Ingeniería Geológica
Facultad: Geología-Minería

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

Ingeniero en Geología

Título: Evaluación de la Vulnerabilidad Global en la Presa de Colas Inactiva de Moa.

Autor: Celia Rosa Lezcano Rodríguez

Tutor: Dra. Tereza Hernández Columbié

Ctte: Epg. Yanmari Paumier Frómeta

Curso: 2017-2018

"Año 60 de la Revolución"

Dedicatoria

Dedico mi trabajo en primer lugar a mi Dios Todopoderoso que es quien me ha dado la fuerza para llegar hasta aquí.

A mi amado esposo Reiber Borges Molina por estar conmigo todo el tiempo y por su apoyo y su ayuda incondicional.

A mis niños porque ellos son el motor impulsor de cada uno de mis anhelos y sus sonrisas y su amor me alientan.

A mis padres y a mi suegra por su apoyo constante y por todos sus sacrificios para permitirme poder llegar hasta aquí.

Agradecimientos

Le agradezco en primer lugar a mi Dios, porque es quien en su inmenso amor y misericordia ha permitido que hoy esté aquí, y me ha dado de su fuerza.

A toda mi familia que de una manera u otra contribuyó a que llegara hasta aquí. Especialmente agradezco a mi amado esposo que siempre ha estado presente para alentarme y apoyarme en cada momento de todos estos años y de todo este proceso, a mis padres, a mi suegra, a mis hermanas, a mis amigos y vecinos y especialmente a mi mejor amiga María Julia Abreu Leyva.

A mis hermosos niños por su cariño, por su amor, por sus abrazos, sus besos y por cada vez que escucho de sus labios la palabra MAMÁ.

A mis profesores, especialmente a mi tutora Tereza Hernández Columbié, al profesor Jorge Luis Urra Abraira, a Moraima Fernández, a Beatriz Riverón Zaldívar, al profesor José Nicolás Muñoz quien ha sido un ejemplo de integridad y de sabiduría para mí, y a todos los profesores que me han apoyado y me han mostrado su afecto. A la profesora Yanmari Paumier Frómeta por toda su ayuda, su apoyo y sus oraciones. A Mariela por su ayuda y su sacrificio.

Resumen

La presa de colas inactiva de Moa ha permanecido por un largo período sin la adecuada protección, por lo que presenta un deterioro avanzado, sin embargo estas son obras que requieren un control sistemático para prevenir los fallos que en ella pueden ocurrir. Existe un alto grado de saturación de las colas almacenadas en la presa, siendo uno de los principales problemas que acrecientan el nivel de susceptibilidad de la obra ante fenómenos hidrometeorológicos y sísmicos. Incrementado la probabilidad de la ocurrencia de fallos que pueden ocasionar pérdidas económicas, degradación y contaminación del medio y en algunos casos pérdidas de vidas humanas. Los trabajos de campo y la evaluación de los indicadores de fallo a través de métodos cualitativos y cuantitativos para el cálculo de la susceptibilidad de la presa han permitido identificar el nivel muy alto de vulnerabilidad global existente en la presa. El estudio realizado permitió determinar las zonas con mayor nivel de vulnerabilidad, que pueden ocasionar daños sobre la población, los bienes y el ambiente. Además, se elabora un plan de reducción de desastres para la prevención, mitigación y corrección de los posibles impactos a producirse ante un fallo de la estructura.

Summary

The inactive old tailing of Moa has remained for a long period without the appropriate protection, presenting an advanced deterio, however these require a systematic control to diminish the possible failure. A high degree of saturation of the material stored, being one of the main problems that increase the level of susceptibility of the tailing before phenomenons hidrometeorological and sismic. Increased the probability of the occurrence of shortcomings that can cause economic losses, degradation and contamination of the means and in some cases losses of human lives. The field works, the evaluation of the failure indicators and the calculations of the susceptibility of the tailing have allowed to identify the high level of existent global vulnerability in the tailing. The carried out study allowed to determine the areas with bigger vulnerability level that can impact in damages on the population, the properties and the atmosphere. Besides, elaborating a plan of reduction of disasters for the prevention, mitigation and correction of the possible impacts.

Introducción

Las estructuras de las presas de colas están formadas por material friable, tienen entre sus funciones almacenar los residuales sólidos del proceso minero metalúrgico. El concepto general de su diseño es construir diques de contención perimetrales que aumentan de forma sistemática su altura, sobre un suelo de cimentación generado por las propias colas a medida que se depositan.

El riesgo de fallo de las presas se incrementa en el tiempo en dependencia del volumen de material depositado, la calidad de los parámetros geotécnicos y la complejidad geológica imperante en el área. El vertido de residuos al medio ambiente por rotura de una presa de colas del proceso minero metalúrgico tiene consecuencias ambientales catastróficas, aunque la misma no se encuentre en funcionamiento. Estos fallos se deben fundamentalmente por la acción del agua, la sismicidad, su peso y aquellos elementos estructurales que en determinado momento las convierten en inestables.

Las presas de colas son obras que requieren un control sistemático para disminuir los fallos que en ella pueden ocurrir. Los principales mecanismos de fallos registrados están asociados con: ocurrencia de terremotos, sobrepaso, problemas de cimentación, tubificación, fallo en las estructuras auxiliares, erosión del dique, subsidencias o colapso del terreno y deslizamiento del talud; este último suele ser el mecanismo de fallo más frecuente.

Los estudios de estabilidad de las presas de colas se adecuan al tipo de obra en construcción, los principales aspectos que se consideran son: la composición química de los residuos, el estado físico de los residuos, el espacio disponible para la disposición de los residuos y las características físico mecánicas de la cola.

La existencia de un alto grado de saturación en los residuos mineros metalúrgicos almacenados en las presas es uno de los principales problemas que favorecen el proceso de fallo. Las consecuencias de estos se revierten en grandes pérdidas económicas, degradación, contaminación del medio y en algunos casos pérdidas de vidas humanas. La seguridad de las presas de colas no debe centrarse exclusivamente sobre la estructura u

obra de ingeniería con un enfoque determinista, sino también debe conciderarse como un peligro tecnológico.

En la actualidad los problemas geotécnicos y ambientales que generan estas obras se han convertido en líneas de investigación de las ciencias de la tierra y el ambiente. La avería ocurrida en la presa de colas de la ECPSA en enero de 2014, demostró la necesidad de un mejor monitoreo y manejo de los residuos.

La presa de colas inactiva de Moa ha permanecido por un largo periodo sin la adecuada protección, por lo que presenta un deterio avanzado de la obra; por lo que se evidencia un escaso conocimiento de la vulnerabilidad de la presa ante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extraordinarios y sismos.

Problema científico

Insuficiente conocimiento de la vulnerabilidad global de la presa de colas inactiva de Moa ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos y sismos, situación que provoca la falta de percepción de los riesgos e incremento de la probabilidad de daños sobre la población, la economía y el medio ambiente.

Objeto de estudio

Presa de colas inactiva de Moa.

Campo de acción

Vulnerabilidad global de la presa de colas inactiva de Moa.

Objetivo general

Evaluar la vulnerabilidad global de la presa de colas inactiva de Moa.

Objetivos específicos

1. Valorar el conocimiento sobre fallos en presas de colas. Características regionales e ingeniero-geológicas del área de estudio de la presa de colas inactiva de Moa.
2. Diseñar una metodología para evaluar la vulnerabilidad global de la presa.
3. Evaluar la vulnerabilidad de la presa de colas inactiva de Moa e indentificar los sectores más vulnerables ante fenómenos hidrometeorológicos y sísmicos.
4. Diseñar un plan de reducción de desastres que garantice la prevención, mitigación y corrección de impactos generados ante fallos de la presa.

Hipótesis

Si se conoce y evalúa la vulnerabilidad global de la presa de colas inactiva de Moa, ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos y sismicos, se podrá diseñar un plan de reducción de desastres que disminuya la probabilidad de ocurrencia de desastres que afecten a la población, la economía y el medio.

CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE

1.1 Reseña histórica

La historia de la construcción de las presas es mucho más antigua de lo que comúnmente se reconoce en la actualidad, existen registros que desde las primeras civilizaciones del Medio y del Lejano Oriente se utilizaban las presas para el almacenamiento de agua. La presa conocida más antigua, aproximadamente en 2600 AC, es la construida en Sadd-el-Kafara, Egipto. El diseño se basó en una zona central rellena con material suelto, rodeada por espaldones de roca y con parapetos protegidos por mampostería ordinaria; la altura total de Sadd-el-Kafara era de 14 m.

La construcción de presas de colas o residuos producidos por la industria minera es mucho más reciente, surgen como una necesidad a mediados del siglo XX. En los últimos 50 años con el desarrollo del movimiento de tierra, han avanzado rápidamente las técnicas de diseño y construcción de estas obras.

El almacenamiento de colas constituye una de las principales tareas de los procesos mineros metalúrgicos. Los diseños y construcción han evolucionado, desde una construcción rudimentaria a los actuales estándares de la ingeniería, en la que se emplea la ingeniería geológica y campos asociados (Marklan, A. y Eurenius, J., 1976 y Quintana, H. 1998).

Los primeros métodos de construcción consistían en levantar un muro de contención con estériles más gruesos a los que había que añadir materiales (recrecido) a medida que ascendía su nivel en el depósito. En la actualidad existen, de manera general, tres tipos de métodos de construcción tal como se muestra en la Figura 1. El mayor número de fallos de las presas de colas está asociado con el método constructivo ¨aguas arriba¨, existiendo la necesidad de profundizar las investigaciones en este campo.

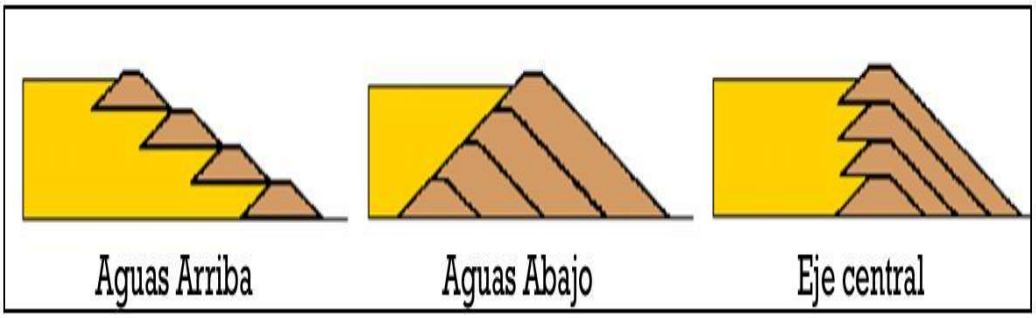

Figura 1. Tipos de presas de colas, según el método constructivo utilizado, según Zabala, F. et al., 2010

1.1.1. Estudios del impacto ambiental de las presas de colas

La contaminación por desastres medioambientales producidos por el colapso total o parcial de presas de colas es analizada por los siguientes autores: Angeli, M.G., et. al., 1996; Rodríguez, R., 2002; Blight, G.E. y Fourie, A., 2003; Alonso E. y Gens A., 2006; Rodríguez, R. y García, A., 2006; Rodríguez, R., et. al., 2009; Oldecop, L., et. al., 2010; Hernández, T., y Ulloa, M., 2014.

Los autores antes mencionados hacen alusión a las afectaciones provocadas por fallos en los diques de contención de las presas de colas, por lo que es evidente la necesidad de realizar estudios de riesgos durante toda la vida de las presas de colas (desde su apertura y después de su cierre); ellos analizan de forma independiente los impactos a los diferentes componentes ambientales. Es válido recalcar que estos trabajos centran su atención generalmente hacia los daños que generan los derrames de los materiales almacenados sobre el medio ambiente y no analizan detalladamente las causas que los generaron.

1.1.2. Caracterización de los residuos

Ponjuan, A. y Rodríguez, R., 1981; Ordoñez, A., 1984; Alonso, E., 2001; Venegas, F. C., 2008. Estas investigaciones tienen un carácter ambientalista ya que en ellas se analizan los altos contenidos de metales pesados que contienen los residuos y su caracterización se orienta hacia la búsqueda de metales preciosos para su futura explotación. La generación del drenaje ácido presenta especial importancia, dada la necesidad de evitar

su vertimiento al medio, por lo que se hace necesario la búsqueda con urgencia de métodos que garanticen el almacenaje seguro de los residuos en las presas de colas.

Las colas se caracterizan por ser sedimentos friables, sueltos de granulometría pequeña y fina, fuertemente limosas, saturadas por las aguas, con alta capacidad de fluidez (ante el agua). Las colas provienen de los residuos de los procesos mineros metalúrgicos. La alta capacidad de fluidez puede tener lugar de diferentes formas, desde muy lenta, lenta, a rápida hasta llegar a un movimiento catastrófico. La movilidad de las colas indica que existe una inestabilidad en el medio, así como una pérdida de resistencia y la deformabilidad de este suelo, (Barrera, S. 1998).

1.1.3. Comportamiento geotécnico

Las propiedades físico, mecánicas y el comportamiento ante sismos de las presas de colas es un tema estudiado ampliamente por varios investigadores: Guardado, R. y Riverón, A.B., 1997; Rodríguez, R., 2002; Fourie, A.B., et. al., 2003; Zandarín, M.T., et. al. 2008; Venegas, F. C., 2011. Estas investigaciones estudian el comportamiento geotécnico a partir del estudio de las propiedades físico-mecánicas de las colas, dique y suelos de cimentación, así como el comportamiento de las presas de colas ante la ocurrencia de sismos.

Estos estudios recalcan la necesidad de mantener el control sobre las propiedades de los materiales de construcción de las presas de colas, los suelos de cimentación y los materiales de los residuos almacenados hasta el proceso de post-cierre. Este control garantiza la seguridad de la obra durante su vida útil y su cierre definitivo. Se presentan análisis estadísticos para demostrar que el desconocimiento de las propiedades de los materiales conduce a la destrucción total o parcial de la obra.

1.1.4. Seguridad de las presas de colas

La seguridad de las presas de colas ha sido abordada por autores tales como: Suárez, J., 1998; Olalla, C. y Cuellar, V., 2001; Rubín, M., 2003; Oldecop, L., 2004; Hernández, T. y Guardado, R., 2010, 2011, 2012, y 2014. Estos estudios de seguridad se basan en el análisis de los fallos de presas de colas relacionándolos con el método constructivo. En el

caso del método aguas arriba, se define que los más frecuentes son la ocurrencia de deslizamientos de taludes y por acciones de los sismos. Estas investigaciones abordan la necesidad de un análisis más profundo de los factores que inciden en los fallos, al valorar la seguridad de las presas a través de la gestión de riesgos.

1.1.5. Diseño, construcción, operación, cierre, post cierre y monitoreo

Los siguientes autores abordan en sus investigaciones las etapas de vida de las presas de colas, desde el diseño hasta el post-cierre y monitoreo: Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD), 1989, 1995, 1996, 1999 y 2000; Alarcón, J., y Barrera, S., 2003; Espinace, R., 2008; Rodríguez, R., 2011b; Hernández, T., y Guardado, R., 2014.

Las presas de colas se construyen progresivamente a lo largo de todo el periodo de explotación minera y procesamiento metalúrgico. Las variaciones en los diseños de construcción se relacionan con cambios importantes en el régimen de operación, la variabilidad de la carga hidráulica o inestabilidad de los cimientos.

En el proyecto de la presa pueden ocurrir cambios y ajustes durante la etapa de construcción, para responder a las necesidades de producción de la planta metalúrgica o para corregir los problemas que se detecten. Es difícil definir la extensión de la etapa de cierre en el tiempo, lo que implica dificultades para el tratamiento estadístico de los eventos extraordinarios.

El funcionamiento hidráulico de las presas de colas está condicionado por un conjunto de procesos naturales, geológicos, climáticos y de interacciones que se realizan en el entorno. Este es determinante para establecer las condiciones de estabilidad física. (Ver Figura 2). Esta característica implica importantes diferencias en el diseño, en los procedimientos constructivos, en los controles de calidad de la construcción y en los procedimientos y sistemas de auscultación y control de la seguridad.

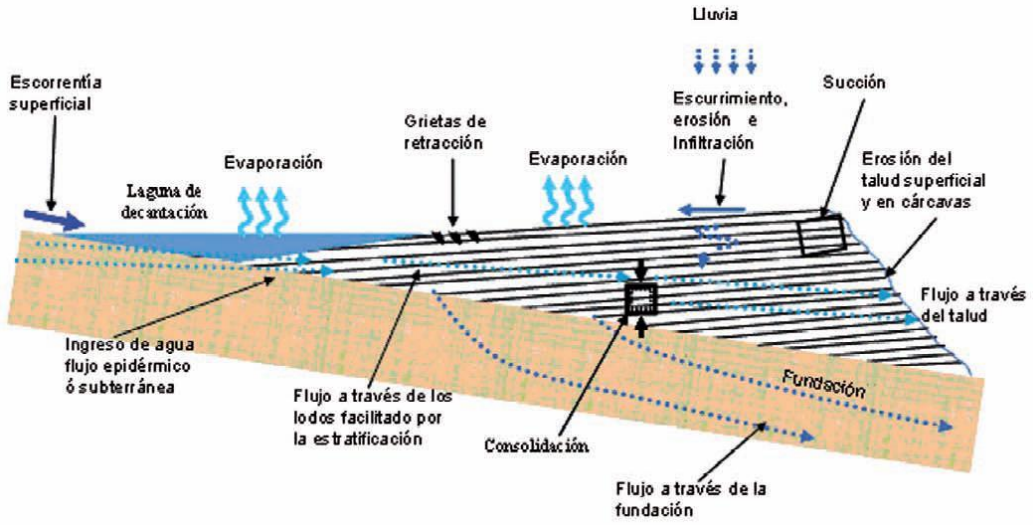

Figura 2. Modelo conceptual de una presa de residuos mineros tecnológicos con los factores que afectan su funcionamiento (Zandarín, M.T. 2009)

Los estudios existentes sobre la rehabilitación presentan los métodos de estabilización de terrenos de forma general: Blight, G., 1987; Gray D.H. et. al., 1996; Green, D., 2001; Suárez, J., 2002; Fonseca, R., 2004; Hernández, T. y Guardado, R., 2010. La temática comienza a ser tratada con mayor profundidad a partir de la década de los 90, debido a los grandes desastres ocurridos en presas de colas en esa etapa. Estos presentan una perspectiva general sobre los problemas e incertidumbres que implica el cierre en las presas de colas, en particular cuando se trata de evaluar efectos a largo plazo.

En los últimos años se muestran técnicas muy novedosas que brindan protecciones físicas y químicas muy efectivas, pero de costos muy elevados, por lo que actualmente se les brinda una mayor atención a los métodos de protección bio-ingenieriles, al resultar menos costosos y sus soluciones son más amigables con el medio, debido a la combinación de elementos naturales como la vegetación y en menor proporción materiales artificiales. Los métodos de protección de taludes son tratados de forma general.

1.1.6. Gestión de riesgos en la actividad minera

En la década de 1960 los desastres naturales comenzaron a ser investigados desde la óptica económica, con autores como Dacy y Kunreuther, (1969), quienes por medio de fórmulas matemáticas calculaban los riesgos de acuerdo con la probabilidad de que el

evento sucediera, basándose justamente en eventos ocurridos en el pasado y sus períodos de recurrencia, aplicado sobre todo a los ciclos de ocurrencia de las inundaciones.

El impacto de los desastres en las actividades humanas es un tema tratado en los últimos años, un amplio número de publicaciones desarrolladas por diversas disciplinas han conceptualizado sus componentes de forma diferente, aunque en la mayoría de los casos presentan puntos en común. La UNDRO (United Nations Disaster Relief Organizationen), de conjunto con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) promovió una reunión de expertos con el fin de proponer una unificación de definiciones ampliamente aceptadas en los últimos años (UNDRO, 1979).

Entre otros conceptos, el reporte de dicha reunión: "Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad" incluyó los siguientes:

- **Amenaza o peligro (Hazard - H):** definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.
- **Vulnerabilidad (V):** como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala desde 0 o sin daño a 1 o pérdida total.
- **Riesgo específico (specific risk -Rs):** como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.
- **Elementos bajo riesgo (E):** como la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuesta en un área determinada.
- **Riesgo total (total risk - Rt):** como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica debido a la ocurrencia de un evento desastroso, es decir, el producto del riesgo específico (Rs) y los elementos bajo riesgo (E).

En otras palabras, la evaluación del riesgo puede llevarse a cabo mediante la siguiente formulación general:

$$Rt = (E)*(Rs) = (E)\ (H.\ V), \quad (1.1)$$

Conservando esta conceptualización propuesta por el grupo de expertos reunidos en 1979, en 1985, Cardona propone eliminar la variable Exposición (E) por considerarla implícita en la Vulnerabilidad (V), sin que esto modificara la concepción original. Dicha fórmula, entonces, fue planteada de la siguiente manera:

$$Rt = H * V, \quad (1.2)$$

Varios autores e instituciones han incursionado en la temática de los riesgos sobre el medio, la infraestructura y la población, tales como: Carrara, A., 1983; Guardado, R. y Carmenate, J., 1996; Fell, R., 1997; Estado Mayor Nacional de Defensa Civil (EMNDC), 2005, 2010 y 2012. Los programas presentados se enfocan hacia las medidas de rehabilitación y reconstrucción, por lo que existe un déficit de conocimientos en la prevención y reducción de los riesgos de fallos de las presas de colas. Estos no son considerados para la toma de decisiones, durante el ciclo de vida de los proyectos.

1.1.7. Legislación y normativas internacionales

Los investigadores y organizaciones internacionales siguientes: ICOLD., 1989; UNDRO., 1979 y 1990; Unitet States Committee on Large Dams (USCOLD).1994, 1992 y 1989; Rogge, J.R., 1992; López, A., 1996; Guide to the Management of Tailings Facilities (MAC). 1998; Asociación de Minería de Canadá., 2000; Hortelano, A. y Casas, A., 2003; han realizado aportes importantes en el establecimiento de regulaciones para el control de áreas minadas abandonadas y de presas en general.

En los países con grandes explotaciones mineras existe un amplio soporte legislativo sobre las regulaciones para la construcción, operación y cierre de presas de colas; estos se rigen por el ICOLD, organización rectora en el mundo de las grandes presas. Esta temática aún es insuficiente con respecto a las obligaciones en las operaciones y el manejo de estas obras.

En los países latinoamericanos la construcción, operación y cierre de las presas de colas constituye un gran problema debido a los fallos de las presas por incumplir con las normativas de diseño y violar las regulaciones existentes. El fallo de estas obras provoca la contaminación del medio y pone en riesgo a la población, la infraestructura y al medio que existe aguas abajo.

1.2 Estado de la temática de la protección de las presas de colas en Cuba

La reducción de riesgos naturales en Cuba es una prioridad, su estrategia se sustenta en un marco legal que comprende leyes, decretos, resoluciones ministeriales, entre otras. La base institucional para su implementación y el control de su cumplimiento es sólida. En 1962 es establecida la Defensa Popular como baluarte para la protección de la población y su economía, más tarde se transforma en Sistema de Medidas de Defensa Civil. Este se fue perfeccionando con nuevas experiencias y leyes, una de estas últimas es el Decreto Ley 170 del Sistema de Medidas de Defensa Civil, de mayo de 1997.

La base legal cubana en materia de reducción de riesgos de desastres abarca 3 leyes, 7 decretos ley, 13 decretos, 21 resoluciones ministeriales y 1 directiva, esta investigación muestra algunas de ellas:

1- La ley 75 de la Defensa Nacional, del 21 de diciembre de 1994, en el Capítulo XIV se define el Sistema de Medidas de Defensa Civil y se otorgan responsabilidades a los Presidentes de las Asambleas Provinciales y Municipales del Poder Popular como líderes de Defensa Civil en sus respectivos territorios. Establece también, que las medidas de la defensa civil deben ser coordinadas y ejecutadas por los organismos estatales, las entidades económicas y las instituciones sociales. En esta ley se establecen, además, las principales medidas a cumplir para la protección de la población y la economía.

2- El decreto ley No. 170, del Sistema de Medidas de la Defensa Civil, como cuerpo legal específico referente a la Defensa Civil, define ampliamente todos los aspectos relacionados con la reducción de riesgos de desastres en la República de Cuba. En este decreto se define por primera vez la “reducción de desastres” como el “conjunto de actividades preventivas, de preparación, respuesta y recuperación, que se establecen con

la finalidad de proteger a la población, la economía y el medio, de los efectos destructivos de los desastres naturales".

3- Decreto ley No. 262, Reglamento para la compatibilización del desarrollo económico-social del país con los intereses de la defensa. Establece la consulta obligatoria de todas las inversiones realizadas en el país al correspondiente nivel de Defensa Civil, con el fin de incorporar las medidas de reducción de riesgo de desastres. Esto incluye a los planes, programas y proyectos de desarrollo nacional.

4- Directiva No. 1 del Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil (EMNDC), 2010, aprueba lo siguiente:

1- La ¨Apreciación general de peligros de desastres en Cuba¨,

2- Implementar las acciones para la prevención de desastres a todos los niveles, de los organismos y órganos estatales, entidades económicas e instituciones sociales,

3- Establecer durante la respuesta a las situaciones de desastres, las fases de Aviso, Informativa, Alerta y Alarma y los plazos,

4- Elaborar la documentación para la reducción de desastres, a partir de lo establecido en la propia Directiva No. 1.

Esta regulación no declara a las presas de colas como obras de peligros tecnológicos, por lo que existe la necesidad de particularizar en el conocimiento de la gestión de los riesgos por fallos de estas estructuras.

5- Guía metodológica para la organización del proceso de reducción de desastres, EMDCN, 2012: Esta guía tiene como objetivo normar metodológicamente la participación de las estructuras de las administraciones provinciales y municipales, de los organismos de la Administración Central del Estado, de las entidades presupuestadas, del sistema empresarial y de las formas de producción no estatales, así como de los Consejos de Defensa y sus grupos de trabajo en la organización y dirección del proceso de reducción de desastres. Se declara además que el proceso de reducción puede ser enriquecido con las experiencias y particularidades de cada territorio, órgano, organismo, entidad y forma

de producción de la economía. En los órganos y organismos estatales y sus entidades y en las demás formas de producción de la economía, el nivel de riesgo se determina por grupos de especialistas designados con el empleo de las metodologías que se elaboren al efecto.

La Defensa Civil cubana, de manera sistemática, realiza un análisis objetivo de las premisas de desastres que afectan al territorio nacional, con la finalidad de evaluar los diferentes elementos que reducen los riesgos de desastres y adoptar las decisiones pertinentes para perfeccionar los mismos. Esto ha permitido desarrollar los mecanismos establecidos, para incluir el peligro y la reducción del riesgo de desastres en el proceso de desarrollo integral del país y en los proyectos de inversión, el aseguramiento financiero y material de las medidas de reducción de desastres, con énfasis en el nivel local, así como determinar con objetividad el rol de cada órgano, organismo, entidades e instituciones sociales en el proceso de reducción de riesgo de desastres.

La Ley # 81 de Medio Ambiente, emitida en el año 1997, no incluye a las presas de colas como uno de los focos de contaminación más violentos al medio natural. Los fallos de las presas de colas son escenarios que no fueron contemplados en esta ley medioambiental, lo que favorece a la falta de percepción de los riesgos que representan estas obras para el hombre, las propiedades y el ambiente.

1.2.1. Construcción y operación de la presa de colas inactiva de Moa

El método seleccionado para la construcción de la presa de colas fue el de “aguas arriba”, (Figura 3), el mismo no fue completado porque se detuvo la deposición de colas. La presa se construiría de forma progresiva con “diques perimétricos”, apoyando un metro sobre el dique anterior y el resto sobre la superficie de las colas, de forma tal que estas constituyen el suelo de cimentación del dique; la base de cada dique oscilaría entre 14-19 m, la particularidad de este método es que la integridad estructural de la obra está gobernada por las propiedades y comportamiento de las colas inferiores descargadas hidráulicamente, que forman la base del talud del dique superior.

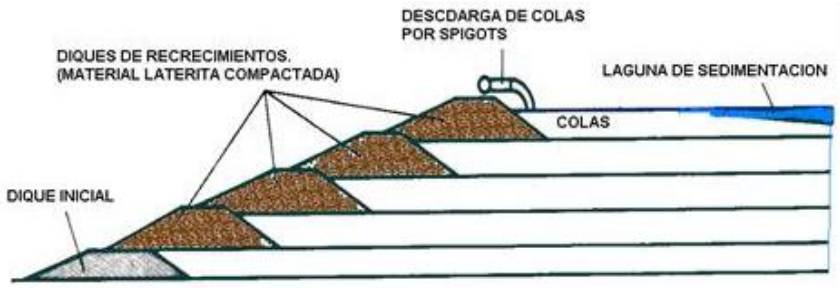

Figura 3. Sección transversal del método constructivo empleado aguas arriba, Hernández, T. 2015

En los años 70 se detienen las operaciones de deposición de las colas al existir problemas ingenieriles que impedían el recrecimiento de los diques sin poner en riesgo la integridad física de la presa. Las colas depositadas en la presa se componen del residuo del proceso de lixiviación ácida a presión (HPAL) de la extracción de níquel y cobalto. Las menas explotadas provienen de las zonas limoníticas.

Los residuos sólidos son mezclados con agua, transportados por tuberías en forma de pulpa y depositados de forma regular. Los tubos de descarga se distribuyen cada 25 metros (ver Figura 4) en todo el perímetro de la presa de colas; para garantizar un mejor aprovechamiento de la capacidad de la presa. El pH de la pulpa HPAL es ácido, con valores entre 4 - 5; las características de las colas son areno arcillosa, con predominio de los limos. Los residuos están compuestos mayoritariamente por óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mg, entre otros elementos.

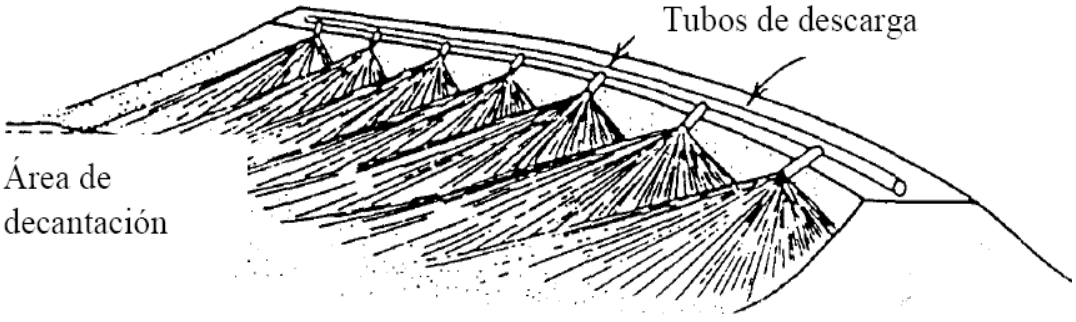

Figura 4. Método de distribución de las colas con la utilización de tubos de descarga, según ICOLD, 1989

1.3 Mecanismos de fallo de presas de colas

La rotura de una presa de colas y el vertido de estas al medio, puede tener consecuencias catastróficas; por lo que surge la necesidad de conocer la forma en que se produjeron históricamente. Estos antecedentes constituyen una referencia necesaria para aprovechar esta experiencia para la identificación y prevención de los riesgos en las presas de colas. Los resultados obtenidos del análisis de 251 casos de fallos y accidentes en presas de residuos mineros, recopilados en el Boletín 121 del ICOLD, muestran que estas se producen tanto en las presas que están en operación como en las inactivas o abandonadas, (Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2007).

Las principales causas de fallo identificadas en estos estudios son las siguientes: deslizamiento del talud, terremoto, sobrepaso, problemas de cimentación, tubificación, fallos por problemas en las estructuras auxiliares, erosión del dique, subsidencias o colapso del terreno. Las presas con mayor ocurrencia de fallos son las que se construyen por el método “aguas arriba”. En la Figura 5 se muestran incidentes de presas de colas por mecanismos de fallas y su relación al método constructivo, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008.

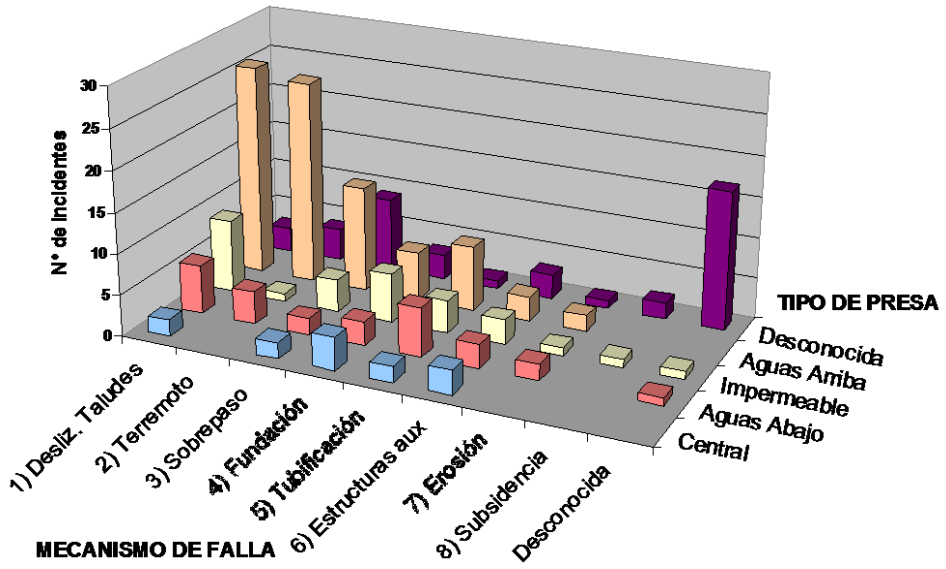

Figura 5. Incidentes de Presas de colas por mecanismos de fallos y su relación al método constructivo, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008

Las mayores causas de fallo de presas inactivas están dadas por deslizamiento del talud, terremoto y sobrepaso. El principal problema que favorece el proceso de fallo es la existencia de un alto grado de saturación en los residuos mineros tecnológicos almacenados en las presas. Las consecuencias de estos fallos se reflejan en grandes pérdidas económicas, degradación y contaminación del medioambiente y en algunos casos, pérdidas de vidas humanas.

1.3.1. Deslizamientos

El deslizamiento de un talud ocurre cuando los esfuerzos de corte en una superficie que delimita un bloque de suelo, exceden la resistencia al corte del material. Los eventos que determinan el inicio del deslizamiento pueden ser de diferente naturaleza. En particular, para las presas de colas, se han identificado tres situaciones que comúnmente desencadenan un deslizamiento de talud:

1. Elevación de la superficie freática y su aproximación al talud.
2. Desarrollo de presiones de poro durante trabajos de recrecimiento y
3. Licuefacción de las zonas saturadas de la presa de colas debido a una acción sísmica.

El desarrollo de presiones de poro está relacionado con el ritmo de recrecimiento excesivo, que no permite la disipación de presiones de poro o por el tránsito de maquinaria pesada, (Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008). Los estudios anteriores han identificado como la causa más frecuente de fallo el deslizamiento del talud de la presa (Ver figura 5).

En la Figura 6 se muestra la zona de mayor inestabilidad del talud de una presa de cola por aproximación del nivel freático, debido a la elevación del nivel de agua en la laguna de decantación y su desplazamiento hacia la zona de playa.

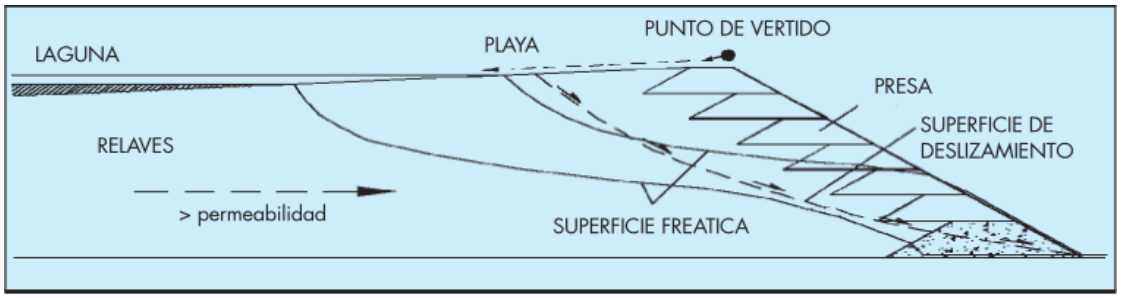

Figura 6. Deslizamientos provocados por ascenso del nivel freático, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008

1.3.2. Sismicidad

El análisis de la sismicidad como mecanismo de fallo, activado a través de la ocurrencia de terremotos, se ejemplifica mediante el estudio del colapso de la presa El Cobre con altura de 35 m, ubicada en Chile, inactiva por periodo de dos años, en su momento de fallo sólo se usaba esporádicamente como depósito temporal de agua favoreciendo que el nivel de saturación en el depósito se mantuviera elevado, aun cuando el clima de la región se mantenía relativamente seco. El método constructivo empleado fue el de aguas arriba.

El terremoto de La Ligua ocurrido el 28 de marzo de 1965, de magnitud 7.5 grados en la escala de Richter, con epicentro localizado a 70 Km, a una profundidad focal 60 Km, provocó el fallo de la presa El Cobre por licuación de los relaves. El desplazamiento por el valle (12 Km) de alrededor de un millón de metros cúbicos de lodo, provocó la destrucción de un asentamiento poblacional ubicado aguas abajo de la presa y la muerte de 300 personas. La velocidad de la avalancha se estimó en unos 20 Km/h, a pesar de que la pendiente del terreno natural era bastante baja, sólo unos 3º. El manejo incorrecto del agua dentro de la presa, en este caso de estudio, jugó un papel fundamental en la ocurrencia del fallo, combinado con la actividad sísmica.

1.3.3. Licuefacción

La licuefacción de suelo describe el comportamiento de suelos que, estando sujetos a la acción de una fuerza externa (carga), en ciertas circunstancias pasan de un estado sólido a un estado líquido, o adquieren la consistencia de un líquido pesado. Este fenómeno es frecuente que ocurra en suelos granulados sueltos saturados o moderadamente saturados con un drenaje pobre.

El fenómeno de licuación de materiales granulares (no plásticos) se explica por la tendencia de estos a reducir su volumen de poros cuando se les somete a deformaciones de corte cíclicas. En un material saturado estos cambios de volumen ocurren a expensas de expulsar agua en los poros dependiendo de la permeabilidad. El incremento de la presión del agua puede estar asociado con la baja permeabilidad donde la distancia a las fronteras de drenaje es grande, o con la rapidez de ocurrencia de las cargas y deformaciones.

Este aumento de la presión del agua intersticial tiene como efecto la disminución de la resistencia al deslizamiento entre partículas, hasta el punto de hacer que el material fluya como un líquido viscoso, de alta densidad (Oldecop, L., et. al. 2008).

1.3.4. Problemas en la cimentación

El análisis de los fallos por problemas en la cimentación se ejemplifica mediante el estudio del caso del fallo de la presa de Aznalcollar (1998) (Ver Figura 7). La serie de fenómenos que contribuyeron a que el fallo ocurriera, estuvieron relacionados con la cimentación seleccionada para la construcción de la obra. La presa es de tipo anular, con recrecimiento hacia aguas abajo y una pantalla impermeable de arcilla en su cara de aguas arriba.

Figura 7. Rotura de la Presa de Aznalcollar, 1998. (Foto tomada de Oldecop. L.)

El suelo de cimentación estaba constituido por una delgada capa aluvial de aproximadamente 4 metros de espesor; depositada sobre arcillas marinas carbonatadas, con un espesor mayor a 60 m. Las propiedades geológicas y mecánicas de estas arcillas, conocidas como “arcillas azules”, fueron determinantes en el mecanismo de fallo. Las

pruebas de ensayo al corte directo de estas arcillas, muestran un comportamiento extremadamente frágil, con una rigidez inicial elevada, un pico de resistencia muy agudo y una caída de resistencia abrupta.

La permeabilidad de la arcilla es muy baja, entre 2 y $7x10^{-9}$ cm/s (Alonso y Gens, 2006). La superficie de deslizamiento, plana con una ligera inclinación (2°) en la dirección del movimiento, se desarrolló en las arcillas frágiles de la fundación, a 13 metros por debajo de la superficie natural del terreno. Los factores que probablemente contribuyeron al fallo (Alonso y Gens, 2001, Olalla y Cuellar, 2001), relacionados con el cimiento, se mencionan a continuación:

1) La presencia de planos de estratificación, que determinaron el mecanismo de deslizamiento,

2) La fragilidad, que probablemente provocó un mecanismo de fallo progresivo,

3) La baja permeabilidad, que impidió la disipación de las presiones de poros generadas por la construcción de la presa.

En general, los materiales que presentan un pico de resistencia seguido de una pérdida de resistencia, pueden desarrollar lo que se denomina fallo o rotura progresiva. Ésta consiste en que, en el material de una cierta zona de la estructura que se encuentra sometida a mayores tensiones o deformaciones que el resto, se supera la resistencia de pico.

En esta zona se produce una inestabilidad local, ya que, si la deformación aumenta, la resistencia continúa disminuyendo. Por lo tanto, para restablecer el equilibrio, el exceso de tensión debe ser transferido a zonas vecinas; siempre y cuando no se supere la resistencia de pico de lo contrario se inicia una rotura en cadena, que puede terminar en una rotura global de la estructura. Los materiales frágiles son más propensos a desarrollar este tipo de mecanismo ya que se necesitan deformaciones (o desplazamientos) relativamente pequeños para hacer que el material supere el pico de resistencia (Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008).

1.3.5. Tubificación

Los procesos de tubificación provocan mecanismos de fallos que se inician por afloramiento de agua freática en un talud, lavado de partículas hacia materiales más gruesos o el exterior. La pérdida de material genera un proceso de erosión retrógrada, que amplía la vía de agua, y, por lo tanto, el caudal y la capacidad de provocar más erosión

El proceso causa la desestabilización del talud de la presa, lo que provoca la aparición de chimeneas o deslizamientos y se genera una brecha. El aumento de las tensiones de corte sobre las colas provoca su licuefacción estática y el flujo a través de la brecha.

1.3.6. Erosión

Las propiedades de los materiales que componen los diques, las características pluviométricas de la región y la no existencia de una protección de los taludes, favorecen la acción de la erosión superficial de los taludes, lo que provoca la presencia de surcos y cárcavas que arriesgan la estabilidad de la obra.

El diseño de las presas de colas considera que las aguas no deben ser vertidas, por la carga contaminante asociadas a estas. Esta consideración, induce la existencia de grandes volúmenes de aguas acompañantes de las colas, más las aportadas por las lluvias. El agua es uno de los agentes fundamentales en los procesos erosivos.

1.3.7. Fallo de estructuras auxiliares

La bibliografía consultada refiere que la mayor cantidad de incidentes originados en las estructuras auxiliares se deben a fallos en los sistemas de decantación del agua de la presa. En las presas donde se utilizan los sistemas de decantación del agua, a partir de tuberías que corren por el fondo del depósito que conducen el agua desde la base hacia el exterior, es frecuente el fallo de estos conductos. Estas, provocan filtraciones de agua desde la tubería hacia los residuos mineros con los consiguientes efectos indeseables de humedecimiento y elevación del nivel freático; o la creación de una vía de escape para los residuos mineros de poca consistencia.

1.3.8. Subsidencia

Los reportes de fallos de presas de colas por subsidencia son escasos, en la colección de Boletín 121 del ICOLD (2001) sólo se registran tres casos de un total de 221 reportados. Estos fallos por subsidencia están asociados a la actividad minera subterránea, donde por proximidad o por condiciones geológicas favorables, en un cierto momento llegan a afectar a los depósitos de colas en superficie. En dos de los casos registrados, Mulfilira (Zambia) y Atlas (Filipinas), el fallo consistió en el escape de colas licuadas hacia galerías subterráneas en donde se realizaban actividades de extracción (Oldecop, L. y Rodríguez, R, 2008).

En cambio, el caso de la presa de Iwiny (Polonia), construida a través de un valle, parece ser un auténtico fallo por subsidencia de la cimentación (ICOLD, 2001). El fallo ocurrió en el año 1967 y la información publicada al respecto es escasa. La construcción de una galería subterránea, por debajo de la posición del depósito de colas desde aguas arriba, provocó una inestabilidad en la cimentación de la presa. En el momento de ocurrencia del fallo, el extremo de la galería se encontraba a 200 metros del eje de la presa, próximo a una zona de fallo de unos 20 m de espesor.

La combinación de las actividades de excavación subterránea y las filtraciones desde la superficie hacia la galería, incrementadas por el bombeo de agua para mantenerla en seco, provocaron que el cimiento de la presa fuera arrastrado hacia la zona de fallo. Esto provocó la subsidencia de la fundación de la presa y la aparición de una brecha en la misma, que provocó el vertido de 4,6 millones de metros cúbicos de colas y la muerte de 18 personas.

1.3.9. Actividad antrópica

Uno de los mecanismos de fallos lo constituye la acción del hombre. Desde el uso de suelos, las construcciones de la red vial y el incumplimiento de las normas de construcción provocan el incremento de fallos de las obras por deslizamiento. La presa de Tapo Canyon (Ver Figura 8) de 24 m de altura, ubicada en California, construida por el método aguas

arriba; se utilizaba para el almacenamiento de residuos finos provenientes del lavado de áridos, colapsó durante la ocurrencia del terremoto de Northridge California, 1994.

Figura 8. Vista aérea de la presa de Tapo Canyon previa a su rotura (izquierda) y rotura de la presa causada por el Terremoto de Northridge en 1994 (derecha) (Foto de Northridge Collection, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley

La presa se había iniciado en la depresión de una antigua cantera. Esta llevaba dos años inactiva al momento del fallo. Sin embargo, en la mitad este se continuó con el lavado de los residuos de camiones mezcladores de hormigón, hacia la mitad oeste del depósito se localizaba una laguna en contacto directo con la presa. Esta acción provocó la saturación de los diques de contención y unido al factor disparador, la ocurrencia del terremoto indujo la licuación del material de la presa, que se encontraba saturado debido a la proximidad de la laguna y las actividades de lavado. Los residuos licuados se desplazaron por una brecha de unos 60 m de ancho. El fallo implicó el flujo de una gran cantidad de residuos a lo largo de 180 m aguas abajo (Harder y Steward, 1996). Afortunadamente, por estar ubicada en una zona despoblada, no provocó víctimas ni otras pérdidas económicas importantes.

1.4 Características regionales e Ingeniero-Geológicas del área de estudio de la Presa de Colas Inactiva de Moa

El municipio de Moa tiene una extensión territorial de 732.6 km^2. Se encuentra ubicado en la provincia Holguín, al noroeste de Cuba Oriental. El límite hacia el Este es con el

municipio Baracoa, separados por el río Jaguaní; por el Sur limita con el municipio Guantanamero de Yateras; por el Oeste con los municipios de Frank País y Sagua de Tánamo y por el Norte con el estrecho de Bahamas en el Océano Atlántico. Próximos a sus costas se encuentran los cayos Moa Chico y Moa Grande situados frente a la Ciudad de Moa y Cayo del Medio en la Bahía de Yamanigüey.

1.4.1. Localización geográfica del área de estudio

La presa de colas se ubica en la provincia Holguín, municipio Moa, al sureste de la ciudad de Moa, al suroeste del puerto (a unos 2500 m aproximadamente), al oeste de las instalaciones industriales de la ECPSA y al este de la empresa eléctrica del municipio Moa (Figura 9), ocupando un área de 45310 m^2 aproximadamente.

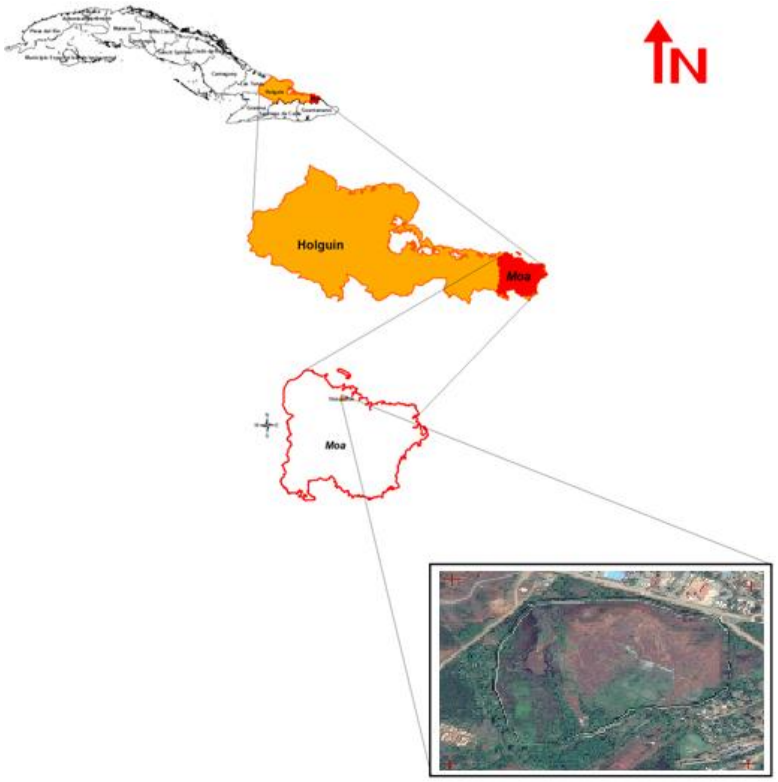

Figura 9. Esquema de ubicación geográfica del área de estudio

1.4.2. Clima

El clima de la zona es del tipo tropical húmedo, con abundantes lluvias, influenciado por la orografía. Las montañas del grupo Sagua-Baracoa sirven de barrera a los vientos Alisios del noreste, los cuales descargan toda su humedad en forma de abundantes precipitaciones en la parte norte. La distribución de las precipitaciones se caracteriza por dos períodos de lluvia, (Mayo - Junio) y (Septiembre - Enero) y dos períodos de seca (Febrero - Abril) y (Julio - Agosto). En un año, la precipitación media es 1624 mm y según los análisis estadísticos de 21 años (1989–2009) el total anual varía entre 767 – 3560 mm. La cantidad de días con lluvias anuales que se registran en la serie analizada para cada pluviómetro, manifiestan una regularidad cada cuatro años, en que existe un ascenso en la cantidad de días lluviosos.

Los períodos húmedos comprendidos entre los meses de septiembre - enero con un promedio de lluvia que oscila entre 168 - 336 mm y mayo - junio con un promedio de 149 mm; y períodos secos que se dividen entre los meses de febrero, marzo, abril con un promedio de lluvia de 94 mm y los meses de julio y agosto con un acumulado promedio de 100 mm de precipitaciones. La temperatura media anual oscila entre 21.5 °C y 30.41 °C, siendo los meses más calurosos desde julio hasta octubre y los más fríos de diciembre a marzo; los meses más lluviosos mayo, octubre, noviembre y diciembre y los más secos marzo, julio y agosto.

1.5 Hidrografía del medio y su impacto antrópico

1.5.1. Régimen de lluvias

La región de Moa se ha caracterizado por un intenso régimen de lluvias asociado con la interacción de la zona costera y las zonas montañosas. Los registros de lluvias en el territorio han reportado valores de hasta 754 mm en el mes de noviembre de 2017. Las precipitaciones atmosféricas pueden constituir un detonante de fallo si estas no son adecuadamente controladas en el interior de la presa de colas.

Tabla 1. Estadística de las precipitaciones, periodo 2015 al 2017

Mes	Año 2015 (mm)	Año 2016 (mm)	Año 2017 (mm)
Enero	169.5	359.9	35.6
Febrero	279.1	231.7	70.4
Marzo	175.8	96.2	436.9
Abril	78.1	137	51.4
Mayo	462.1	258.5	175.9
Junio	7.2	70.7	23.6
Julio	37.4	141.2	69.8
Agosto	88.2	102.9	310.1
Septiembre	63.6	118.4	314.0
Octubre	78.5	359.8	194.0
Noviembre	406.0	252.4	754.3
Diciembre	114.3	162.2	380.8
Promedio Anual	**163.3**	**190.9**	**234.7**

Las mediciones de las precipitaciones de los últimos tres años (2015-2017), obtenidas de los registros de los pluviómetros ubicados en el municipio (Tabla 1), muestran que la zona de Moa está influenciada por la acción del cambio climático. Se evidencia el impacto del huracán Matthew en octubre del 2016 con un incremento de las precipitaciones en ese mes en comparación con los años 2015 y 2017. En el análisis estadístico se muestra, además, un aumento en el régimen de lluvia en los últimos meses de 2017, por lo que se registran 754.3 mm en el mes de noviembre y 380.8 mm en diciembre.

1.5.2. Escurrimiento superficial

El drenaje natural superficial y subterráneo, unido a las intensas precipitaciones propician la erosión hídrica en forma: laminar, en surcos y en cárcavas. La magnitud de la erosión de los taludes de la presa de colas es elevada, en forma de surcos y cárcavas de gran profundidad. Las cárcavas cortan los estratos de aluviales de la base de la presa de colas, y en forma de erosión vertical y horizontal que acelera el proceso de degradación del material que forma el talud. El arrastre de las aguas hacia el interior de la presa ha incrementado la vulnerabilidad, lo que arriesga la integridad física del dique de contención.

1.5.3. Geomorfología del territorio

El relieve de Cuba oriental es el reflejo de la alta complejidad geólogo estructural resultante de la acción de procesos compresivos durante la etapa Mesozoica y el Paleógeno, a los cuales se han superpuesto desplazamientos verticales, oscilatorios, diferenciados e interrumpidos, así como la separación en bloques del territorio (Rodríguez, A. 1998) (Figura 10).

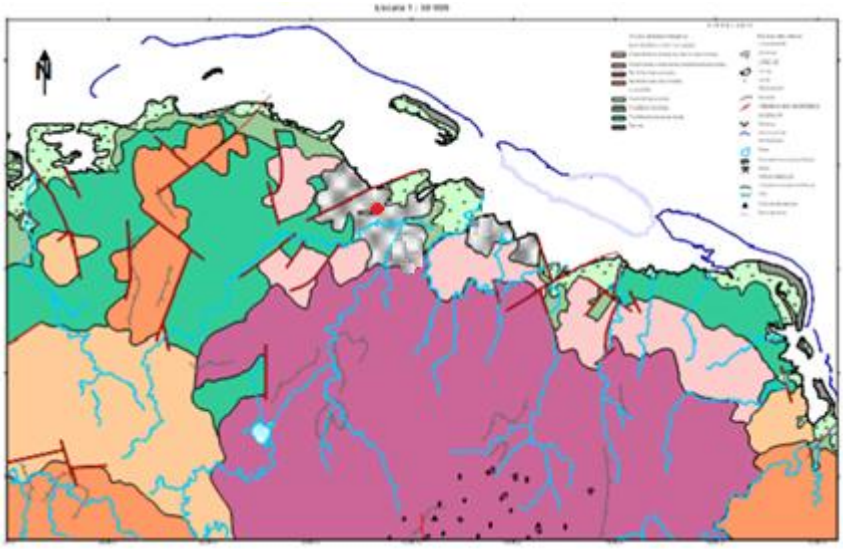

Figura 10. Versión digital del mapa geomorfológico. Escala original 1:50 000 (Modificado de Rodríguez A. 1998)

El relieve de Moa y sus áreas adyacentes está clasificado dentro del tipo de Horst y bloques que corresponden a los cuerpos de rocas ultrabásicas elevadas en la etapa

neotectónica a lo largo de dislocaciones antiguas y rupturas nuevas, poco o ligeramente diseccionados (Oliva, G. 1989).

A partir del mapa geomorfológico del Nuevo Atlas Nacional de Cuba se clasificó el territorio en dos zonas geomorfológicas fundamentales: la zona de relieve de llanura y la zona de relieve de montañas, con subtipos específicos que se mencionan a continuación. 1) Zona de llanuras, 2) Zona de montañas, 3) Zona de premontañas aplanadas ligeramente diseccionadas, 4) Zona de submontañas y premontañas ligeramente diseccionadas, 5) Zona de montañas bajas aplanadas ligeramente diseccionadas, 6) Zona de montañas bajas diseccionadas (Rodríguez, A. 1998).

1.5.4. Geología de la región

Cuba, estructuralmente, forma parte de la plataforma norteamericana, pero en su constitución geológica están presentes varias paleounidades tectónicas representativas de tres etapas del desarrollo del caribe: el arco de islas volcánicas del mesozoico, el del terciario y restos del protocaribe. Actualmente se encuentra separada de la placa caribeña por el sistema de fallas transformantes Oriente.

Según Iturralde-Vinent 1996, la geología de Cuba se caracteriza por la existencia de dos elementos estructurales fundamentales: el cinturón plegado y el neoautóctono. El cinturón plegado según el autor, está constituido por terrenos oceánicos y continentales deformados y metamorfizado de edad pre-Eoceno Medio, que ocupan en la actualidad una posición muy diferente a la original, representando las unidades geológicas que lo integran grandes entidades paleogeográficas que marcaron la evolución del Caribe Noroccidental. El autor divide al cinturón plegado en unidades continentales y unidades oceánicas.

Las unidades oceánicas están constituidas por las ofiolitas septentrionales, las rocas del arco de islas volcánicas del Cretácico (Paleoarco), las secuencias de las cuencas de *piggy back* del Campaniense Tardío-Daniense, el arco de islas volcánico del Paleógeno y las rocas de las cuencas de *piggy back* del Eoceno Medio-Oligoceno. El neoautóctono está constituido por materiales terrígenos carbonatados poco deformados del Eoceno Superior

Tardío al Cuaternario que cubren discordantemente las rocas del cinturón plegado (Figura 11).

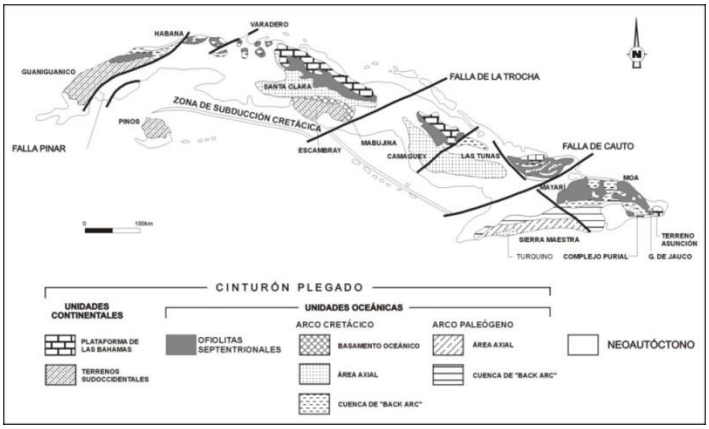

Figura 11. Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoautóctono (tomado de Iturralde-Vinent, M.A. 1996)

Cuba Oriental, desde el punto de vista geológico, es la región al este de la falla Cauto. En esta porción de la isla las ofiolitas están asociadas a la Faja Mayarí Baracoa y han sido interpretadas como un sistema de cuencas de ante arco ubicado paleogeográficamente entre el margen Cretácico de la plataforma de Bahamas y el arco volcánico de Las Antillas, los afloramientos están separados en tres complejos: Mayarí-Cristal, Moa-Baracoa, Sierra del Convento (Iturralde-Vinent, M.A. 1996).

El complejo ofiolítico Moa-Baracoa ocupa un área de 1500 km^2, muestra un corte completo del complejo ofiolítico formado por peridotitas con texturas de tectonitas, cúmulos ultramáficos, cúmulos máficos, diques de diabasas y secuencias efusivo-sedimentarias. Existen numerosos cuerpos de cromitas, sill de gabros y diques de gabros y de pegmatoides gabroicos localizados en la parte alta de la secuencia mantélica en la zona de transición con los cúmulos (Proenza, J. 1998) (Figura 12).

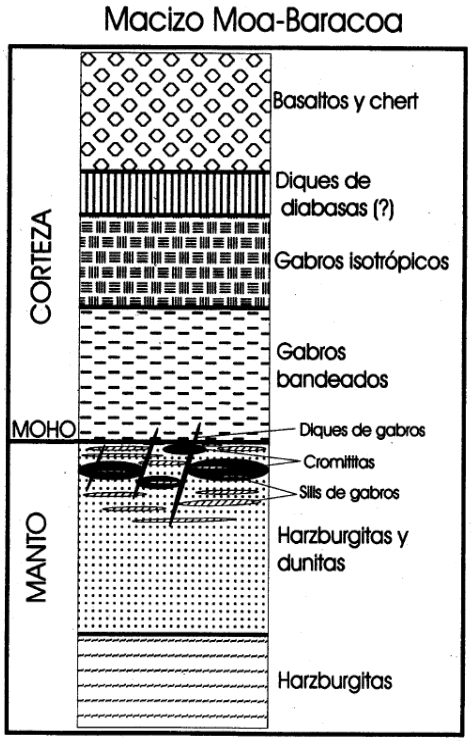

Figura 12. Columna sintética ideal del complejo ofiolítico Moa-Baracoa según Proenza, J. 1998

En el macizo predominan las harzburguitas y peridotitas serpentinizadas, en menor medida están presentes dunitas, dunitas plagioclásicas, wehrlitas, lhersolitas y piroxenitas, según el diagrama de Streckeinsen, 1976, (Figura 13). El complejo ultramáfico se ha datado con una edad de Jurásico-Cretácico Temprano (Iturralde-Vinent, M.A. 1996). Se considera que las rocas ultramáficas serpentinizadas presentan un espesor superior a los 1000 m, en forma de escamas tectónicas muy fracturadas (Fonseca *et al*., 1985).

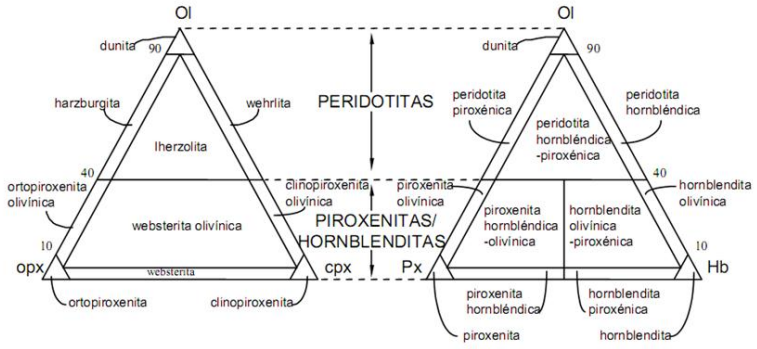

Figura 13. Diagrama de Streckeinsen, 1976

Sobre las rocas del complejo Moa –Baracoa se desarrollan cortezas de meteorización lateríticas donde se localizan importantes yacimientos de níquel y cobalto de la región. Los horizontes de la corteza desarrollados sobre rocas ultrabásicas, son clasificados en seis categorías locales (Arioza, 2002, p. 88), las que se muestran a continuación, junto a sus equivalentes aceptados internacionalmente:

- *OICP: Zona de ocres inestructurales con concreciones ferruginosas (Ferricrete and limonitic overburden)*
- *OI: Zona de ocres inestructurales sin concreciones ferruginosas (laterite rouge, limonite)*
- *OEF: Zona de ocres estructurales finales (ferruginous saprolite, saprolite fine, laterite jaune)*
- *OEI: Zona de ocres estructurales iniciales (saprolite, earthy saprolite)*
- *RML: Zona de rocas madres lixiviadas (rocky saprolite, bouldery saprolite)*
- *RMA: Zona de rocas madres agrietadas, poco meteorizadas (parent rock, bedrock)*

1.5.5. Geología del área de estudio

El marco geológico donde se encuentra emplazada la presa de colas se caracteriza por la presencia de los depósitos del Cuaternario que constituyen una cobertura continua de la cimentación de la presa; y en menor medida hacia el sur de la presa se localiza la corteza laterítica sobre las rocas del complejo ofiolítico. En la Figura 14 se muestra el mapa geológico del área de estudio, donde se representan las principales formaciones geológicas presentes.

Según Rodríguez, A. 1998, los depósitos cuaternarios están constituidos por calizas organodetríticas con gran contenido de fauna, donde predominan los moluscos contemporáneos. Aparecen también aleurolitas calcáreas, arenas margosas y arcillas. Los depósitos ubicados en los márgenes, cauces y desembocaduras fluviales están

constituidos por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, aleurolitas y arcillas derivadas de la erosión fluvial.

El área de afloramiento de los depósitos cuaternarios constituye una cobertura prácticamente continua en forma de franja a lo largo de la costa y discontinua en las partes interiores. El relieve de estos depósitos, se desarrollan en zonas de llanuras costeras débilmente onduladas, en zonas pantanosas parálicas y en las desembocaduras y cauces de los ríos sobre llanuras irregulares.

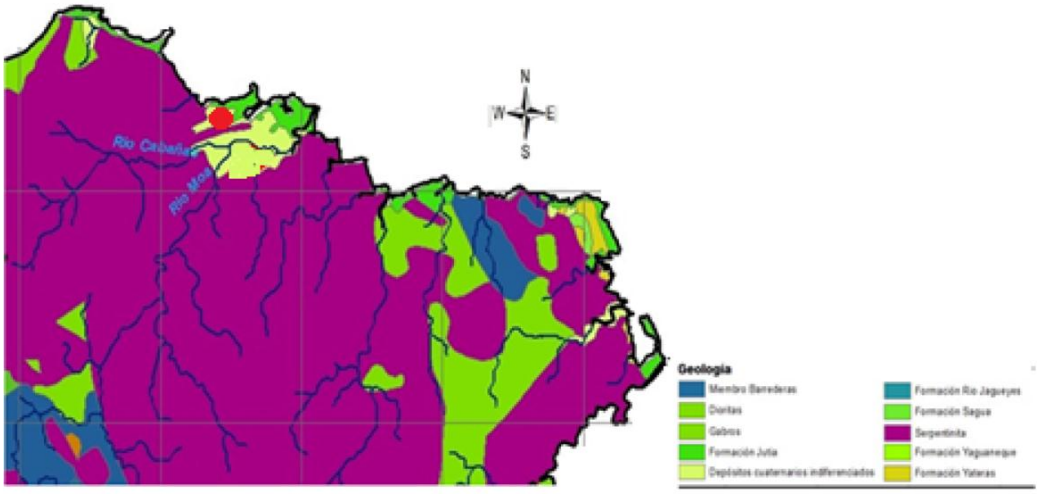

Figura 14. Esquema geológico del área de estudio. Modificado de IGP, 2001

1.5.6. Tectónica del área de estudio

El Bloque Oriental Cubano comprendido desde la falla Cauto-Nipe hasta el extremo oriental de la isla, presenta una tectónica caracterizada por su alta complejidad, dado por la ocurrencia de eventos de diferentes índoles que se han superpuesto en el tiempo y que han generado estructuras que se manifiestan con variada intensidad e indicios en la superficie (Rodríguez, A. 1998). En los estudios tectónicos precedentes del territorio se reconoció cuatro sistemas de fallas que cortan las rocas de la asociación ofiolítica y que corresponden a cada uno de los períodos de la evolución geotectónica.

1.5.7. Sismicidad del área de estudio

Aunque no se tienen reportes históricos de la ocurrencia de un terremoto fuerte con epicentro en la localidad de Moa, no se niega la posibilidad de su ocurrencia en épocas anteriores, esto se debe a la no existencia de una infraestructura socioeconómica y cultural que permitiera el archivo de estos datos. Es de interés señalar, que en Moa, se reporta la percepción de muchos terremotos, algunos de los cuales tuvieron su epicentro al norte de La Española.

En 1944, se reportó un sismo con una intensidad máxima de 5.0 MSK en la ciudad de Sagua de Tánamo, su epicentro pudo estar en los 20.50 de latitud norte y los 75.70 de longitud oeste (cerca de Pinares de Mayarí) y su magnitud alcanzar un valor del orden de los 4.7 Richter, que se puede considerar un sismo significativo para esta región (Instituto de Geología y Paleontología (IGP), Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIS) y Geocuba, 2008-2009).

El 20 de marzo de 1992 ocurre un terremoto de magnitud 4.3 en la escala de Richter, a 15 Km. de la costa al este de la ciudad de Moa, en los 20° 48' de latitud norte y los 74° 48' de longitud oeste frente a la localidad de Cupey, a una profundidad de 5 km. Este sismo con una intensidad máxima de VI en la escala MSK en Moa, produjo agrietamientos de paredes en escuelas y edificios de viviendas de esta ciudad. Este es el primer terremoto con estas características que se registra en las cercanías de Moa.

En el período desde 1992 hasta el 19 de abril de 1998 se reportaon tres sismos percibidos por la población de Moa. El primero de éstos, ocurrió el 2 de marzo de 1994 (Ms = 5.6), al norte de República Dominicana, el segundo ocurrió el 13 de septiembre de 1996 (Ms = 3.3) y el otro tuvo lugar el 19 de abril de 1998 (Ms = 3.5), en el macizo Moa - Baracoa, a unos 20 km. al sur de Moa, cuya réplica perceptible tuvo una intensidad de 3.0 grados MSK (Chuy, T. 1999).

El 28 de diciembre de 1998 se registró un fuerte temblor (Ms = 5.5) ubicado al noreste de Moa que generó intensidades de hasta VI grados MSK, provocó agrietamiento de paredes en viviendas de mampostería y edificios multifamiliares, y fue percibido por toda la

población como una sacudida fuerte del terreno. La ocurrencia de este sismo afectó la presa de colas inactiva de Moa.

En el periodo del 28 de diciembre de 1998 hasta diciembre de 1999 se registraron 24 eventos perceptibles y un total de más de 1200 réplicas, agrupadas fundamentalmente en los sectores señalados anteriormente. Hasta el 4 julio de 1999 se reportaron 16 eventos perceptibles y fueron registrados por nuestra red de estaciones 437 temblores de diferentes rangos energéticos (Arango, E. et al. 2009).

La actividad sísmica después de las series de terremotos de los años 1998-1999 ha continuado de manera significativa en la región del noreste holguinero, una de las zonas sísmicas del territorio nacional más activas del país, prueba de esto es que durante el año 2005 se registraron un total de 101 sismos, de ellos uno de 3.7 de magnitud en la escala de Richter, el de más alta energía registrado en ese año en todo el país. Los datos estadísticos de los sismos ocurridos en las zonas de monitoreo de la región oriental y en particular en Moa – Purial hasta el año 2014 reflejan que estas zonas han continuado activas (Figura 15).

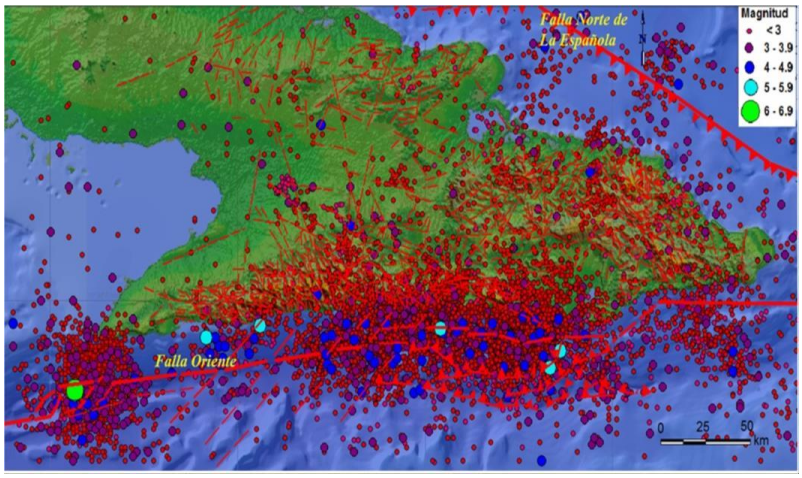

Figura 15. Mapa sismo tectónico de la región oriental. Tomado de Tesis Doctoral de Arango, E., CICESE, 2014

1.5.8. Suelos

En la región aparecen suelos ferríticos – púpura de la serie Nipe, de composición arcillosa y alto contenido de perdigones de hierro, le siguen en importancia los suelos escabrosos,

poco profundos, esqueléticos de escaso desarrollo en el perfil y alto contenido de hierro. En ambos el drenaje es bueno y en ocasiones excesivo, lo que unido a sus características físico – mecánicas y las intensas precipitaciones que ocurren en la zona provoca una fuerte erosión hídrica, laminar y en cárcavas.

1.5.9. Recursos minerales

Moa es la región minera más importante de Cuba con 10 yacimientos lateríticos de níquel y cobalto; las reservas probadas de mineral industrial (níquel más cobalto) son de 800 millones de toneladas y se han estimado por exploración geológica en unos 3000 millones de toneladas, por lo que constituye segunda reserva mundial de níquel y primera de cobalto.

En esta zona existen también varios e importantes yacimientos de cromo, que constituyen las mayores reservas del continente americano con 6.5 millones de toneladas, y uno de los más importantes yacimientos de zeolitas de Cuba con más de 20 millones de toneladas.

1.5.10. Infraestructura económica

El municipio de Moa se comunica por carretera con todo el país. Por vía aérea el territorio tiene comunicación con la ciudad de la Habana. Existe además un puerto marítimo que permite el atraque de buques de mediano calado. Económicamente la región está dentro de las más industrializadas del país, no solo por sus riquezas minerales, sino también por contar con dos plantas procesadoras de níquel, la Comandante Ernesto Che Guevara y la Comandante Pedro Sotto Alba, con capacidades de diseño original de 30 mil y 24 mil toneladas respectivamente de concentrados de Ni+Co al año, en estos momentos son objeto de trabajos de ampliación.

Existen otras instalaciones de apoyo a la metalurgia y la minería, tales como la Empresa Mecánica del Níquel, Centro de Proyectos del Níquel, la Empresa Constructora y Reparadora del Níquel. También existen otros organismos que tributan a la economía de la región, tales como, el establecimiento de la Empresa Geólogo Minera Oriente, la presa

Nuevo Mundo, el Tejar de Centeno, el Combinado Lácteo, entre otros. La agricultura se encuentra poco desarrollada, aunque se hacen esfuerzos para seguir fomentándola.

Conclusiones parciales

1. Existe un alto nivel de información de la temática a nivel internacional, pero con respecto a la documentación de la presa objeto de estudio es muy escasa y fraccionada.
2. Los suelos de cimentación están constituidos por estratos inestables, areno arcillosos de humedad y plasticidad de media a alta. Depósitos del Cuaternario, lo que incrementa el nivel de vulnerabilidad de la presa.
3. Los estudios de la sismicidad de la provincia de Holguín indican que la presa de colas inactiva se localiza en una zona activa de alta vulnerabilidad para el surgimiento de grandes deslizamientos, clasificada como de muy alta susceptibilidad.
4. En la presa existen evidencias de agrietamientos y asentamientos hacia el noroeste los que pueden estar asociados con la actividad sísmica reportada en el área.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Introducción

Los indicadores cuantitativos y cualitativos que señalan el nivel de alguna característica de un sistema, permiten evaluar la seguridad en un momento determinado y su progreso en el tiempo; tanto en elementos diferenciados, como en el conjunto de la obra.

El estudio de los principales mecanismos de fallos para presas de colas y el análisis de los factores condicionantes y disparadores de los peligros, permiten comprender las situaciones y fenómenos que afectan las condiciones de seguridad de estas obras. A través de dicho análisis se establecen los principales indicadores de fallos, los cuales manifiestan la aparición de dichos fenómenos y permiten evaluar su intensidad.

El objetivo de este capítulo es diseñar una metodología para realizar el análisis de vulnerabilidad al evaluar el comportamiento de estos indicadores a través del sistema de monitoreo aplicado en la presa de colas.

2.2. Etapas de la investigación

La presente investigación, para la evaluación de la vulnerabilidad de la presa de colas inactiva de Moa, se dividió como se muestra en la Figura 16 en tres etapas:

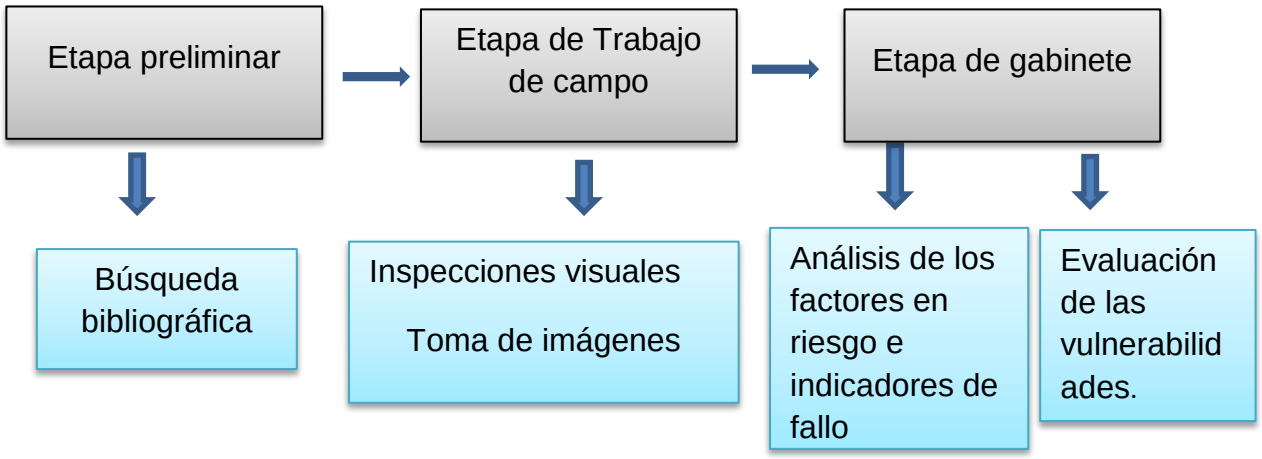

Figura 16. Organigrama de trabajo

2.2.1. Etapa preliminar

Búsqueda bibliográfica

La bibliografía analizada es muy escueta y fraccionada, se expresan resultados muy particulares o muy generales del tema. Durante el cumplimiento de esta etapa se consultaron informes, proyectos técnicos, guías técnicas, regulaciones ambientales y de seguridad, tesis de grado y doctorales, además de publicaciones y artículos relacionados con la temática tanto en el mundo como en Cuba.

Inspecciones visuales

Las visitas al campo constituyen el trabajo más significativo, pues a través del mismo se inspecciona la obra y se controla visualmente las condiciones reales y actuales de la misma. Proporciona además una caracterización cualitativa de los parámetros que se analizarán en la etapa del procesamiento de la información, principalmente respecto a la situación actual de la presa. Esta evaluación se realiza mediante las visitas al campo y el análisis de las condiciones geológicas, geotectónicas y ambientales de la obra y de toda la zona que la circunda.

2.2.2. Etapa de gabinete

Durante esta etapa se procesó toda la información acumulada y se dividió el trabajo de la siguiente forma:

1. Análisis de los indicadores de fallo y de los factores en riesgo.
2. Evaluación de las vulnerabilidades.

Análisis de los indicadores de fallo

El término “indicador” se refiere al resultado de una observación o rasgo que refleja y permite medir diferentes aspectos de una condición o componente del riesgo.

Los indicadores de fallos son entonces valores de referencia de los peligros, la vulnerabilidad o el riesgo mismo, o cualquier otro aspecto de una zona determinada, incluyendo tanto aspectos físicos como económicos, sociales y ambientales. Los indicadores de fallos en general permiten crear una “línea de base” sobre la cual pueden

hacerse comparaciones relativas o mediciones de procesos o cambios en el tiempo de cada uno de ellos.

Los indicadores de fallos se pueden obtener a partir de la información de bases de datos históricos, de la información de los ordenamientos territoriales, o mediante levantamiento directo de información en campo; con encuestas, entrevistas a personal de alta experiencia en la temática. Ver Figura 17.

Es posible también calcular indicadores como el de cumplimiento de las exigencias del código de construcciones vigente (como medida relativa de la calidad), el cual indica el grado en el que las edificaciones no cumplen con los requisitos del código de diseño y construcción sismo-resistente del país. Se calcula mediante una evaluación aproximada del comportamiento esperado en la obra, empleando para el efecto un nivel de peligro acorde con la normativa vigente, lo que permite evaluar en términos relativos el riesgo resultante con respecto a lo que se esperaría si se cumpliera con las normas.

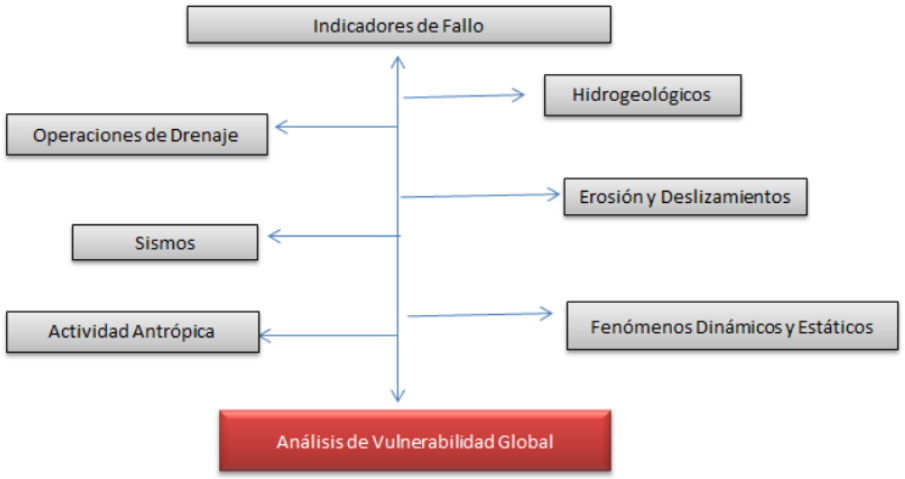

Figura 17. Flujograma para la determinación de la vulnerabilidad global

Análisis de los factores condicionantes y disparadores de los peligros en las presas de colas

El análisis de los factores condicionantes y disparadores de los peligros debe realizarse con profundidad debido a que el mismo constituye la información básica para la evaluación de las vulnerabilidades de la presa de colas inactiva de Moa.

A continuación, se detallan los factores condicionantes y disparadores:

Factor litológico: representa la composición de los materiales que intervienen en la construcción de la presa: suelos de cimentación, suelos como materiales de construcción de los diques y las colas.

Factor clima: se toman en consideración los indicadores que caracterizan la situación climática del medio y el territorio como son: lluvia, régimen de lluvias, temperatura y humedad. La observación está centrada en la influencia de la variabilidad del clima sobre los indicadores.

Factor hidrológico: representado por el balance hídrico en la presa de colas, el nivel freático, la existencia de cursos de agua y sistemas de drenaje, constituyen una herramienta clave para los cálculos de entradas, salidas y volúmenes almacenados de agua.

Factor sismo: representa aquellos indicadores que caracterizan la situación sismológica del medio: Intensidad y magnitud, la actividad tectónica constituida por las fallas activas y poco activas del territorio, y los movimientos que tienen lugar en el medio de baja e intensa magnitud.

Factor uso del suelo: representa el grado de uso del terreno.

La caracterización de los indicadores de fallos permite realizar una evaluación de las vulnerabilidades en dependencia del nivel de cumplimiento o no de los parámetros de construcción.

Factores en riesgos ante fallos de la presa de colas

Población: exposición de los seres humanos a eventos que induzcan pérdida o daños a los medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo.

Instalaciones: exposición de las instalaciones de importancia económica y social a sucesos peligrosos ante el colapso de la presa de colas.

Ambiental: susceptibilidad de la población, las instalaciones y el medio ambiente ante la ocurrencia de algún evento amansador.

Residuos almacenados: probabilidad de la pérdida de los recursos contenidos en las colas ante la ocurrencia de fallo en la obra.

2.3. Determinación de la vulnerabilidad de la presa de colas

Vulnerabilidad:

Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos. Ver Figura 18.

Figura 18. Flujograma para la determinación de la Vulnerabilidad Global

2.3.1. Evaluación de la vulnerabilidad por fallos en la presa de colas

1) Clasificación cualitativa de la vulnerabilidad global por cada grupo de eventos generadores de fallos, en cada zona y sus elementos estructurales y no estructurales. Wilches-Chaux (1993), identificaba diez componentes o niveles de la vulnerabilidad global en los desastres, que conducen a determinar los tipos de vulnerabilidad. Entre estos se encuentran el económico, social, político, técnico, ideológico, cultural, educativo, geológico, institucional y físico; en este último se sitúan las vulnerabilidades que se evalúan en las edificaciones: la estructural, la no estructural y la funcional.

El sistema propuesto considera los siguientes pasos para evaluar la vulnerabilidad global (VG):

1- Determinación de la vulnerabilidad física (VF),
2- Determinación de las vulnerabilidades complementarias (VC) y
3- Cálculo de la vulnerabilidad global (VG).

2.4. Vulnerabilidad física (VF)

El proceso se divide en el análisis de las siguientes vulnerabilidades:

A. Vulnerabilidad estructural.

B. Vulnerabilidad no estructural.

C. Vulnerabilidad funcional de la instalación.

2.4.1. Vulnerabilidad estructural de la presa de colas

Los factores de seguridad estáticos mínimos, se fundamentan en las normativas de seguridad de la CDA y el ICOLD que se muestran en la Tabla 2 debido a la no existencia de normativas de seguridad en Cuba para las presas de colas.

Tabla 2. Factores de seguridad mínimos

Casos analizados o casos típicos	Factor de seguridad mínimo
Estabilidad estática (después del cierre)	1.50

Análisis de la vulnerabilidad sísmica de la presa: Está basado en los datos geotécnicos, litografía, las cargas y/o aceleraciones sísmicas introducidas en el modelo de estabilidad.

Análisis de la vulnerabilidad hídrica de la presa: El objetivo principal de la gestión del agua es disminuir los impactos en las zonas aguas abajo de la presa de colas, al extender el tratamiento del sobrenadante y los escurrimientos. La actividad de gestión de agua, incluye lo siguiente:

- Evacuar rápidamente de manera segura y controlada las aguas resultantes del escurrimiento pluvial del área de embalse de las colas, para reducir los niveles de infiltración.

2.4.2. Vulnerabilidad no estructural de la presa de colas

Se valora la existencia de varias instalaciones como la empresa Eléctrica Municipal, Dirección de Educación, Oficinas y almacenes de tiendas TRD, Carpintería de la EMA, Empresa Constructora de Moa, un centro de suministro de combustibles de CUPET, la empresa Municipal de la Agricultura de Moa, red eléctrica, línea de comunicaciones, y la carretera que comunica a Moa con el resto del municipio y hacia las ciudades de Baracoa y Holguín.

2.4.3. Vulnerabilidad funcional y organizacional

Se definen los más importantes aspectos de la estabilidad de los accesos. Deben analizarse aspectos tales como:

- Resultado de los derrumbes parciales, destrucción de vías de acceso que impiden el tráfico de vehículos hasta la obra, influencia de la presa en la paralización de cualquiera de las obras de infraestructura del territorio, cómo puede ser la inutilización de las vías de acceso del municipio a causa de inundaciones y deslizamientos.

Después del análisis de los eventos de tipo progresivo que ocurren dentro del período de vida útil de la presa de colas se definen los niveles de la vulnerabilidad física en la presa de colas, con sus correspondientes porcentajes de afectación.

2.5. Vulnerabilidades complementarias

Las cuatro vulnerabilidades que se analizan para el cálculo de la vulnerabilidad complementaria (VC) de la presa de colas son:

- Vulnerabilidad ambiental y ecológica (VAE)
- Vulnerabilidad económica (VE).
- Vulnerabilidad social (VS).
- Vulnerabilidad científico-tecnológica (VCT).

La vulnerabilidad complementaria (VC) a diferencia de la física, es común para toda la presa, sus zonas y elementos estructurales y no estructurales, y es el promedio de las vulnerabilidades complementarias consideradas y se calcula por:

$$VC = \frac{VAE + VE + VS + VCT}{4} \quad , \quad (3.1)$$

En los casos de cada una de las vulnerabilidades complementarias, se registran las variables que más peso tienen en su evaluación y sus características, luego el valor final es el promedio de las correspondientes a cada variable, calculada por medio de la expresión siguiente:

$$V_J = \frac{V_1 + V_2 + \ldots + V_i}{N_i} \quad , (3.2)$$

Donde:

VJ – Vulnerabilidad promedio en %

V1, V2,…Vi – Vulnerabilidades por cada variable en %

Ni - Cantidad de variables evaluadas.

2.5.1. Vulnerabilidad ambiental y ecológica (VAE)

Las variables para evaluar esta vulnerabilidad ambiental y ecológica se fundamentan en las condicionales atmosféricas, del agua, y ecológicas y su valoración aparece en el Anexo 5.

2.5.2. Vulnerabilidad económica (VE)

El Anexo 1 contiene las variables características según el nivel de vulnerabilidad económica existente en la presa. Constituida por el acceso que pueda tener la empresa a los activos económicos (tierra, infraestructura, servicios, entre otros), refleja la capacidad para hacer frente a un desastre y está determinada, fundamentalmente, por el nivel de ingresos económicos de la actividad productiva y su impacto internacional. También se incluyen los efectos en el empleo y los niveles de ingresos para la población de la región cercana a la inversión.

2.5.3. Vulnerabilidad social (VS)

Los elementos a evaluar en la vulnerabilidad social aparecen en el Anexo 2, en ella se analiza el nivel de organización y participación que tiene la sociedad para prevenir y responder ante situaciones de emergencia. Mayor será la vulnerabilidad de una entidad si su cohesión interna es pobre, es decir, si las relaciones que vinculan a los miembros de la misma con el conglomerado social, no se afianzan en sentimientos compartidos de pertenencia y de propósito y que no existan formas organizativas que lleven esos sentimientos a acciones concretas.

2.5.4. Vulnerabilidad científica y tecnológica (VCT)

Es el nivel de conocimiento científico y tecnológico existe sobre los peligros de origen natural y tecnológico, especialmente los que trabajan directamente o los vinculados con la presa de colas. Además, evalúa el acceso a la información y el uso de técnicas para ofrecer mayor seguridad a los trabajadores frente a los peligros quienes deben estar informados sobre las medidas de prevención y mitigación, de la importancia de la vigilancia y monitoreo, para evitar el daño o el colapso de la misma, a fin de minimizar o reducir así los riesgos.

Esta vulnerabilidad es el primer reflejo de la falta de percepción de los peligros y riesgos potenciales. Los valores de las variables de la vulnerabilidad científico tecnológica se encuentran en el Anexo 3.

2.6. Vulnerabilidad Global

Para fines de la estimación o valoración del riesgo, la vulnerabilidad global (VG) se clasifica en cinco niveles: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, las tablas 3, 4 y 5 presentan la clasificación, descripción y valor de la vulnerabilidad global.

$$VG = \frac{P_F * VF + VC}{P_F + 1} \quad , (3.3)$$

Donde:

P_f – Peso ponderado de la vulnerabilidad física en la vulnerabilidad global, que depende de la importancia socio-económica de la inversión en estudio, Anexo 4.

VF – Vulnerabilidad física de un elemento, zona o la presa.

VC – Vulnerabilidad complementaria de la presa.

Conclusiones parciales

1. La metodología propuesta para la evaluación de la vulnerabilidad global se ajusta a las necesidades existentes en esta área del conocimiento.
2. Se proponen varios indicadores de fallos para definir el nivel de vulnerabilidad de la obra ante fenómenos hidrometeorológicos y sísmicos.

CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE LAS VULNERABILIDADES DE LA PRESA DE COLAS INACTIVA DE MOA

3.1. Introducción

En este capítulo se evalúa la vulnerabilidad de la presa de colas, se indican los sectores más vulnerables ante fenómenos meteorológicos y sísmicos; además se diseña un plan de reducción de desastres para la prevención, mitigación y la corrección de impactos generados ante fallos de la presa.

Las consultas bibliográficas y las visitas en el terreno permitieron evaluar las condiciones actuales de la presa con respecto a los parámetros de diseño y confirmar el insuficiente conocimiento de los niveles de vulnerabilidad de la presa de colas inactiva de Moa ante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos y sismos.

Las inspecciones visuales revelan que las colas depositadas no se ajustan a los requerimientos de diseño de los proyectos para la construcción de las presas de colas.

3.2. Factores en riesgo ante fallos de la presa de colas

Para la evaluación de los factores o elementos en riesgo se consideraron la susceptibilidad ante una amenaza u ocurrencia de fenómenos de origen natural, socio natural, antrópico no intencional y tecnológico que pueden provocar el fallo de la presa de colas. La presa de colas se encuentra próxima a una zona habitada y a diferentes infraestructuras de importancia económica y medio ambiental que pueden ser dañados ante la ocurrencia de algún fallo de la obra. Al evaluar la ubicación de la presa de colas, se determinaron los siguientes elementos en riesgo:

3.2.1. Población

La presa de colas limita hacia el sur con la comunidad Armando Mestre. En dirección este se ubica la comunidad 5 de diciembre, donde han construido viviendas en la parte superior del dique. El sector norte de la presa limita con fincas destinadas al uso agrícola.

3.2.2. Instalaciones económicas

En la zona norte de la presa se ubica la Dirección Municipal de la Empresa Eléctrica, de Educación, Oficinas y almacenes de tiendas CIMEX, Carpintería de la EMA, Empresa Constructora de Moa, un Centro de Suministro de Combustibles de CUPET en construcción, la empresa Municipal de la Agricultura de Moa, la empresa de Alquiler de Equipos Mineros CONSTRUIMPORT, redes eléctricas, líneas de comunicaciones, y la carretera que comunica a Moa con Baracoa y Holguín. (Figura 19)

Figura 19. Esquema de ubicación de las instalaciones económicas en riesgo, por fallo de la presa

3.2.3. Ambiental

Se analizó la susceptibilidad de la población, las instalaciones y el medio ambiente ante la ocurrencia de fallos en la presa de colas, convertida en un pasivo ambiental desde la década del setenta.

3.2.4. Residuos almacenados en la presa

La efectividad del mecanismo de clasificación depende de la relación sólido/agua con que se vierten las colas al depósito, a medida que aumenta la concentración de sólidos del material vertido (colas más espesas), la efectividad del mecanismo de clasificación disminuye. En concentraciones de sólidos de 16 % la clasificación se considera muy efectiva y para 38 % el mecanismo se inhibe por completo. En el caso de la presa inactiva de Moa se puede asumir que no existe una clasificación granulométrica debido a los altos por ciento de sólidos acumulados.

Esto sugiere que, para un mismo material y granulometría, la variación de la relación sólido/agua puede tener profundos efectos en la distribución de permeabilidades y por lo tanto en la posición de la superficie freática.

Las colas producidas por el proceso HPAL históricamente ha tenido un alto por ciento de sólido en la cola, los registros acumulados a partir del año 1994 muestran valores que oscilan entre 45 a 55 %. En la década del dos mil hasta el presente los valores de sólido en la cola han presentado una tendencia a disminuir, y alcanzan valores que promedian el 39 % en lo que va del año 2018. Los residuos o colas contenidos dentro de la presa constituyen un elemento económico en riesgo, por lo que se considera la composición química y mineralógica de estos residuos, que en futuros proyectos inversionistas pueden tener interés industrial.

3.3. Análisis de los indicadores de fallo según el trabajo de campo

Para la evaluación de las condiciones actuales de la obra se analizaron de forma general los siguientes indicadores de fallo:

3.3.1. Hidrológicos

En los trabajos de campo se pudo identificar la ausencia de aliviaderos para el control de las aguas pluviales, lo que ha provocado procesos erosivos muy intensos, constituyendo peligros que amenazan la seguridad de la presa.

El manejo de las aguas dentro de la presa es de vital importancia en la estabilidad de la obra. Actualmente no se evidencia un manejo apropiado de las aguas en la presa, los

sistemas de drenaje se encuentran obstruidos, lo que provoca la infiltración de las aguas, e incidiendo en la estabilidad de la obra.

El escurrimiento de las aguas hacia la parte norte de la presa (Figura 20) ha provocado un incremento de la humedad del talud y generar posibles deslizamientos. El arrastre de sedimentos ha incidido en el desplazamiento del espejo de agua hacia la parte norte del dique, creando la posibilidad de ocurrencia de sobrepaso por la disminución del borde libre; actualmente el área libre del dique hacia la parte norte alcanza aproximadamente 0,5 m.

La acción del agua ha provocado un incremento de los niveles de humedad en toda la zona circundante y en algunos sectores el dique ha sido fracturado. La sobresaturación del dique y las cargas hídricas han incrementado la vulnerabilidad de este.

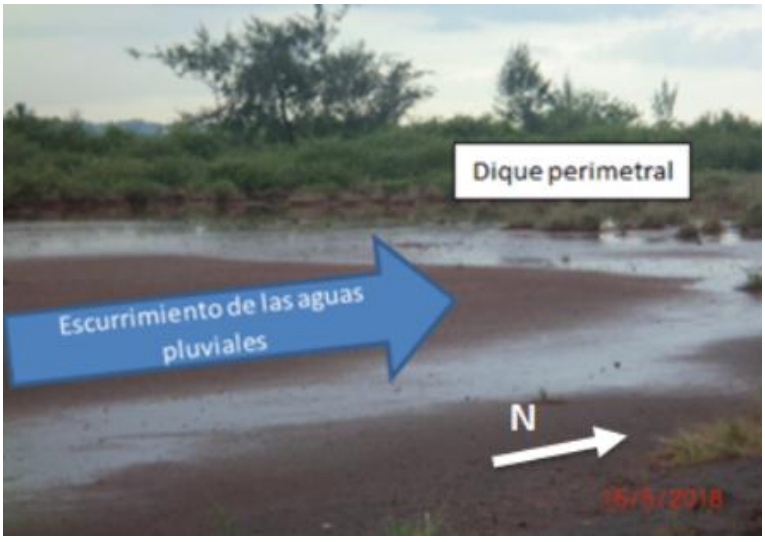

Figura 20. Escurrimiento de las aguas hacia la parte norte de la presa

3.3.2. Operaciones del drenaje

Las observaciones visuales permitieron reconocer y examinar las zonas determinadas en la construcción de la obra para el drenaje de las aguas (Figura 21), en las inspecciones se evidencia la obstrucción de las redes de drenaje y además que al ocurrir períodos de lluvia el escurrimiento de las aguas se efectúa hacia las zonas del dique perimetral, y en mayor medida hacia la parte norte. Esta situación actual puede conllevar a la ocurrencia de

sobrepaso ante períodos de intensas lluvias y por consiguiente el colapso del dique perimetral.

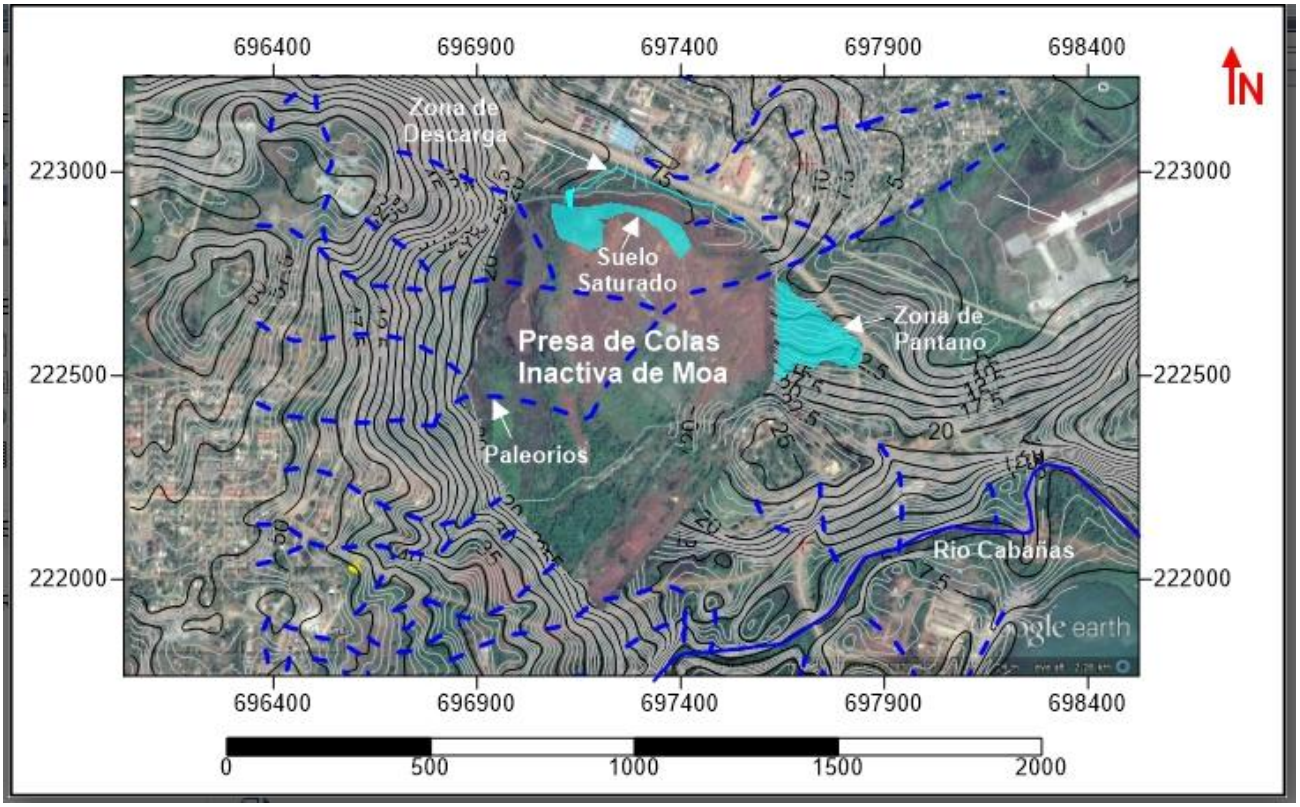

Figura 21. Zonas de drenaje superficial y subterráneo de la presa de colas inactiva de Moa

3.3.3. Erosión y deslizamientos

El dique perimetral de la presa se encuentra afectado por los fenómenos de la erosión y los deslizamientos. La presencia de cárcavas, surcos, grietas y el fenómeno de reptación evidencian la acción de los procesos erosivos. Además, se observa pequeños deslizamientos en la parte norte del dique. La intensidad de los procesos erosivos debilita la estabilidad de la presa e incrementan su vulnerabilidad.

La presencia de cárcavas (Figura 22) y de surcos evidencian la intensidad de los procesos a lo largo del dique perimetral de la presa de colas inactiva de Moa, generando un escenario de seguridad bajo ante la acción de los diferentes peligros.

Figura 22. Cárcava en el dique perimetral de la presa de colas inactiva de Moa

3.3.4. Sismos

La presa de colas inactiva de Moa, fue afectada en el año 1998 por la ocurrencia de un sismo ocurrido el día 28 del mes de diciembre como se muestra en la figura 23.

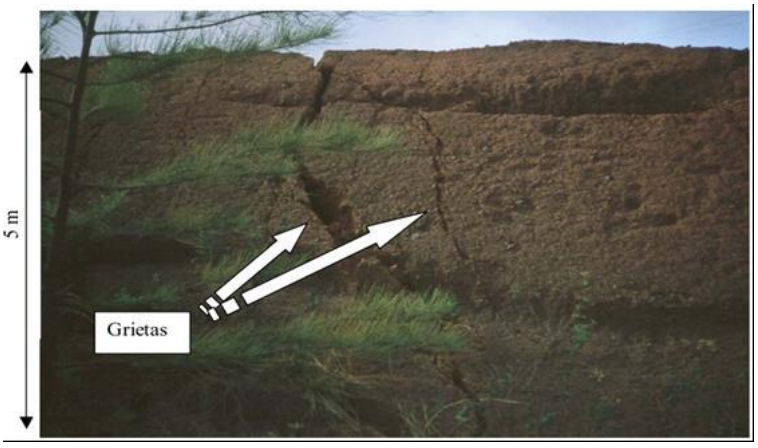

Figura 23. Grietas en muro de la presa inactiva de Moa, sismo de 1995 (Rodríguez, A. 1998)

Las grietas provocadas por el terremoto de 1998 fueron rellenadas por los propios sedimentos de la presa, por lo que no son visibles actualmente, pero esto no significa que el nivel de seguridad y de estabilidad se halla recuperado. Este evento, permitió que el dique se debilitara y por lo tanto debe existir un monitoreo adecuado de las grietas existentes y de la estabilidad del dique.

La existencia, además, de varios sectores con deslizamientos en proceso, cárcavas de gran magnitud, la rotura del dique, y la no existencia de borde libre para contener las aguas pluviales son condicionantes que ante un sismo pueden ocasionar fallos en la presa.

3.3.5. Actividad antrópica

En la parte sur de la presa se localiza parte de la traza de la red hidráulica municipal, que por desperfectos se encuentra vertiendo agua constantemente que se escurren hacia el norte de la presa. Este hecho ha provocado la rotura del dique e incrementa el nivel de vulnerabilidad del mismo. Las aguas que son vertidas en el punto de descarga ubicado al norte y oeste del dique se utilizan para bañar animales y para el cultivo (Figura 24).

Figura 24. Dique roto por vertido de agua

En la parte superior de la presa, hacia el sector este, existen construcciones de viviendas encima de la presa (Figura 25), pequeñas parcelas dedicadas al pastoreo de animales y en ese sector del dique se encuentra una trinchera que debilita el dique (Figura 26). En la parte baja del este del dique se ubica una zona pantanosa que es utilizada para el cultivo de arroz por los pobladores de la zona.

Figura 25. Viviendas ubicadas encima de la presa de colas inactiva de Moa

Figura 26. Trinchera construida en el dique perimetral de la presa de colas inactiva de Moa

3.4. Evaluación de la vulnerabilidad de la presa de colas inactiva de Moa

3.5. Vulnerabilidad Física

3.5.1. Vulnerabilidad estructural

La estabilidad de la presa fue evaluada bajo las condiciones de cargas tanto estáticas como pseudoestáticas (sísmicas), al emplear el software Slice para el análisis de la estabilidad. Los cálculos se basaron en las secciones típicas transversales de la presa. Los cálculos de estabilidad se realizaron al aplicar el Método de Equilibrio Límite (Morgenstern-Price), en las Figuras 28 y 30 se muestran los resultados de los Factores de Seguridad. En la figura 27 se ubican los sectores de mayor vulnerabilidad de la presa.

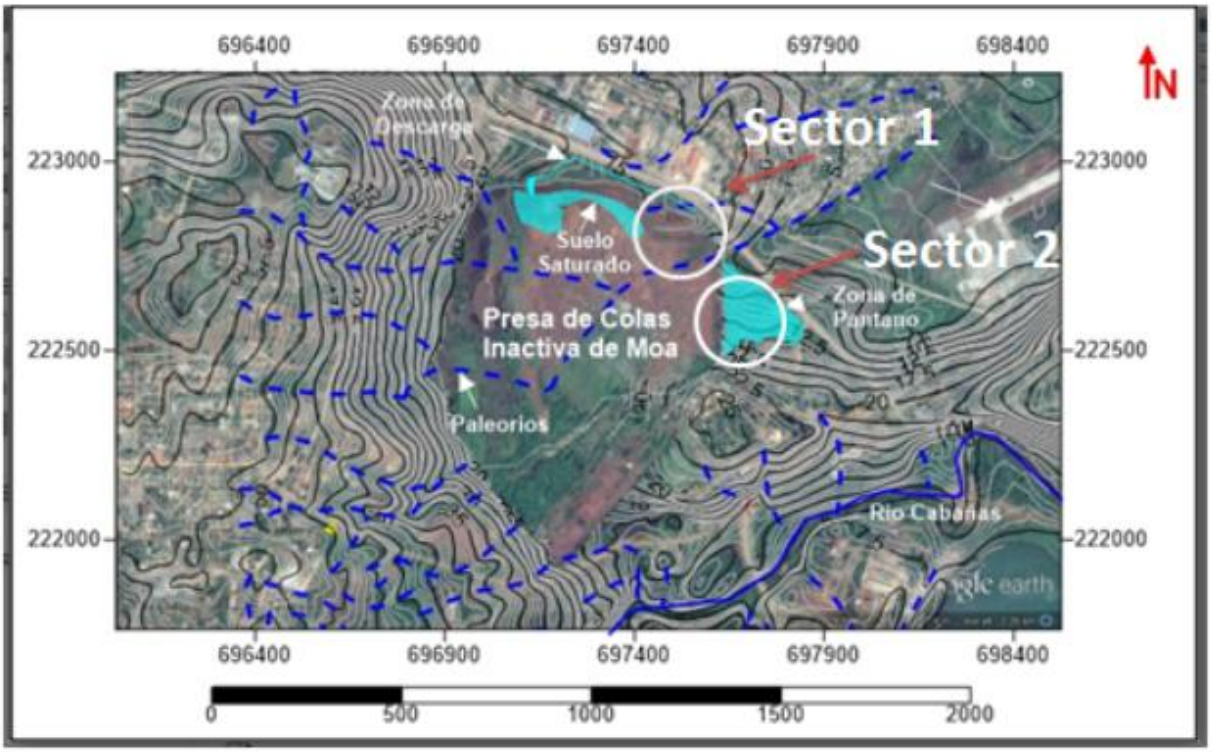

Figura 27. Sectores de mayor vulnerabilidad

Los resultados obtenidos del cálculo de estabilidad permiten observar la existencia de un talud (sector 1) inestable que posee un factor de seguridad de 0.96, debido a factores como:

- El alto grado de erosión en cárcavas.
- La existencia de una amplia red de grietas de tracción que han generado la ocurrencia de varios deslizamientos. (Figura 29)
- Obstrucción de obras de drenaje que indujeron a la pérdida del borde libre del sector 2 de la presa que pudieran provocar el sobrepaso.

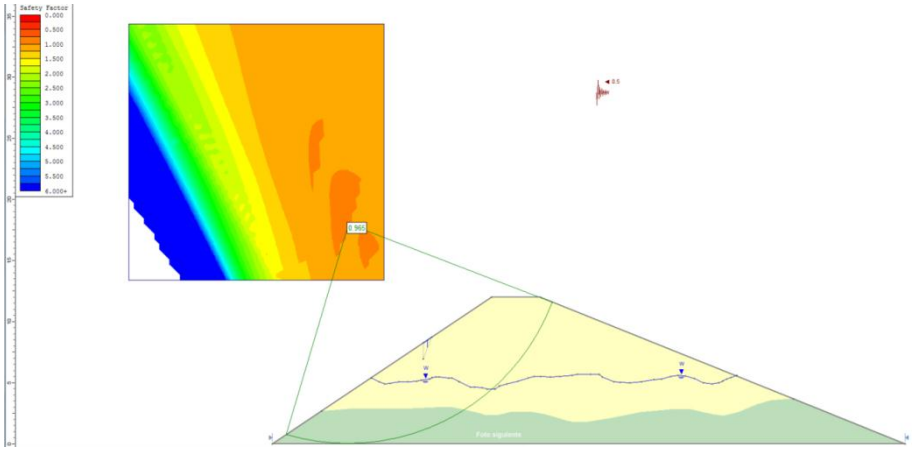

Figura 28. Perfil del cálculo de estabilidad del talud del sector 1

Figura 29. Deslizamiento en el talud de la presa de colas inactiva de Moa

El cálculo de la estabilidad demostró que el talud (sector 2) es inestable, con un factor de seguridad de 0.84, las causas fundamentales que inducen a dicha inestabilidad se deben a:

- Debido al alto nivel de saturación en la parte inferior, se crea una sobrecarga adicional sobre la base inferior del dique por la presencia de agua, se demuestra la existencia de manantiales permanentes.
- Construcción de la presa sobre estratos débiles que se corresponden a depósitos del Cuaternario.
- Evidencias de procesos erosivos en el talud del dique (cárcavas, reptación y deslizamientos) hacia la parte noroeste. (Figura 31)
- La pendiente del talud supera el ángulo de reposo natural de la laterita.
- Los taludes se encuentran expuestos a los agentes erosivos por la falta de la aplicación de métodos para su protección.

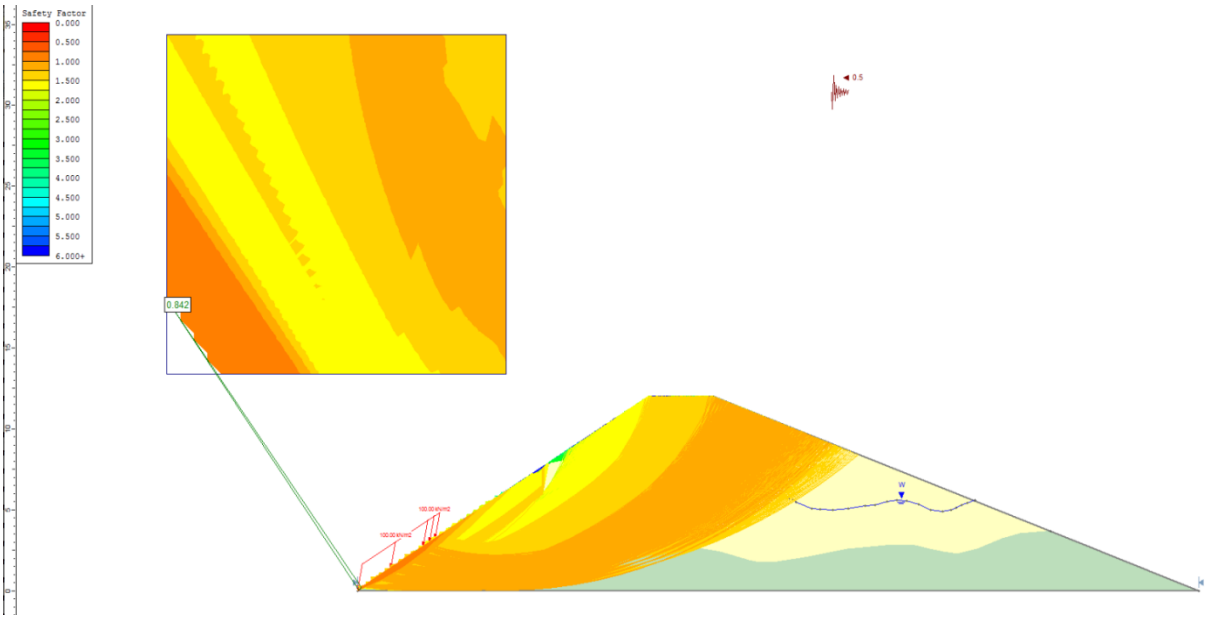

Figura 30. Perfil del cálculo de estabilidad del talud del sector 2

Figura 31. Proceso de reptación, zona del dique norte

Análisis de la vulnerabilidad sísmica de la presa

Según la Nueva Propuesta de Norma para Construcciones de Obras Sismorresistentes, la presa se encuentra en la Zona 3 de riesgo sísmico moderado que puede ocasionar daños en las construcciones. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima del terreno para el cálculo Sa oscilan entre 0,40 – 0,50 g para periodos cortos (Ss) y entre 0,15 – 0,20 g para periodos largos (S1). Los cálculos de estabilidad se realizaron sobre la base de esta norma, lo que demostró el alto nivel de vulnerabilidad de la presa ante peligro sísmico. Según el FS calculado se demostró que la presa de colas no es segura, por tanto, es necesario implementar medidas de protección de taludes para aumentar el nivel de seguridad del talud.

Análisis de la vulnerabilidad hídrica de la presa

La presa se encuentra sobre una red hídrica que constituye una zona de descarga (Figura 32) de los acuíferos superiores, presencia de manantiales y de zonas pantanosas, por lo que existe un alto nivel de saturación que unido a los depósitos del Cuaternario donde fue

construida la parte norte de la presa y la existencia de un valle aluvial donde concurrieron paleoríos. Estas condiciones incrementan el grado de vulnerabilidad hídrica de la presa.

La vulnerabilidad física de la presa está comprometida por ser un pasivo minero ambiental, cuyo fallo provocaría daños a redes de comunicación y eléctricas.

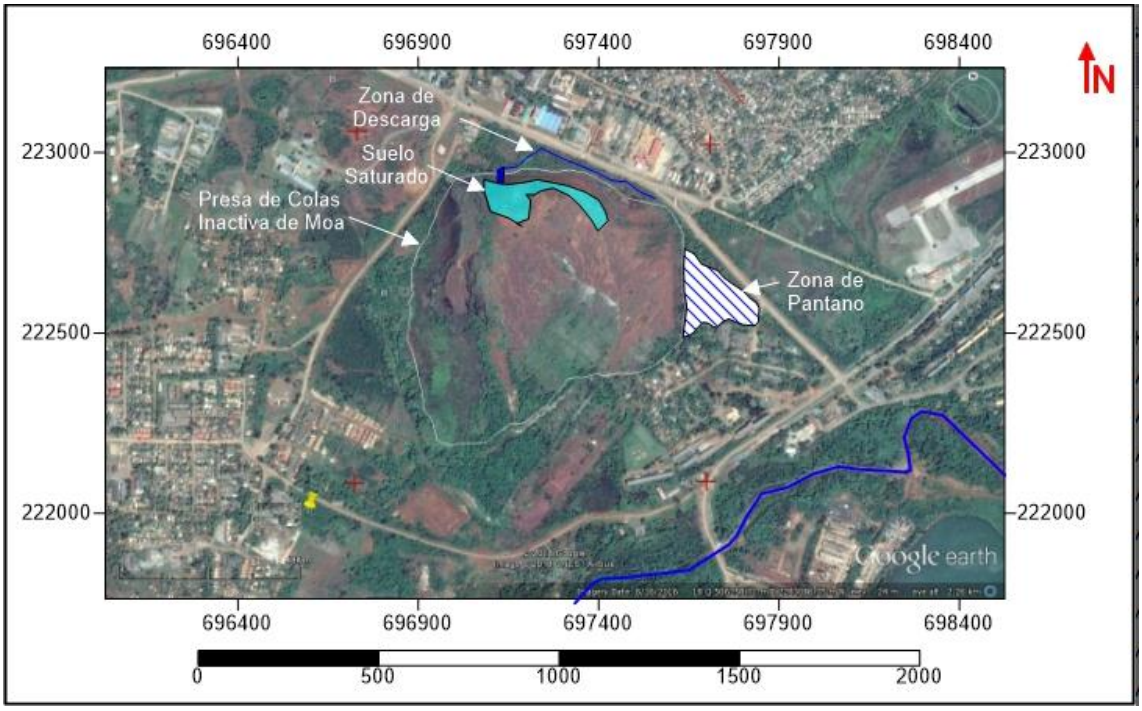

Figura 32. Mapa de ubicación de zonas de vulnerabilidad hídrica de la presa

3.6. Vulnerabilidad Complementaria

Para el análisis de la vulnerabilidad complementaria de la presa de colas se tuvieron en cuenta los elementos ambientales, ecológicos, socio-económicos y científico-tecnológicos que son susceptibles ante la ocurrencia de algún fallo en la presa de colas.

3.6.1. Vulnerabilidad ambiental y ecológica (VAE)

Para el cálculo de la vulnerabilidad ambiental y ecológica se analiza el comportamiento de las siguientes variables: condiciones atmosféricas, la composición y calidad del aire y las aguas y las condiciones ecológicas como se muestra en el Anexo 5.

Las temperaturas ambientales se comportan ligeramente superiores al promedio anual, a la coloración de las colas depositadas en la presa. Se clasifica con un nivel de vulnerabilidad media con un valor de 50%.

El aire y el agua tienen un nivel moderado de contaminación, ya que esta es una zona dónde el hombre ha trabajado, el aire se ve afectado por el arrastre de los polvos propios de los sedimentos de la presa, y en cuanto al agua, los informes de hidroeconomía reflejan contaminación con sulfatos, por lo cual toma un valor de 50 % y un nivel de vulnerabilidad medio.

En cuanto a la desforestación se evalúa como medio, por lo tanto, a las condiciones ecológicas se le asignó un valor del 70 %.

Para el cálculo de la vulnerabilidad ambiental y ecológica, se calcula el promedio de los valores alcanzados por las variables estudiadas:

VAE = (50+50+70) /3

VAE = 57 %

3.6.2. Vulnerabilidad económica (VE)

Teniendo en cuenta el comportamiento de las variables características (Anexo 1) según el nivel de vulnerabilidad económica existente en la presa de colas, se define como: el acceso que pueda tener el país a los activos económicos (tierra, infraestructuras, servicios, entre otros), que se reflejan en la capacidad para hacer frente a un desastre y está determinada, fundamentalmente, por el nivel de ingresos económicos y su impacto internacional. También se incluyen los efectos en el empleo y los niveles de ingresos para la población de la región cercana a la inversión.

La cola almacenada en la presa por su composición química y mineralógica tiene recursos minerales de alto valor para el comercio exterior, por eso se le asigna un valor del 25 %. El acceso al mercado laboral ostenta un nivel muy alto, ya que no existe oferta laboral por encontrarse inactiva y alcanza un valor del 100 %, no existen valores de ingresos 100%. Por lo tanto, la vulnerabilidad económica alcanza un valor como promedio:

VE = (25+100+100) /3

VE = 75 %

3.6.3. Vulnerabilidad social (VS)

Según el análisis del comportamiento de las variables que caracterizan la vulnerabilidad social en el Anexo 2, a partir del nivel de organización y participación que tiene la presa, para prevenir y responder ante desastres, mayor será la vulnerabilidad de una entidad si su cohesión interna es pobre, es decir, si las relaciones que vinculan a los miembros de la misma con el conglomerado social, no se afianzan en sentimientos compartidos de pertenencia y de propósito de forma tal que no existan formas organizativas que lleven esos sentimientos a acciones concretas. La presa es una obra que constituye un pasivo ambiental, situación que agrava el nivel de vulnerabilidad social. Los valores de las variables mencionadas se expresan a continuación:

- Nivel de organización: entidad organizada (100 %)
- Grado de relación entre las organizaciones locales: fuerte relación (100 %)
- Integración entre la organización: integración total (100 %)

Entonces, la VS como la media del grupo será:

VS = (100+100+100) /3

VS = 100 %

3.6.4. Vulnerabilidad científico-tecnológica (VCT)

Los valores de las variables de la vulnerabilidad científica y tecnológica (Ver Anexo 3) se expresan a continuación:

- ✓ No existen estudios sobre algún tipo de peligros (100 %)
- ✓ Empresa sin instrumentos (100 %)
- ✓ No tienen conocimiento de los estudios (100 %)

El valor promedio de esta vulnerabilidad es de:

VCT = (100+100+100) /3

VCT = 100 %

Teniendo en cuenta los valores porcentuales de vulnerabilidad de los cuatro tipos de vulnerabilidades calculados anteriormente, se puede calcular el valor de la vulnerabilidad complementaria (VC), como el promedio de estas:

VC = (57+75+100+100) / 4

VC = 83 %

3.6.5. Cálculo de la Vulnerabilidad Global

El cálculo de la vulnerabilidad global se determina como:

$$VG = \frac{P_F * VF + VC}{P_F + 1}$$

Donde:

P_f- peso ponderado de la vulnerabilidad física en la vulnerabilidad global, que depende de la importancia socio-económica de la investigación en estudio.

VF- Vulnerabilidad Física de un elemento, zona o la presa. (Los elementos que definen los valores de VF se encuentran en los Anexos 6 y 7)

VC- Vulnerabilidad Complementaria de la presa.

Tabla 3. Valores recomendados de Pf

Categoría de la obra	**P_f**
Sector educación y cultura	1.10 – 1.30
Sector industrial	1.30 – 2.00
Sector agropecuario	1.00 – 1.20
Sector salud	1.20 – 1.50
Viviendas	1.00 – 1.15
Edificios	1.60 – 2.00

Tabla 4. Vulnerabilidad Global para la presa

Grupo de eventos	VF	P_f	VC	VG
Erosión	80	1.3	83	81
Deslizamientos	75			78
Agrietamientos	85			84
Fallos por sismos	90			86

Tabla 5. Resumen de la vulnerabilidad global de la presa

Grupo de eventos	Presa
Erosión	Muy alta
Deslizamientos	Muy alta
Agrietamientos	Muy alta
Fallos por sismos	Muy alta

Teniendo en cuenta los valores expresados en las Tablas 3, 4 y 5; se resume que la presa de colas inactiva de Moa, presenta un alto nivel de vulnerabilidad global y se caracteriza de forma general por ser una presa asentada en zonas donde se esperan altas aceleraciones sísmicas por sus características geotécnicas, con material en regular estado. Entidad con escasos recursos económicos, falta de conocimiento y cultura de prevención, cobertura parcial de servicios básicos, accesibilidad limitada para servicios de emergencias, escasa organización, mínima participación, débil relación y poca integración entre las instituciones y organizaciones existentes (Anexo 8).

3.7. Plan de reducción de desastres para la prevención, mitigación y corrección de impactos

- Definir el nivel de responsabilidad que posee la dirección de Cubaníquel y la Oficina Nacional de Recursos Minerales sobre el manejo de la presa de colas.

- Integrar la presa de colas inactiva al Plan de Prevención y Reducción de Desastres del Municipio de Moa.
- Establecer un programa de capacitación en las comunidades aledañas y empresas del entorno.
- Establecer y mantener un sistema de control y monitoreo de la presa.
- Recuperar el borde libre del espejo de agua según proyecto.
- Recuperar y mantener en funcionamiento los sistemas de drenaje de la presa de colas.
- Establecer un sistema de medidas físicas y químicas de protección de taludes, para evitar la erosión.
- Establecer, además, un sistema de protección vegetal de los taludes.
- Señalizar y limitar el perímetro de la presa y prohibir el acceso de personas y animales.

Conclusiones parciales

1. En la evaluación de la vulnerabilidad global se determinó que la obra posee una vulnerabilidad muy alta ante fenómenos hidrometeorológicos y sísmicos, existiendo dos sectores de mayor vulnerabilidad, los cuales son:
   - Sector 1 con una VG muy alta
   - Sector 2 con una VG muy alta
2. El plan de reducción de desastres para la prevención, mitigación y corrección de impactos se ajusta a la necesidad de enfrentar antes, durante y después de la ocurrencia de un desastre en la presa inactiva de Moa.
3. El plan de medidas diseñado para la prevención, mitigación y corrección de impactos responde a las necesidades reales de la obra diagnosticada.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Existe un alto nivel de información de la temática a nivel internacional, con respecto a la documentación de la presa objeto de estudio la misma es muy escasa y fraccionada.
2. Los suelos de cimentación están constituidos por estratos inestables, areno arcillosos de humedad y plasticidad de media a alta. Depósitos del Cuaternario, lo que incrementa el nivel de vulnerabilidad de la presa ante fenómenos hidrometeorológicos y sísmicos.
3. La metodología propuesta se ajusta a los objetivos de la presente investigación.
4. En la evaluación de la vulnerabilidad global de la presa inactiva de Moa se determinó que:
    - La presa posee un nivel muy alto de vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos y sísmicos. En los sectores 1 y 2 de la presa presentan una vulnerabilidad global superior, asociados con los bajos valores del factor de seguridad (< 0.96); menores que 1.5 mínimo según las normas técnicas.
    - El plan de reducción de desastres aporta medidas de prevención, mitigación y corrección de impactos ajustadas a la necesidad de enfrentar antes, durante y después de la ocurrencia de un desastre en la presa inactiva de Moa

RECOMENDACIONES

1. Realizar los estudios de riesgos en la presa de colas inactiva de Moa.
2. Iniciar la implementación del plan de medidas para la reducción, mitigación y corrección de impacto ante la ocurrencia de fallos.
3. Actualizar al Centro de Gestión y Reducción de Riesgos sobre el estado de vulnerabilidad de la presa de colas inactiva de Moa.
4. Informar los resultados de esta investigación a la dirección de Cubaníquel, la Oficina Nacional de Recursos Minerales, el CITMA y la Oficina de Planificación Física.
5. Integrar los resultados de la investigación en el proyecto de la Tarea Vida.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALARCÓN, J., y BARRERA, S. (2003). “Dams of great height, a challenge”. *Symposium of Tailings, ICOLD.* Montreal.
2. ALONSO, E. (2001). “Caracterización de los efluentes de las empresas niquelíferas cubanas”. *Congreso Cubano de Geología y Minería*. La Habana, Libro de resúmenes, Memorias I, 10-11.
3. ALONSO, E.E. y GENS, A. (2006). Aznalcóllar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism. *Géotechnique* 56(3):185–201.
4. ANGELI M.G., et. al. (1996). “Long-term monitoring and remedial measures in a coastal landslide (Central Italy)”. *Proceedings of the seventh International Symposium on landslides. Trondheim*, 1497-1502.
5. ARANGO, E. et. al. (2009). *"Análisis geodinámico y sismotectónico del extremo oriental de Cuba. Acta GGM Debrecina.* Vol 4, p. 43-52.
6. ARIOZA, J.D. (2002). Modelo geológico descriptivo para los yacimientos lateríticos de Fe-Ni-CO en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa de Cuba Oriental. *Revista de Minería y Geología*. Nos.1-2.
7. ASOCIACIÓN DE MINERÍA DE CANADÁ (2000). *Elaboración de un manual de operación, mantenimiento y vigilancia para las instalaciones de gestión de relaves y recursos hídricos*.
8. BARRERA S. y LARA J. (1998). Geotechnical Characterization of Cycloned Sands for the Seismic Design of Tailings Deposits. *3rd International Congress on Environmental Geotechnics*. Lisboa.
9. BLIGHT, G. (1987). “Erosion of the slopes of gold tailings dams”. *Geotechnical practice for waste disposal ’87*, R. Woods (ed.), Geotech. Spec. Pub. No. 13, ASCE.
10. BLIGHT, G.E. y FOURIE, A.B. (2003). A review of catastrophicflow failures of deposits of mine waste and municipal refuse. Int. *Workshop On Occurrence And Mechanisms Of Flow In Natural Slopes And Earthfills*, Sorrento, Italia.
11. BLIGTH, G. E. (1994). The master profile for hydraulic fill tailing beaches. *Proc. Instn. Civ. Engng*, 107, 27-40.

12. BRENNAN, B. y GUTIERREZ, V. (2011). *Guía para elaborar la estrategia de la comunicación de riesgos*. OPS/OMS. Washington, DC, EEUU.
13. CARMÉNATE, J.A. y RIVERÓN, A.B. (1999). "Zonificación de los fenómenos geológicos que generan peligros y riesgos en la ciudad de Moa". *Minería y Geología*, 24 (2): 21-31.
14. CARRARA, A. (1983). "Multivariate models for landslide hazard evaluation". *Mathematical Geology*, 15(3): 403-427.
15. CARRARA, A. (1983). "Multivariate models for landslide hazard evaluation*". Mathematical Geology*. Vol. 15 (3): 403-427.
16. CHANDLER, R. J. y TOSATTI, G. (1995). The Stava dams failure, Italy, July, 1985. *Proc. Instn. Civ. Engng*, 113: 67-79
17. CHUY, T., 1999. *"Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación Sísmica"*. Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES y CENAIS. 150 p.
18. CUBA. GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE CUBA. *Decreto Ley No. 170. "Del Sistema de medidas de defensa civil"*. La Habana, 19 de Mayo, 1997. Año XCV. Número 16.
19. CUBA. GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE CUBA. *Decreto Ley No.262 "Reglamento para la compatibilización del desarrollo económico-social del país con los intereses de la defensa"*. La Habana, 14-05-1999.
20. DACY, D.C., and KUNREUTHER, H. (1969). "*The Economics of Natural Disasters: Implications for Federal Policy"*. New York: The Free Press.
21. EMDCN. (2010). "*Directiva No. 1 del Vicepresidente del Consejo de Defensa Nacional, para la Planificación, Organización y Preparación del País para las*

Situaciones de Desastres". Consejo de Defensa Nacional, Ciudad de la Habana, Cuba.

22. EMDCN. (2012). "*Guía metodológica para la organización del proceso de reducción de desastres*", Cuba.
23. EMNDC. (2005). "*Guía para la realización de estudios de riesgo para situaciones de desastres"*, EMNDC, La Habana.
24. EMNDC. (2010). "*Directiva No. 1 /2010 Para la planificación, organización y preparación del país para las situaciones de desastres"*.
25. ESPINACE, R. (2008). "Normativa y tecnologías innovadoras aplicadas a los depósitos de relaves. *Simposio Internacional Ciencia y Tecnología: Rol estratégico de la gestión tecnológica del cierre de faenas mineras para alcanzar una minería sustentable en la región de Atacama"*. Universidad de Atacama.
26. FELL, R. (1997). "Landslide risk management. Landslide risk assessment". *Cruden and Fell (eds).* Balkema: Rotterdam, 51-109.
27. FONSECA, E.; ZELEPUGIN V.N. y HEREDIA M. (1985). Structure of the ophiolite association of Cuba. *Geotectonic*, 19: 321-329.
28. FONSECA, R., 2004. "*Uso del Vetiver grass para la rehabilitación de sitios mineros en Chile: Resultados Preliminares"*. (ed) Antonio Rabat Sur 6165. Santiago de Chile: Fundación Chile.
29. FOURIE, A.B., BLIGHT, G.E. y PAPAGEORGIOU, G., 2001. Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure. *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 707–719.
30. FOURIE, A.B., et. al. (2003). "Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure". *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 707-719
31. GRAY D.H. et. al. (1996). "*Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization .A practical guide for soil erosion control*". John Wiley and Sons, 378 p.
32. GREEN, D. (2001). "*Forestación de depósitos de relave abandonados presentación de caso: Depósito de relave ácido en alta montaña zona central de Chile".* Santiago, Universidad de Chile. 156 p.

33. GUARDADO, R. y CARMÉNATE, J. (1996). “Evaluación ingeniero geológica de las áreas con peligros y riesgos geoambientales de la ciudad de Moa. *Minería y Geología* 12(2):45-55.
34. GUARDADO, R. y RIVERÓN, A.B. (1997). “Evaluación ingeniero geológica del territorio de Moa con fines de microzonación sísmica*”. Minería y Geología*, 41(2): 48.
35. *Guide to the Management of Tailings Facilities* (MAC 1998). Canada, 1998.
36. HARDER, L.F. y STEWART, J.P. (1996). Failure of Tapo Canyon Tailings Dam. J. of Performance of Constructed Facilities. *ASCE*, 10(3): 109-114.
37. HERNÁNDEZ, T. (2015).¨*Sistema de gestión de riesgos por fallos en la presa de colas de la empresa comandante Pedro Sotto Alba*¨.
38. HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2010) “*Funcionamiento y mecanismos de rotura en la presa de colas de la empresa Cdte. Pedro Sotto Alba,* Reporte Técnico, Moa, Cuba.
39. HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2010). “Rehabilitación de las presas de colas de la mina Moa Nickel SA, como medio de estabilización de taludes y de cierres de minas”. *Memorias del III Simposio Internacional Restauración Ecológica*. Santa Clara, Cuba. Septiembre 13-19, ISBN 978-959-250-600-8.
40. HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2011). *"Aplicación de la Bioingeniería al cierre de la presa de colas de la ECPSA"*, Proyecto de cierre, Moa, Cuba.
41. HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2012). *"Empleo de la Vetiveria Zizanoides para el control de la erosión en la presa de colas de la ECPSA",* Proyecto de cierre.
42. HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2014). "Gestión de Riesgos por Deslizamientos en la presa de colas de la ECPSA*. I Simposio de Minería y Medio Ambiente*, Moa, Cuba.
43. HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. (2014). "Gestión de riesgos por deslizamientos en presas de colas". *IV Congreso de desastres*, Habana, Cuba.

44. HERNÁNDEZ, T. y GUARDADO, R. 2014. “La bioingeniería en la estabilización de presas de colas de la industria minero metalúrgica en Cuba”. *Revista Minería y Geología*, 30(4).
45. HERNÁNDEZ, T. y ULLOA, M. (2014). “Impacto ambiental de la ampliación de una presa de colas de la industria cubana del níquel”. *Revista Minería y Geología*,30 (3).
46. HERNÁNDEZ, T., y GUARDADO, R. (2010) “Aplicación de la Bioingeniería al Control de la Erosión y la Sedimentación”. *Memorias del III Simposio Internacional Restauración Ecológica*. Santa Clara, Cuba. Septiembre 13-19, ISBN 978- 959-250-600-8.
47. HORTELANO, A. y CASAS, A. (2003). *“Presas y patrimonio. Situación legal y práctica¨,* (ed) Barcett y Olloth, España, 23-36.
48. ICOLD. (1989). “Tailings Dam Safety Guidelines”, Bulletin 74, *Committee on Mine and Industrial Tailings Dams*, Paris: Int. Commision on Large Dams.
49. ICOLD. (1995). *“Tailings Dam y Seismicity - Review y Recommendations*”.
50. ICOLD. (1996). “A Guide to Tailings Dams and Impoundments – Design, construction, use and rehabilitation¨. Bulletin 106. *Joint publication by International Commission on Large Dams and the United Nations Environmental Programme*, Paris. 239.
51. ICOLD. (1999). “Guidelines (CDA 1999)”. *International Commission on Large Dams.*
52. ICOLD. (2000). *¨World Information Service on Energy, Uranium Proyect, Cronología de las fallas más importantes en presas de relaves (desde 1960)¨*.
53. ICOLD. (2001). Bulletin 121: Tailing dams. *Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences.* Paris
54. ICOLD. (2003). “Bulletin on Risk Assessment in Dam Safety Management”. *International Commission on Large Dams.*
55. ICOLD. “Talings dams risk of dangerous occurrences. *Lessons learnt from practical experiences¨*. Bulletin 121.

56. ITURRALDE-VINENT, M.A. (1996). Geología de las ofiolitas de Cuba. En: Iturralde-Vinent, M. (ed). *Ofiolitas y arcos volcánicos de Cuba.* IGCP Project 364. Special contribution. (1): 83-120.
57. LEY No. 75/1994 *"Ley de la Defensa Nacional",* de 21 de diciembre. Prieto Valdés Marta; Pérez Hernández, Lissette. 2005. Selección Legislativa de Derecho Constitucional Cubano. Editorial Félix Varela. La Habana. Cuba.
58. LEY No. 81/1997 *"Ley del Medio Ambiente"*, de 11 de julio. Gaceta Oficial de la República de Cuba, Edición Extraordinaria. La Habana.
59. LÓPEZ, A. (1996). *"Las Presas Españolas en Arco de los Siglos XVI y XVII. Una innovación revolucionaria".* Universidad Autónoma de Madrid.
60. MARKLAN, A. y EURENIUS, J. (1976). *"Stability investigations of an existing tailing dam. 12th international congress on large dams¨.* Mexico: Commission Internationale de Grandes Barrages, 407-417.
61. OLALLA, C. y CUELLAR, V. (2001). Failure mechanism of the Aznalcollar Dam, Seville, Spain. *Geòtechnique,* 51(5): 399-406.
62. OLDECOP, L. (2004). "Influencia de factores climáticos en la estabilidad de las presas de colas¨. *Jornada "Geotecnia e Ingeniería Sísmica aplicadas a la Minería".* Instituto de Investigaciones Antisísmicas de Argentina.
63. OLDECOP, L. et al. (2008). *"Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros".* Instituto de Investigaciones Antisísmicas. Universidad Nacional de San Juan. Argentina.
64. OLDECOP, L. et. al. (2010). *"Comportamiento de colas mineras en climas áridos¨. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.*, Mendoza, Argentina: CAMSIG, 1-8.
65. OLDECOP, L. y RODRÍGUEZ, R. (2008).¨*Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros¨.*
66. OLIVA, G. (1989*). "Nuevo Atlas Nacional de Cuba".* Instituto de Geografía, ACC.
67. ORDOÑEZ, A. (1984). *"Canchas de relaves de concentradoras mineras. Informe Final¨*. VolI, Lima, Perú.

68. OROZCO, G. y RIZO, R. (1998). Depósitos de zeolitas naturales de Cuba. *Acta Geológica Hispánica*, 33 (1-4): 335-349.
69. PIÑERO, J.M. (2001)*.¨Guía técnica para la elaboración de los planes de emergencia para presas*¨, Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y calidad de las Aguas. Subdirección General de Gestión del Dominio Público Hidráulico. Madrid.
70. PONJUAN, A. y RODRÍGUEZ, R. (1981). *"Los procesos metalúrgicos utilizados en la industria del níquel en Cuba*. La Habana :Editorial Pueblo y Educación.
71. PROENZA, J. (1998*). "Mineralización de cromitas en la faja ofiolítica Mayarí-Baracoa(Cuba). El ejemplo del yacimiento Mercedita".* Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona. 227.
72. QUINTANA, H. (1998). "Diques de estériles". *Industria y Minería*, 33: 52-56.
73. RODRÍGUEZ, A. (1998). "*Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica".* Revista Minería Y Geología, 12 (3).
74. RODRÍGUEZ, R. (2002). *Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba)¨,* (ed) Gestión residuos industriales.
75. RODRÍGUEZ, R. (2011) b. "Transformaciones de pasivos ambientales mineros (PAM) en activos mineros, ambientales o sociales (AMAS)¨. *IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. GEOCIENCIAS* 2011, 4 al 8 de abril, La Habana, Cuba.
76. RODRÍGUEZ, R. et. al. (2009). "Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalúrgica a nivel mundial: causas y consecuencias ecológicas y sociales¨. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*. 12 (24): 7-25.
77. RODRÍGUEZ, R. y GARCÍA, A. (2006). *"Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente*¨. Madrid: Editorial Instituto Geológico y Minero de España, 1-744.
78. ROGGE, J.R. (1992). *"Una agenda de investigación para el manejo de desastres y emergencias*. PNUD-UNDRO, Universidad de Minitoba.
79. RUBÍN, M. (2003). *"Seguridad de presas. Pasado, presente y futuro*¨. Madrid, España: (ed) Zeltrounim.

80. SERRANO, A. (2011). ¨ *Desarrollo de una herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas¨.* Universidad Politécnica de Valencia.
81. SUÁREZ, J. (1998). *"Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales¨.* Universidad Industrial de Santander. (ed) Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga. Colombia.
82. SUÁREZ, J. (2002). "La Bioingeniería en el control de erosión en ambientes tropicales". Especificaciones para la construcción de obras de bioingeniería¨. *Simposio Latinoamericano de Control de Erosión*, Bucaramanga, (ed) Ingeniería de Suelos Ltda. Universidad Industrial de Santander, Colombia.

83. UNDRO. (1979 y 1983). "Natural Disasters and Vulnerability Analysis". *Report of Experts Group Meeting, Geneva*.

84. UNDRO. (1979). *"Natural Disasters and Vulnerability Analysis"*, Report of Experts Group Meeting, Geneva.

85. UNDRO. (1990). *"Preliminary Study on the Identification of Disaster-Prone Countries Based on Economic Impact.* New York/Geneva: United Nations Disaster Relief Organizasation.
86. USCOLD. (1989). *"McCoy Mine Tailings Dam",* USCOLD Newsletter, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.
87. USCOLD. (1989). *"Newmont's No. 4 Mill Tailings Dam",* USCOLD Newsletter, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.
88. USCOLD. (1992). "*Observed Performance of Dams During Earthquakes",* Committee on Earthquakes, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.
89. USCOLD. (1994). *"Tailings Dam Incidents",* Committee on Tailings Dams, U.S. Committee on Large Dams, Denver, Colorado.

90. VENEGAS, F. C. (2008). *"Análisis de desarrollo tecnológico en disposición de residuos mineros provenientes de procesos extractivos de cobre¨.* Tesis Maestría. Universidad de Serena, Chile.
91. VENEGAS, F. C. (2011). "*Respuesta sísmica recientes en balsas de relaves chilenas y presas de materiales sueltos¨*. Tesis de Maestría, Escuela de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
92. VINARDELL, R (2016).).¨*Modelación de escenarios de seguridad en la presa de colas de la empresa comandante Pedro Sotto Alba¨.*
93. ZABALA, F. et al. (2010). *"Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros¨.* Instituto de Investigaciones Antisísmicas. Universidad Nacional de San Juan, Argentina.
94. ZANDARÍN, M.T., et. al. (2008). "Stability of a Tailing Dam Considering the Hydro-mechanical Behaviour of Tailings and Climate Factors". D.G. Toll, C.E. Augarde, D. Gallipoli y S.J. Wheeler (eds). *Unsaturated Soils Advances in Geoengineering*. Taylor & Francis, London.
95. ZANDARÍN, M.T., OLDECOP. L. A. RODRÍGUEZ, R. and ZABALA, F. (2009). ¨The role of capillary water in the stability of tailings dams¨. *Engineering Geology*, 105: 108–118.

Índice

Dedicatoria 2
Agradecimientos 3
Resumen 4
Summary 5
Introducción 6
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE 9
1.1 Reseña histórica 9
1.1.1. Estudios del impacto ambiental de las presas de colas 10
1.1.2. Caracterización de los residuos 10
1.1.3. Comportamiento geotécnico 11
1.1.4. Seguridad de las presas de colas 11
1.1.5. Diseño, construcción, operación, cierre, post cierre y monitoreo 12
1.1.6. Gestión de riesgos en la actividad minera 13
1.1.7. Legislación y normativas internacionales 15
1.2 Estado de la temática de la protección de las presas de colas en Cuba 16
1.2.1. Construcción y operación de la presa de colas inactiva de Moa 18
1.3 Mecanismos de fallo de presas de colas 20
1.3.1. Deslizamientos 21
1.3.2. Sismicidad 22
1.3.3. Licuefacción 22
1.3.4. Problemas en la cimentación 23
1.3.5. Tubificación 25
1.3.6. Erosión 25
1.3.7. Fallo de estructuras auxiliares 25
1.3.8. Subsidencia 26
1.3.9. Actividad antrópica 26
1.4 Características regionales e Ingeniero-Geológicas del área de estudio de la Presa de Colas Inactiva de Moa 27
1.4.1. Localización geográfica del área de estudio 28

1.4.2. Clima 29
1.5 Hidrografía del medio y su impacto antrópico 29
1.5.1. Régimen de lluvias 29
1.5.2. Escurrimiento superficial 31
1.5.3. Geomorfología del territorio 31
1.5.4. Geología de la región 32
1.5.5. Geología del área de estudio 35
1.5.6. Tectónica del área de estudio 36
1.5.7. Sismicidad del área de estudio 37
1.5.8. Suelos 38
1.5.9. Recursos minerales 39
1.5.10. Infraestructura económica 39
Conclusiones parciales 40
CAPÍTULO II METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 41
2.1. Introducción 41
2.2. Etapas de la investigación 41
2.2.1. Etapa preliminar 42
2.2.2. Etapa de gabinete 42
2.3. Determinación de la vulnerabilidad de la presa de colas 45
2.3.1. Evaluación de la vulnerabilidad por fallos en la presa de colas 46
2.4. Vulnerabilidad física (VF) 46
2.4.1. Vulnerabilidad estructural de la presa de colas 46
2.4.2. Vulnerabilidad no estructural de la presa de colas 47
2.4.3. Vulnerabilidad funcional y organizacional 47
2.5. Vulnerabilidades complementarias 48
2.5.1. Vulnerabilidad ambiental y ecológica (VAE) 48
2.5.2. Vulnerabilidad económica (VE) 49
2.5.3. Vulnerabilidad social (VS) 49
2.5.4. Vulnerabilidad científica y tecnológica (VCT) 49
2.6. Vulnerabilidad Global 50

Conclusiones parciales 50
CAPÍTULO III. EVALUACIÓN DE LAS VULNERABILIDADES DE LA PRESA DE COLAS INACTIVA DE MOA 51
3.1. Introducción 51
3.2. Factores en riesgo ante fallos de la presa de colas 51
3.2.1. Población 51
3.2.2. Instalaciones económicas 52
3.2.3. Ambiental 52
3.2.4. Residuos almacenados en la presa 53
3.3. Análisis de los indicadores de fallo según el trabajo de campo 53
3.3.1. Hidrológicos 53
3.3.2. Operaciones del drenaje 54
3.3.3. Erosión y deslizamientos 55
3.3.4. Sismos 56
3.3.5. Actividad antrópica 57
3.4. Evaluación de la vulnerabilidad de la presa de colas inactiva de Moa 59
3.5. Vulnerabilidad Física 59
3.5.1. Vulnerabilidad estructural 59
3.6. Vulnerabilidad Complementaria 63
3.6.1. Vulnerabilidad ambiental y ecológica (VAE) 63
3.6.2. Vulnerabilidad económica (VE) 64
3.6.3. Vulnerabilidad social (VS) 65
3.6.4. Vulnerabilidad científico-tecnológica (VCT) 65
3.6.5. Cálculo de la Vulnerabilidad Global 66
3.7. Plan de reducción de desastres para la prevención, mitigación y corrección de impactos 67
Conclusiones parciales 68
CONCLUSIONES GENERALES 69
RECOMENDACIONES 70
BIBLIOGRAFÍA 71

Figura 1. Tipos de presas de colas, según el método constructivo utilizado, según Zabala, F. et al., 2010 10
Figura 2. Modelo conceptual de una presa de residuos mineros tecnológicos con los factores que afectan su funcionamiento (Zandarín, M.T. 2009) 13
Figura 3. Sección transversal del método constructivo empleado aguas arriba, Hernández, T. 2015 19
Figura 4. Método de distribución de las colas con la utilización de tubos de descarga, según ICOLD, 1989 19
Figura 5. Incidentes de Presas de colas por mecanismos de fallos y su relación al método constructivo, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008 20
Figura 6. Deslizamientos provocados por ascenso del nivel freático, según Oldecop, L. y Rodríguez, R. 2008 22
Figura 7. Rotura de la Presa de Aznalcollar, 1998. (Foto tomada de Oldecop. L.) 23
Figura 8. Vista aérea de la presa de Tapo Canyon previa a su rotura (izquierda) y rotura de la presa causada por el Terremoto de Northridge en 1994 (derecha) (Foto de Northridge Collection, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley 27
Figura 9. Esquema de ubicación geográfica del área de estudio 28
Figura 10. Versión digital del mapa geomorfológico. Escala original 1:50 000 (Modificado de Rodríguez A. 1998) 31
Figura 11. Esquema geológico de Cuba mostrando los afloramientos del cinturón plegado y del neoautóctono (tomado de Iturralde-Vinent, M.A. 1996) 33
Figura 12. Columna sintética ideal del complejo ofiolítico Moa-Baracoa según Proenza, J. 1998 34
Figura 13. Diagrama de Streckeinsen, 1976 34
Figura 14. Esquema geológico del área de estudio. Modificado de IGP, 2001 36
Figura 15. Mapa sismo tectónico de la región oriental. Tomado de Tesis Doctoral de Arango, E., CICESE, 2014 38
Figura 16. Organigrama de trabajo 41
Figura 17. Flujograma para la determinación de la vulnerabilidad global 43
Figura 18. Flujograma para la determinación de la Vulnerabilidad Global 45
Figura 19. Esquema de ubicación de las instalaciones económicas en riesgo, por fallo de la presa 52
Figura 20. Escurrimiento de las aguas hacia la parte norte de la presa. 54
Figura 21. Zonas de drenaje superficial y subterráneo de la presa de colas inactiva de Moa 55
Figura 22. Cárcava en el dique perimetral de la presa de colas inactiva de Moa 56
Figura 23. Grietas en muro de la presa inactiva de Moa, sismo de 1995 (Rodríguez, A. 1998) 56
Figura 24. Dique roto por vertido de agua 57
Figura 25. Viviendas ubicadas encima de la presa de colas inactiva de Moa. 58
Figura 26. Trinchera construida en el dique perimetral de la presa de colas inactiva de Moa. 58
Figura 27. Sectores de mayor vulnerabilidad 59
Figura 28. Perfil del cálculo de estabilidad del talud del sector 1 60

Figura 29. Deslizamiento en el talud de la presa de colas inactiva de Moa 60
Figura 30. Perfil del cálculo de estabilidad del talud del sector 2 61
Figura 31. Proceso de reptación, zona del dique norte.....62
Figura 32. Mapa de ubicación de zonas de vulnerabilidad hídrica de la presa.....63

Tabla 1. Estadística de las precipitaciones, periodo 2015 al 2017.....30
Tabla 2. Factores de seguridad mínimos. 46
Tabla 3. Valores recomendados de Pf.....66
Tabla 4. Vulnerabilidad Global para la presa.....67
Tabla 5. Resumen de la vulnerabilidad global de la presa.....67

ANEXOS

ANEXO 1

Tabla 1. Vulnerabilidad económica

VARIABLE	NIVEL DE VULNERABILIDAD			
	VB ≤ 25 %	**VM 26 a 50 %**	**VA 51 a 75 %**	**VMA 76 a 100 %**
Actividad económica	Alta productividad y recursos bien distribuidos. Productos para el comercio exterior o fuera de la localidad	Medianamente productiva y distribución regular de los recursos. Productos para el comercio interior, a nivel local.	Escasamente productiva y distribución deficiente de los recursos. Productos para el autoconsumo.	Sin productividad y nula distribución de recursos.
Acceso al mercado laboral	Oferta laboral superior a la demanda	Oferta laboral igual a la demanda	Oferta laboral menor a la demanda	No hay oferta laboral
Nivel de ingresos	Alto nivel de ingresos	Suficiente nivel de ingresos	Nivel de ingresos que cubre necesidades básicas	Ingresos inferiores para cubrir necesidades básicas

Dónde:
VB: Vulnerabilidad baja. VM: Vulnerabilidad media. VA: Vulnerabilidad alta. VMA: Vulnerabilidad muy alta

Vulnerabilidad social (VS)

ANEXO 2

Tabla 2. Vulnerabilidad social

VARIABLE	NIVEL DE VULNERABILIDAD			
	VB ≤ 25 %	**VM 26 a 50 %**	**VA 51 a 75 %**	**VMA 76 a 100 %**
Nivel de organización	Entidad totalmente organizada	Entidad organizada	Entidad escasamente organizada	Entidad no organizada
Grado de relación entre las instituciones y organizaciones locales	Fuerte relación	Medianamente relacionados	Débil relación	No existe
Tipo de integración entre organizaciones e instituciones locales	Integración total	Integración parcial	Baja integración	No existe integración

Dónde:

VB: Vulnerabilidad baja. VM: Vulnerabilidad media. VA: Vulnerabilidad alta. VMA: Vulnerabilidad muy alta

ANEXO 3

Tabla 3. Vulnerabilidad científica y tecnológica

VARIABLE	NIVEL DE VULNERABILIDAD			
	VB ≤ 25 %	**VM 26 a 50 %**	**VA 51 a 75 %**	**VMA 76 a 100 %**
Existencia de trabajos de investigación sobre desastres naturales en la localidad	Todos los peligros naturales fueron estudiados	La mayoría de los peligros naturales fueron estudiados	Existen pocos estudios de los peligros naturales	No existen estudios de ningún tipo de peligros
Existencia de instrumentos para la medición de fenómenos completos	Empresa totalmente instrumentada	Empresa parcialmente instrumentada	Empresa con escasos instrumentos	Empresa sin instrumentos
Conocimiento sobre la existencia de estudios	Conocimiento total de los estudios existentes	Conocimiento parcial de los estudios	Mínimo conocimiento de los estudios existentes	No tienen conocimiento de los estudios

Dónde:

VB: Vulnerabilidad baja. VM: Vulnerabilidad media. VA: Vulnerabilidad alta. VMA: Vulnerabilidad muy alta

ANEXO 4

Tabla 4. Valores recomendados de Pf

Categoría de la obra	**P_f**
Sector educación y cultura	1.10 – 1.30
Sector industrial	1.30 – 2.00
Sector agropecuario	1.00 – 1.20
Sector salud	1.20 – 1.50
Viviendas	1.00 – 1.15
Edificios	1.60 – 2.00

Pf: Peso ponderado de la vulnerabilidad física en la vulnerabilidad global, que depende de la importancia socio-económica de la inversión en estudio

ANEXO 5

Tabla 5. Vulnerabilidad ambiental y ecológica (VAE)

VARIABLE	NIVEL DE VULNERABILIDAD			
	VB ≤ 25 %	**VM 26 a 50 %**	**VA 51 a 75 %**	**VMA 76 a 100 %**
Condiciones atmosféricas	Niveles de temperatura promedios normales	Niveles de temperatura ligeramente superiores al promedio anual	Niveles de temperatura superiores al promedio natural	Niveles de temperatura superiores estables al promedio normal
Composición y calidad del aire y el agua	Sin contaminación	Con un nivel moderado de contaminación	Alto grado de contaminación	Nivel de contaminación no apto
Condiciones ecológicas	Conservación de recursos naturales, no existe deforestación ni contaminación	Nivel moderado de explotación de los recursos naturales y del nivel de contaminación	Alto nivel de explotación de los recursos naturales, y del nivel de contaminación	Explotación indiscriminada de los recursos naturales

Dónde: VB: Vulnerabilidad baja. VM: Vulnerabilidad media. VA: Vulnerabilidad alta. VMA: Vulnerabilidad muy alta

ANEXO 6

Tabla 6. Clasificación cuantitativa de la vulnerabilidad física (VF)

Grupo de eventos	Presa
Erosión	80
Deslizamientos	75
Agrietamientos	85
Fallos por sismos	90

ANEXO 7

Tabla 7. Clasificación cualitativa de la vulnerabilidad física (VF)

Grupo de eventos	**Presa**
Erosión	Alta
Deslizamientos	Alta
Agrietamientos	Muy Alta
Fallos por sismos	Muy Alta

ANEXO 8

Tabla 8. Clasificación, descripción y valor de la vulnerabilidad global

Nivel de vulnerabilidad	**Descripción/Características**	**Rangos de valores de VG**
VMB y VB	Presas asentadas sobre terrenos seguros, con material sismo resistente, entidad con un ingreso medio a alto, con estudios y cultura de prevención, con cobertura de los servicios básicos, con buen nivel de organización, participación total y articulación entre las instituciones y las organizaciones existentes	≤ 25 %

Clasificación, descripción y valor de la vulnerabilidad global (continuación)

M	Presas asentadas sobre suelos de calidad intermedia, con aceleraciones sísmicas moderadas, inundaciones muy esporádicas, con bajo tirante y velocidad. Con material en regular y buen estado de conservación. Entidad con ingresos económicos medios, con cultura de prevención en desarrollo, con cobertura parcial de los servicios básicos, con facilidades de atención para servicios de emergencia. Entidad organizada, con participación de la mayoría, medianamente relacionados e integración parcial entre las instituciones y las organizaciones existentes	De 26 a 50 %
VA	Presas asentadas en zonas que se esperan altas aceleraciones sísmicas por sus características geotécnicas, con material en mal y regular estado. Entidad con escasos recursos económicos, sin conocimientos y cultura de prevención, cobertura parcial de servicios básicos, accesibilidad limitada para servicios de emergencia, escasa organización, mínima participación, débil relación y una baja integración entre las instituciones y organizaciones existentes.	De 51 a 75 %
VMA	Presas asentadas en zonas de suelos con alta probabilidad de ocurrencia de licuación generalizada o suelos colapsables en grandes proporciones, de materiales precarios en mal estado de construcción. Entidad de escasos recursos económicos, sin cultura de prevención, inexistencia de servicios básicos y accesibilidad limitada para atención a emergencias; así como una nula organización, participación entre las instituciones y organizaciones existentes.	De 76 a 100 %