construcción, operación y cierre de las presas de colas. El nivel de cumplimiento de estos indicadores representa el nivel de calidad que posee la obra durante su ciclo de vida. Se establecen rangos de variación los cuales definen un determinado tipo de modelo de escenario de seguridad que posee la presa en tiempo real.

Los indicadores de fallos propuestos en la metodología, de forma general, son:

- Indicadores hidrogeológicos: intensidad de lluvias, altura del nivel freático, altura de ola y presión de poros.
- Indicadores de los parámetros de construcción, operación, cierre y post cierre: densidad del dique, filtraciones, altura del borde libre, pendiente de la playa, distancia mínima entre el espejo de agua y el dique, resistencia del material en el dique y en fundación, módulos de deformación, volúmenes de colas vertidas, granulometría del material, factor de seguridad de la obra y otros.
- Indicadores de operación de drenaje: integridad física de los aliviaderos, cumplimiento de los parámetros constructivos de los

drenes, escurrimiento superficial, caudal del agua en los drenes y nivel de sólidos en suspensión en los drenes.

- Indicadores de detección de fenómenos dinámicos y estáticos: desplazamientos verticales, horizontales, aceleraciones sísmicas, deformaciones en el dique y licuefacción.
- Indicadores de deslizamientos: agrietamientos, subsidencias y erosión superficial e interna.

El objetivo del sistema de indicadores es reflejar el nivel de vulnerabilidad de la presa de colas ante la acción de determinados peligros geológicos o antrópicos que ponen en riesgo la integridad física de la misma.

2.3. Propuesta de escenarios de seguridad

Para la modelación de escenarios de seguridad para presas de colas se emplea la siguiente propuesta, basados en cuatro tipos de escenarios, los cuales son:

- Escenario de seguridad cero (0): las condiciones existentes y las previsiones indican una intensificación del monitoreo de la presa de colas, no requiriéndose la ejecución de medidas de mitigación o correctivas, no existen riesgos.
- Escenario de seguridad uno (1): se han producido acontecimientos que de no aplicarse medidas correctoras podrían ocasionar averías graves o rotura de la presa, existiendo los recursos para enfrentar los riesgos que se presenten.
- Escenario de seguridad dos (2): existe riesgo de rotura o avería grave de la presa y no puede asegurarse con certeza que la situación pueda ser controlada mediante los recursos existentes.
- Escenario de seguridad tres (3): la probabilidad de rotura de la presa es elevada o ya ha comenzado, resultando inevitable que se produzca el derrame de colas.

2.4. Monitoreo

En esta etapa se realiza una sincronización entre todos los métodos de supervisión existentes y los registros históricos del sistema instrumental, tales como: piezómetros, pozos hidrológicos, puntos de control geodésico, estaciones sismológicas, pluviómetros, inclinómetros, ensayos geotécnicos y otros. Se toman los valores de cada indicador, con el objetivo de establecer

una comparación con los parámetros de diseño de los proyectos, y así definir el escenario de seguridad real de la presa de colas.

2.5. Sistema de alerta temprana

Se debe establecer un sistema de información tanto interno como externo, que permita mantener un flujo de información constante de la situación de la seguridad de la presa con el Sistema de Alerta Temprana (SAT) de la empresa, instituciones, la Defensa Civil, sistema de gobierno territorial y del país.

2.6. Evaluación de los mecanismos e indicadores de fallos

La declaración de uno u otro tipo de escenario se realiza sobre la base de la evaluación del comportamiento real de los indicadores de fallos de la presa de colas. En la Tabla 1 se muestra un ejemplo hipotético de la evaluación parcial de un indicador hidrogeológico por escenario de seguridad.

Tabla 1. Magnitud del indicador hidrogeológico intensidad de lluvias para cada escenario

Indicador	Descripción	Escenarios	Magnitud
		0	< Valor máximo de diseño (mm/24h)
Intensidad de las lluvias	Niveles de agua en la playa de la presa	1	= Valor máximo de diseño (mm/24h)
		2	> 5-30 % del valor máximo de diseño
		3	> 31 % del valor máximo de diseño

2.7. Evaluación de los escenarios de seguridad

El nivel de efectividad del sistema de monitoreo existente en la presa define el grado de confiabilidad para la declaración de uno u otro de tipo de escenario de seguridad. La aplicación del método de la modelación está íntimamente relacionada con la necesidad de encontrar un reflejo mediatizado de la realidad objetiva. De hecho, el modelo constituye un eslabón intermedio entre el sujeto (investigador) y el objeto de investigación. La modelación es el método mediante el cual se pueden crear abstracciones con vistas a explicar la realidad (Pérez 1996).

El proceso de modelación de decisiones y eventos inciertos brinda una visión de conjunto de la situación que el decisor enfrenta, y facilita la cuantificación

probabilística de consecuencias; esto es de gran utilidad para la toma de decisiones.

Conocidos los valores reales de cada indicador de fallo se procede a la evaluación de los mismos, con el objetivo de determinar el escenario de seguridad actual en la presa de colas (Tabla 2).

Tabla 2. Ejemplo de evaluación de escenarios según comportamiento de varios indicadores de fallos

Indicador	Descripción	Escenario	Magnitud
Altura del borde libre	Separación entre el nivel de la superficie de las colas y el borde de los diques.	2	<50 – 30 cm
Ubicación del espejo de agua	El espejo de aguas debe estar ubicado según proyecto	2	Contacto parcial con dique
Erosión superficial e interna	Presencia de los diferentes tipos de erosión hídrica en la presa de colas	2	Presencia de surcos profundos, cárcavas y erosión interna
Licuefacción	Presencia de conos de arena y fluencia de material, hundimientos de estructuras	2	Presencia de conos de arena.

2.8. Declaración del escenario de seguridad actual

La declaración del escenario de seguridad actual de la obra se realiza sobre la base de una evaluación detallada del nivel de comportamiento de los indicadores de fallos, una vez definida el grado de seguridad existente, se mantiene un sistema de comunicación interno y externo según las necesidades requeridas para mantener un SAT eficaz, además de activar el plan de gestión de desastres.

2.9. Plan de gestión de riesgos de desastres

Cada incumplimiento de los parámetros de proyecto que indiquen un riesgo será valorado su solución a través de un plan de medidas de prevención, mitigación o corrección de riesgos. La efectividad o no de la aplicación de las medidas definirá el término de la aplicación de la misma, y de una nueva evaluación del contexto de la obra. Se garantiza una comunicación total con el SAT.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología propuesta para la modelación de escenarios de seguridad para las presas de colas constituye una herramienta eficaz para la toma de decisiones de los gestores de estas obras, brinda los parámetros de referencia para definir los rangos que permiten la modelación de los fallos de las presas de colas. En la Tabla 3 se exponen los rangos de los indicadores de fallos propuestos, según los proyectos constructivos, de operación y de cierre de una presa de colas hipotética. Además se proponen medidas para prevenir o mitigar los posibles riesgos que pueden ocurrir, Tabla 4.

Tabla 3. Modelación de los indicadores de fallos, escenarios, magnitud y medidas de prevención o mitigación de una presa hipotética

Indicadores		Escenario	Magnitud	Medida de prevención (tabla 4)
Hidrogeo-lógicos	Intensidad de las lluvias	0	< valor promedio histórico en mm/24h	1
	Altura de la columna de agua	0	< altura promedio histórica	1
	Presión de poros	0	< valor promedio histórico	1
Parámetros de construcción, operación, cierre y post cierre	Niveles de compactación en los diques	0	> 98%	1
	Filtraciones	1	Presencia humedad ocupa 10 % del dique	2, 3,13, 14, 17, 18, 19, 22, 23, 24 y 25
	Altura del borde libre	2	<50 - 30	2, 3, 5, 14 y 26
	Ubicación del espejo de agua	2	Contacto parcial con dique	2, 5, 13 y 14
Operación de drenaje	Funcionamiento de drenajes	1	Obras incompletas o averías parciales	2, 3, 6, 12, 14, 18 y 22

	Escurrimiento superficial	2	Control del 30-0 % del escurrimiento	1, 2,17, 19, 20, 22, 24 y 26
	Caudal en los drenes	0	< valor promedio	1
Detección de fenómenos dinámicos y estáticos	Desplazamientos verticales	0	10-15 mm	2,10 y 24
	Desplazamientos horizontales	0	<15 mm	2,10,11,13,14,17, 18,23 y 25
	Licuefacción	2	Presencia de conos de arena.	2, 3, 4, 12, 13, 24, 26 y 27
	Sismos	0	Sismo < según diseño.	2
Erosión y deslizamiento	Agrietamientos	1	Presencia de pequeñas grietas	2, 3, 10, 12, 13, 14 y 24
	Erosión hídrica	2	Surcos profundos y grandes cárcavas	2, 3, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 24 y 26
	Deslizamientos	2	Ocurrencia en zonas activas	2, 3, 4, 8, 11, 13, 14, 16, 22, 24, 26 y 27

Tabla 4. Plan de gestión de riesgos de desastres (medidas)

Acción	Medidas de prevención, mitigación o corrección de impactos
1	Establecer inspección visual y monitoreo instrumental.
2	Incrementar el nivel de inspección visual y monitoreo instrumental.
3	Activar el SAT interno.
4	Activar el SAT interno y externo.
5	Incrementar volumen del drenaje del agua de la presa.
6	Incrementar los volúmenes de bombeo de agua reciclada.
7	Iniciar drenaje por aliviadero de emergencia.
8	Activar el plan gestión de riesgos de desastres.

-
- 9 Paralizar las operaciones de la presa de colas.
 - 10 Establecer sistemas de monitoreo de las pequeñas grietas.
 - 11 Realizar reparaciones de taludes dañados.
 - 12 Bajar capacidad de recepción de colas e iniciar reparación de averías.
 - 13 Detener las actividades de recrecimiento de los diques.
 - 14 Cambiar el área de descarga de las colas.
 - 15 Abrir las capas para su secado y conformar las capas.
 - 16 Extraer el material fuera de especificación.
 - 17 Aplicar técnicas de sellaje de taludes.
 - 18 Reparación de las averías de los sistemas de drenaje.
 - 19 Realizar canalizaciones interiores para encauzar las aguas del escurrimiento.
 - 20 Aplicación de métodos de protección vegetal, mecánico, químico y mixto.
 - 21 Realizar estudios geofísicos y ensayos geotécnicos.
 - 22 Construir muros de contención para desviar las colas hacia zonas menos vulnerables.
 - 23 Realizar acciones de capacitación a trabajadores y comunidad.
 - 24 Situar señales de aviso de los riesgos existentes.
 - 25 Realizar simulacros de averías.
 - 26 Realizar ajustes al diseño del proyecto.
 - 27 Evacuación del personal, la población y resguardo de los equipos y medios.
-

La revisión del comportamiento de los indicadores de fallos en cada escenario de seguridad propuesto indica que la presa se encuentra en el escenario 2.

En la determinación del escenario se debe tener en cuenta el grado de vulnerabilidad que posee la presa de colas ante la acción de peligros hidrometeorológicos, los cuales pueden desencadenar diferentes riesgos por deslizamientos de diques de contención y colapsos parciales o totales de la presa de colas. El proceso de modelación de escenarios de seguridad permite definir y enfrentar de forma proactiva los posibles riesgos que puede enfrentar la presa de colas. La aplicación de un plan de gestión de riesgos de desastres evita la ocurrencia de daños significativos a la población, al medio ambiente y a la economía del país.

4. CONCLUSIONES

- La metodología propuesta para la modelación de escenarios de seguridad para presa de colas es una herramienta útil para la toma de decisiones ante la presencia de riesgos de desastres.
- Los principales indicadores de fallos determinados fueron: hidrológicos; parámetros de construcción, operación, cierre y post cierre; operaciones del drenaje; detección de fenómenos estáticos y dinámicos; erosión y deslizamientos. Ellos constituyen elementos de control de la seguridad para las presas de colas.
- La modelación determina el estado actual de la seguridad de las presas y su plan de gestión de riesgos de desastres el cual que permite el desarrollo de actitudes proactivas en la protección de la sociedad, la economía y el medio ambiente

5. REFERENCIAS

- De la Cruz-Fernández, S. 2017: *Evaluación del fallo de presas de relaves con el método del árbol de fallos*. Tesis de Maestría. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. Madrid. 2017.
- Foster, M., et al. 2000: A Method for Assessing the Relative Likelihood of Failure of Embankment Dams by Piping. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5): 1025-1061. <http://dx.doi.org/10.1139/t00-029>
- Hernández, T. y Guardado, R. 2014a: Control de Erosión Mediante Bioingeniería en Presas de Colas de la Industria del Níquel. *Minería y Geología*, 30(4): 55-69.
- Hernández, T. y Guardado, R. 2014b: *Gestión de Riesgos por Deslizamientos en la presa de colas de la ECPSA*. I Simposio de Minería y Medio Ambiente, Moa, Cuba.
- Hernández-Columbié, T y Ulloa Carcasés, M. 2014: Impacto ambiental de la ampliación de una Presa de colas de la industria cubana del níquel. *Minería y Geología*, 30(3): 33-48
- Hernández, T. 2015: *Sistema de Gestión de Riesgos Por Fallos en la Presa de Colas de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba*. Tesis Doctoral, ISMM, Moa, Cuba.
- ICOLD., 2001: *Talings dams risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences*. Bulletin 121. Published by the International Commission on large dams, Paris. 1-144, (2001).
- Kempena, A., Guardado, R., Hernández, T., y Viltres, Y., 2017: Cartografía de la peligrosidad por erosión hídrica en la ciudad de Brazzaville. *Minería y Geología*, 33(2): 144-162.

- Martínez Silva, R., Hernández Columbié, T., y Chacón Pérez, Y., 2017: Método de Cálculo de Taludes por Estados Límites. *Revista Avances*, 19(3): 240-244.
- Lavell, A., Cardona, O. y Mansilla, E. 2003: *La gestión local del riesgo: nociones y precisiones en torno al concepto y la práctica*. Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPRENAC), PNUD. División de Medio Ambiente, Cambio Climático y Bioenergía. Roma.
- Oldecop, L., y Rodríguez, L., 2007: Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros. *Ingeniería Civil*, 9: 148-181.
- Pérez, G. 1996: *Metodología de la investigación educacional*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Villavicencio, G et al. 2013: Failure of sand tailings dams in a highly seismic country. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4): 449-464.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

THC: idea de la investigación y diseño de la metodología, redacción del original y aprobación de la versión final. RGL: revisión del original y aprobación de la versión final. RVP: Desarrollo de la metodología, procesamiento de los datos y aprobación de la versión final.

ORCID

THC, <https://orcid.org/0000-0002-6388-8997>

RGL, <https://orcid.org/0000-0003-1075-8176>

RVP, <https://orcid.org/0000-0003-1115-9992>

Recibido: 16/09/2020

Aceptado: 27/03/2021