

Análisis y evaluación de riesgo por deslizamiento de un depósito de desmonte de mina ubicado en el norte del Perú

Análisis y evaluación de riesgo por deslizamiento de un depósito de desmonte de mina ubicado en el norte del Perú

Fernando Samuel Mendoza Maldonado¹, Frank Martin Maldonado Pariguana²

Recibido: 10/02/2022 – Aprobado: 19/04/2022 – Publicado: 30/06/2022

RESUMEN

Durante la operación de un depósito de desmonte de mina de gran altura, se podrían generar riesgos de fallas por deslizamiento de taludes cuyas consecuencias podrían afectar principalmente al personal que labora en las inmediaciones del depósito y al medio ambiente, según el grado de vulnerabilidad; ello por la probabilidad de ocurrencia de peligros de fenómenos naturales principalmente. En tal sentido, el presente artículo desarrolla el análisis de deslizamiento hipotético de un depósito de desmonte de mina ubicado en los andes del Perú y sus posibles consecuencias. Se ha cuantificado el peligro por deslizamiento del talud general en términos de mecanismo de falla, volumen deslizado, ubicación, distancia de viaje, y la probabilidad de ocurrencia.

Palabras claves: depósito de desmonte de mina; falla por deslizamientos; riesgo; peligro; vulnerabilidad; probabilidad de ocurrencia; consecuencia; estabilidad de taludes.

ABSTRACT

During the operation of a high-rise mine stripping facility, risks of failure due to slopes could be generated, the consequences of which could mainly affect the personnel working in the vicinity of the deposit and the environment, depending on the degree of vulnerability. mainly due to the probability of occurrence of hazards from natural phenomena. In this sense, this article develops the hypothetical landslide analysis of a mine waste deposit located in the Andes of Peru and its possible consequences. The general slope slip hazard has been quantified in terms of failure mechanism, slip volume, location, travel distance, and probability of occurrence.

Keywords: mine waste facility; landslides; risk; hazard; vulnerability; probability of occurrence; consequence; slope stability.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.

Ingeniero Civil, magister en Ingeniería Geotecnia y estudios de maestría en la UNI.

E-mail: Fersamm@yahoo.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9282-2583>

2 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.

Bachiller en Ingeniería Civil. Bach. en Ingeniería Civil. E-mail: Frankmp_7@hotmail.com - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7516-434X>

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú operan grandes proyectos de explotación minera que generan enormes cantidades de residuos mineros, una de estos son los desmontes de mina que son almacenados en grandes depósitos. Las citadas instalaciones deben garantizar la estabilidad física a fin de evitar posible afectación principalmente a las personas y al medio ambiente. Por lo cual, es importante realizar el análisis de riesgos por deslizamientos y establecer los parámetros de diseños y los elementos necesarios, desde la definición del plan de manejo ambiental, durante la ejecución de los estudios de ingeniería y construcción de las obras de protección y durante la operación del depósito de desmonte.

En muchos casos los depósitos de desmonte de mina son percibidos como elementos de alto riesgo. Sin embargo, utilizando los últimos avances del conocimiento y las buenas prácticas ingenieriles se puede realizar análisis coherente de riesgos de falla hipotéticas y de sus consecuencias; en ese sentido, mitigar los posibles daños en la etapa de diseño u operación.

Durante la operación de un depósito de desmonte de mina de gran altura, se podrían generar riesgos de fallas por deslizamiento de taludes cuyas consecuencias podrían afectar principalmente al personal que labora en las inmediaciones del depósito y al medio ambiente, según el grado de vulnerabilidad; ello por la probabilidad de ocurrencia de peligros de fenómenos naturales principalmente. En tal sentido, el presente artículo desarrolla el análisis de deslizamiento hipotético de un depósito de desmonte de mina ubicado en los andes del Perú y sus posibles consecuencias. Se ha cuantificado el peligro por deslizamiento del talud general en términos de mecanismo de falla, volumen deslizado, ubicación, distancia de viaje, y la probabilidad de ocurrencia.

El modo de falla por deslizamiento es la más frecuente en estructuras de residuos mineros. El deslizamiento podría ser causado por esfuerzos de corte que se generan en una superficie de debilidad que exceda la resistencia cortante del material que conforma el cuerpo del depósito de residuos, un disparador para esta condición sería un evento sísmico o presencia de suelos de baja resistencia en la fundación o grandes filtraciones de agua a través del cuerpo y talud del depósito materia de estudio. Cabe mencionar que, el origen de las posibles fallas del DDM dependerán esencialmente de eventos extremos de lluvia y sismo en el área de estudio, la geometría de depósito (altura y talud de apilamiento); y en menor medida, de las características físicas del desmonte almacenado y condición operativa insegura.

1.1 Conocimiento Actual

Respecto al conocimiento actual, buena parte de las investigaciones realizadas han estado destinadas a la predicción de fallas por deslizamientos de taludes naturales principalmente con susceptibilidad a los deslizamientos y sus consecuencias.

De acuerdo con Fell et al. (2005) propusieron un marco para la evaluación y gestión de riesgos de deslizamientos de suelos describiendo los procesos de análisis de peligros, incluyendo la caracterización del deslizamiento; análisis de

frecuencia; cálculo de la estimación del riesgo; evaluación de riesgos frente a criterios de tolerancia y juicio de valor. En su investigación, recomiendan utilizar varios métodos de estimación de deslizamiento de manera simultánea combinados en un juicio experimentado.

Hungr et al. (2005), realizaron una predicción del carácter de la falla y una estimación cuantitativa del movimiento posterior de la falla, incluida la distancia y velocidad de viaje. Muestran métodos empíricos y analíticos para predecir el momento de la falla.

Jakob & Weatherly (2005), cuantificaron el peligro y el riesgo del flujo de escombros de una instalación en Jones Creek. Construyeron un gráfico de frecuencia y magnitud a partir de los datos y utilizaron como entrada para el modelo de desviación de flujos.

1.2 Justificación y Objetivos de la investigación

Esta investigación se justifica porque permite analizar y evaluar los riesgos al deslizamiento de los depósitos de desmonte de mina de gran altura a causa de ocurrencia de fenómenos naturales y su posible afectación a las personas y al medio ambiente. Se ha estimado la distancia de recorrido del desmonte deslizado por causa de la falla mediante métodos empíricos disponibles. Asimismo, se ha evaluado la consecuencia del deslizamiento por afectación a las personas.

Analizar y evaluar los riesgos por deslizamiento del depósito de desmonte de mina de gran altura por causa de un evento extraordinario, en ese sentido, determinar la distancia de recorrido del material deslizado mediante métodos empíricos y su consecuencia por afectación a las personas.

1.3 Aspectos físicos del área de estudio

1.3.1 Sismicidad de la zona de estudio

El área de estudio está ubicada en la zona de alta sismicidad, habiendo ocurrido sismos de intensidades de VII en la Escala de Mercalli Modificada en el área cercana al proyecto, según la información de sismicidad histórica recopilada (Silgado Ferro, 1978).

En base a la estimación determinística del MCE, de acuerdo a las recomendaciones del código IBC, estimado como el 150 por ciento de la mediana (P.50) de las aceleraciones de respuesta amortiguadas al 5% de todos los periodos que resultan de un sismo característico de una falla activa conocida dentro de la zona de estudio, se ha estimado un valor de MCE determinístico para roca de 0.19 g, y un MCE determinístico para suelo de 0.56 g, este valor es consistente con el reportado para el MCE probabilístico para la zona del proyecto.

1.3.2 Precipitaciones en la zona de estudio

El régimen de precipitación presentado corresponde al registro de la estación San Andrés durante el periodo del 1997 al 2015. La precipitación anual obtenida para el área del proyecto varía entre 291mm (año 1997) hasta 1,279.7mm (año 2000). Las precipitaciones promedio mensuales varían desde 0 mm a 18.6 mm. La estación

lluviosa se presenta entre los meses de enero a marzo con una precipitación promedio de 14.9 mm mientras que la estación seca ocurre entre mayo a diciembre con un promedio de 0.5 mm.

1.3.3 Características geotécnicas del emplazamiento

El área sobre el cual se emplaza el Depósito de Desmote de Mina (DDM) se encuentra conformado superficialmente por materiales provenientes de origen fluvio-glaciar con espesores variables entre 1 m a 14 m, en condición densas a muy densas. Asimismo, sobre depósitos de origen glaciar compuesta por suelos de naturaleza morrénica, corresponden a gravas arcillosas ligeramente arenosas, de partículas con formas angulosas, de tamaño promedio 2", presenta bolones de tamaño máximo 10" en un 50%; no tiene mucho espesor y se infiere que varía entre 0.5 m a 6.5 m. Por debajo de estos suelos se encuentra el basamento rocoso de origen metamórfico constituido principalmente por metandesitas y filitas gris verdosas, estas rocas se presentan plegadas y fracturadas, moderadamente dura tipo R3, con fragmentos. Por sectores se aprecian afloramientos especialmente en los niveles superiores de la quebrada.

1.4 Características de diseño del DDM

La configuración general del DDM se extiende sobre un área aproximada de 29.79 has, para lo cual se considera como límites el pie del apilamiento y el pie del relleno aguas abajo del dique de retención. La configuración proyectada tiene una capacidad de almacenamiento de 21.74 Mt, la cual fue estimada considerando una densidad promedio de desmote de 2.00 t/m³.

Los taludes de apilamiento de diseño tienen bancos de 8.0 m a 12.0 m de altura, taludes intermedios de 1.5H:1V y anchos de berma entre 6.0 m a 15.0 m, que definen un talud global de 2.5H:1V. El depósito alcanzará 85.80 m de altura

máxima en su condición de apilamiento final. En la Figura 1 se muestra la sección crítica del DDM.

1.4.1 Características geotécnicas del material almacenado

El material de desmote que será apilado es de tipo heterogéneo, se constituye por roca triturada de tamaños variables y tamaño máximo de 16", las partículas menores a 3" se clasifican como gravas arenosas (GW/GP) con menos del 5% de finos.

1.5 Análisis de fallas para el DDM

Las posibles fallas de un depósito de desmote de mina dependen esencialmente de eventos naturales extraordinarios (lluvia y sismos extremos), características geométricas de apilamiento y de la fundación que no aseguren la estabilidad física; y en menor medida, de las características físicas del desmote almacenado y condición operativa insegura. No obstante, a las posibles causas de eventos de falla; en esta sección se resumen los posibles mecanismos de falla del DDM:

1.5.1 Derrumbe en el borde

Consiste en el deslizamiento de una capa de material o el desprendimiento de la cresta con poca traslación de masa en ambos casos.

1.5.2 Falla rotacional

Estas fallas pueden ocurrir en suelos moderados a muy escarpados y pendientes rocosas erosionadas. La superficie de deslizamiento de la masa en movimiento tiende a ser profunda. Las grietas de tensión pueden generarse en la parte superior de la pendiente y puede ocurrir abultamiento en el pie del talud.

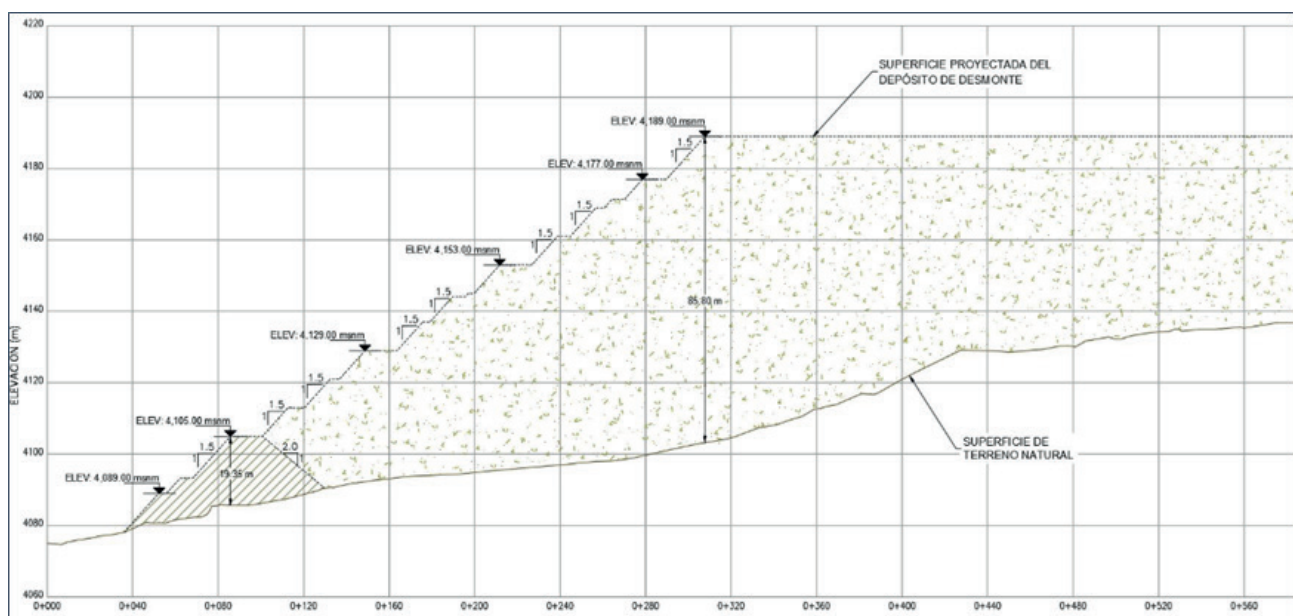


Figura 1. Sección crítica del DDM

1.5.3 Falla traslacional o planar

Las fallas planares son denominadas también de talud infinito, estas fallas son típicas de materiales granulares caracterizados por un ángulo de fricción constante y cohesión nula. Tienden a ocurrir en pendientes moderadas a muy empinadas.

1.5.4 Falla rotacional por fundación

Este tipo de falla se produce cuando existe un plano de debilidad en la fundación de los depósitos.

1.6 Método empírico para estimar la distancia de deslizamiento

En la actualidad, se han desarrollado métodos empíricos para evaluar la distancia y velocidad de deslizamiento de taludes, basados en observaciones de campo,

instrumentación geotécnica basados en registros de desplazamientos y a partir del análisis de la relación entre los parámetros que caracterizan el deslizamiento de suelo (volumen), la trayectoria (morfología local, obstrucciones) y la distancia recorrida del material desplazado.

La distancia de deslizamiento (L), se define como la proyección horizontal de la línea que une la parte superior de la fuente de deslizamiento del suelo y el borde más externo del depósito de deslizamiento. Ver Figura 2. Finlay et al. (2011), determinaron varias expresiones para determinar la distancia de desplazamiento del talud de corte, rellenos, muros de contención y caída de rocas. Ver Tabla 1. Estos modelos se aplican solo donde los escombros corren hacia una superficie casi horizontal aguas abajo.

El ángulo de alcance (α) es el ángulo de la línea entre el punto más alto de cresta del deslizamiento con el

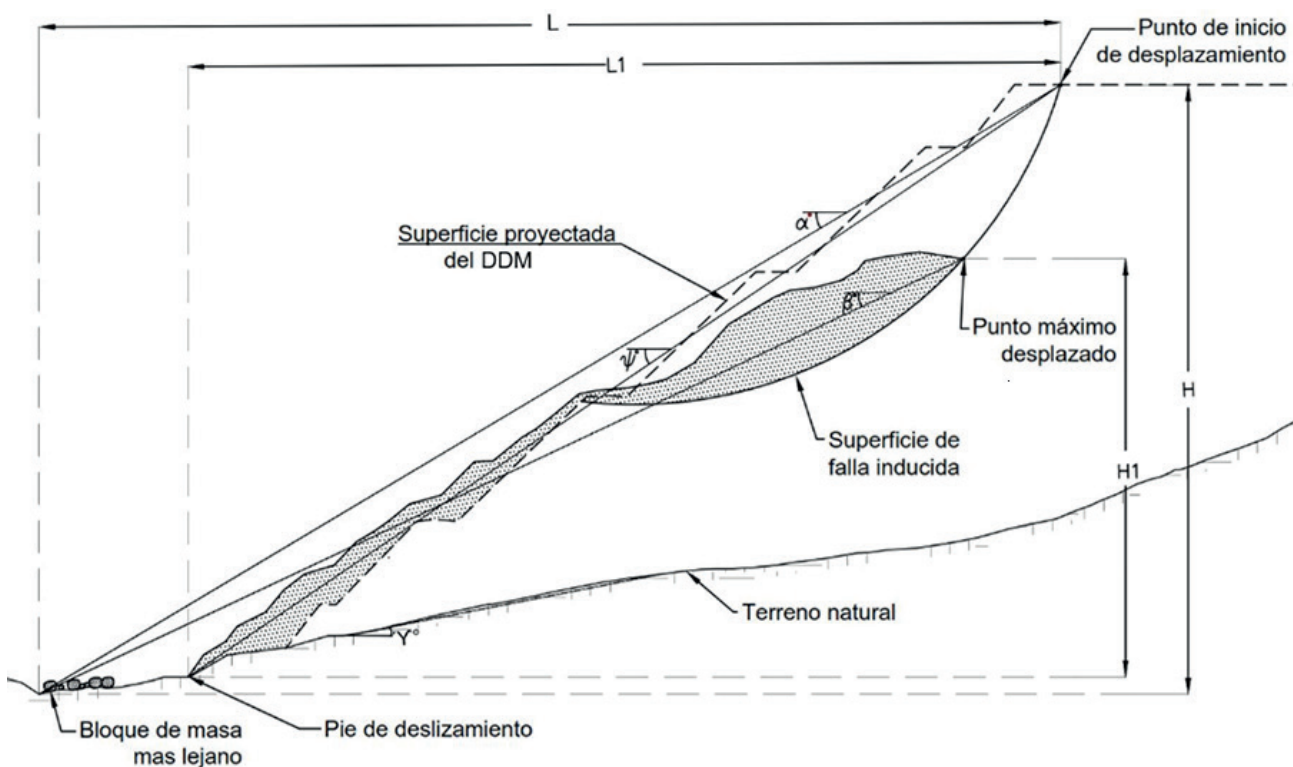


Figura 2. Variables geométricas de falla del talud del DDM

Nota: H : altura de caída vertical; L : distancia de recorrido; α : ángulo de alcance; β : ángulo de alcance de deslizamiento; ψ : ángulo entre inicio y pie del talud deslizado; γ : ángulo del terreno; S_1 : distancia de recorrido más lejano.

Tabla 1. Ecuaciones para determinar distancia de deslizamiento para fallas en laderas

Variable dependiente		Ecuación
Talud de relleno	LCI	$\text{Log } L = 0.269 + 0.325 \text{ Log } H - 0.166 \text{ Log } (V/W)$
	Medio	$\text{Log } L = 0.453 + 0.547 \text{ Log } H - 0.305 \text{ Log } (V/W)$
	UCI	$\text{Log } L = 0.269 + 0.325 \text{ Log } H - 0.166 \text{ Log } (V/W)$

Fuente: Propuesta para fallas en taludes de Hong Kong (Finlay et al., 2011).

Abreviatura: H : caída vertical; α : ángulo del talud; V : volumen de deslizamiento de suelo; W : ancho de deslizamiento del suelo; LCI y UCI: son los intervalos de confianza

punto más lejano de la masa desplazada. Este ángulo fue definido por Heim (1932), quien lo denominó ángulo de fahrböschung. Otros nombres dados por varios autores incluyen el ángulo de alcance (J. Corominas, 2011), el ángulo de desplazamiento (Cruden, 1996); (Evans & Hungr, 2011) y el ángulo de la distancia de desplazamiento (Hunter & Fell, 2011).

Una gráfica de la tangente del ángulo de alcance (H/L) vs el volumen del deslizamiento de suelo muestra que los grandes deslizamientos tienen ángulos de alcance más bajos (Hsu, 1975); (Scheidegger, 1973). Esta es la razón por la que los grandes deslizamientos de suelo se han considerado como móviles. El ángulo de alcance de grandes deslizamientos y avalanchas de rocas es menor que el ángulo de fricción esperada de la roca de una quebrada seca (aproximadamente 32°). La mayor movilidad ha sido expresada por la “distancia de viaje excesiva” (Hsu, 1975), que es la longitud de la proyección horizontal (Le) de la distancia de desviación más lejano del punto de la línea trazada desde la corona del deslizamiento se inclina en un ángulo de 32° donde se cruza con la superficie topográfica.

$$Le = L - \frac{H}{\tan 32^\circ} \dots \dots \dots (1)$$

Los pequeños deslizamientos de suelo tienen mayor movilidad que la esperada usando un ángulo de fricción de 32°, este ángulo es discutible ya que muchos materiales al deslizarse tienen parámetros de fricción mucho menor a 32° Hungr et al. (2005). Sin embargo, se sugieren diferentes mecanismos para explicar esta mayor movilidad. Varios autores han cuestionado la dependencia del volumen del tramo tanto para los grandes deslizamientos (Hungr et al., 2005) (Hsu, 1975) como para los pequeños deslizamientos (Hunter & Fell, 2011) y se han propuesto otras explicaciones alternativas (T. R. Davies et al., 1999).

Cuando se conoce la fuente del deslizamiento y el volumen potencial de deslizamiento, la distancia de recorrido se puede obtener de la siguiente expresión:

$$L = \frac{h}{\tan \alpha} \dots \dots \dots (2)$$

Para casos prácticos, se puede obtener una solución gráfica asumiendo un ángulo de alcance, para el cual se puede trazar una línea desde la zona inicial (fuente); la intersección con la superficie topográfica dará valores de H y L. Muchos autores han propuesto expresiones empíricas basadas en la relación inversa entre la tangente del ángulo de alcance (H/L) y el volumen deslizado. Los estudios iniciales asumen que solo los grandes deslizamientos de suelo, en particular, las avalanchas de rocas experimentaron una reducción de H/L con el aumento del volumen (Scheidegger, 1973); (Scheller, 1971). Estudios adicionales con deslizamientos de suelo más pequeños (J. Corominas, 2011); (Hutchinson, 1988) y experimentos de caída de rocas (Okura et al., 2000) proponen una correlación similar con la siguiente forma:

$$\text{Log tan } \alpha = A + B \text{Log } V \dots (3)$$

A y B son constantes y V es el volumen. Para algunos casos del conjunto de deslizamientos, no tienen un buen coeficiente de correlación entre el volumen y el valor de H/L (Nicoletti & Sorriso-Valvo, 1991). Intentos similares utilizando varias zonas de corte, rellenos, muros de contención y caídas de rocas en Hong Kong, también encontraron una correlación débil (R² 0.2) y mucha dispersión (Finlay et al., 2011).

Para mejorar las ecuaciones de regresión, Corominas, (2011), realizó un análisis utilizando áreas de deslizamientos más homogéneos. Los deslizamientos de suelo se dividieron en diferentes grupos de acuerdo con su mecanismo predominante (desprendimientos de rocas y avalanchas, deslizamientos de traslación, flujos de escombros y flujos de suelo) y las características del tránsito (es decir, sin obstáculos, canalizados, boscosos, obstruidos por un muro opuesto, etc.). Las ecuaciones de regresión muestran una mejora notable (Tabla 2).

Dada la gran dispersión de zonas analizadas, el uso de las ecuaciones para estimar la distancia esperada de desplazamientos debe aplicarse con cautela, debido a los valores medios que pueden dar resultados optimistas.

Tabla 2. Ecuación de regresión H/L vs volumen de deslizamiento para diferente material y deslizamiento

Tipo de deslizamiento de suelo	Rutas	A	B	R ²
Deslizamiento traslacional	Todas	-0.159	-0.068	0.67
	Obstruido	0.133	-0.057	0.76
	Sin obstáculo	0.143	-0.080	0.80
Flujo de escombros	Todas	-0.012	-0.105	0.76
	Obstruido	-0.049	-0.108	0.85
	Sin obstáculo	-0.031	-0.102	0.87

Fuente: (Corominas, 2011).

En muchos casos, es relativamente fácil modelar la incertidumbre en la distancia de recorrido en el cálculo del peligro. Esto se puede realizar asignando una probabilidad donde la distancia de recorrido esté en un cierto rango basado en las ecuaciones de las Tabla 2. La envolvente más baja da un ángulo de alcance mínimo que corresponde a la desviación máxima del deslizamiento. Esto es apropiado para estudios preliminares de evaluación de la distancia de (Corominas (2011); Corominas & Alonso, 1990) Hunter & Fell (2011), encontraron que el ángulo de alcance de recorrido se correlaciona razonablemente bien con el ángulo de pendiente descendente y el grado de confinamiento del camino (Tabla 2). Sin embargo, sus datos presentan amplia dispersión típica de tales correlaciones. (Domaas 1994) Determinó ángulos de alcance a partir del ángulo (Ψ) de la línea que une la zona de desprendimiento con el pie del talud deslizado (Figura 2), para tres intervalos de altura de caída vertical (H):

$$H < 200 \text{ m}; \quad \alpha = 0.909 \Psi - 8^\circ$$

$$200 < H < 300 \text{ m}; \quad \alpha = 0.875 \Psi - 3.7^\circ$$

$$H > 300 \text{ m}; \quad \alpha = 0.842 \Psi - 0.7^\circ$$

Para superar la restricción de la estimación previa de caída y volumen, se han propuesto otros enfoques Nicoletti & Sorriso-Valvo (1991), que solo requieren la estimación previa de la diferencia de elevación apropiado en pendientes que tienen superficies planas debajo. Estos autores encontraron para volúmenes de deslizamientos que oscilan entre 5×10^6 y 6×10^9 m³, la relación L_c/L que está comprendida entre 0.5 y 0.8.

Para el rango de valores que se muestra en la ecuación (1), L varía entre $3.2H$ y $8H$. La zona de desprendimiento es el área más lejana del punto de la pendiente de talud que el material que cae, estos materiales pueden alcanzar rebotando y rodando. Evans & Hungr (2011), utilizan el concepto del ángulo de alcance de deslizamiento (β) para determinar la distancia máxima de recorrido de un desprendimiento de rocas. Se define por el ángulo de la línea que une el vértice de la zona alta deslizada con el bloque más alejado que se ha deslizado. Este concepto se aplica solo a los desprendimientos fragmentados, que se definen como aquellos eventos caracterizados por una mayor o menor de partículas individuales que involucran un volumen de 105 m³, aunque no hay un volumen bien definido.

El concepto básico del ángulo de alcance de deslizamiento es que la mayor parte de la energía cinética de un fragmento se pierde en los primeros impactos en la pendiente del talud; la desviación final viene dado por el ángulo de fricción de rodadura que se obtiene proyectando la pendiente del talud. Para ángulos de β mínimo, Evans & Hungr (2011), recomiendan un valor de 27.5°, que es una estimación preliminar. Sin embargo, pueden presentarse ángulos menores, cuando el terreno natural es relativamente liso, como glaciales o superficies cubiertas por arbustos, cuyos ángulos pueden alcanzar entre 23° y 24°. (Domaas 1994) Observó ángulos de alcance de deslizamiento de 17°, encontró que este ángulo depende de la altura de material deslizado (H_1).

$$\beta = 0.562H_1 + 13.7^\circ \dots\dots\dots(4)$$

De acuerdo con las investigaciones de Domaas (1994), para alturas de taludes menores a 200 m, recomienda ángulos de alcance deslizado con valores de 25°. Para taludes con altura menor a 100 m, este ángulo recomendado es de 16°.

El ángulo de alcance de deslizamiento se ha calculado para zonas peligrosas por desprendimiento de rocas. Se determinó para cien bloques aproximadamente y cantos rodados de eventos recientes de caída de rocas; encontrándose una relación inversa entre la tangente de este ángulo y el volumen (V) de los fragmentos individuales. Los ángulos de alcance más pequeños observados fueron de 26°. Una envolvente inferior de estos ángulos (mínimos) para los diferentes volúmenes tiene la siguiente forma:

$$\text{Log tan } \beta = 0.045 \text{Log} V - 0.233 \dots\dots\dots(5)$$

Según lo mencionado, se definieron las zonas susceptibles al desprendimiento de rocas con base en la

distribución espacial de los bloques caídos. Se trazaron varios límites de ángulos de alcance desde los diferentes vértices de la falla, teniendo en cuenta la probabilidad que los bloques se desplacen más. Estos ángulos son de 33°, 32° y 30° que corresponden a una probabilidad de 1, 0.1 y 0.01, respectivamente, mientras que Evans & Hungr (2011) tomaron un valor menor de 27.5° debido al pequeño número de casos disponibles.

El Instituto Geotécnico de Noruega (NGI) ha desarrollado un método para estimar la distancia de viaje de los desprendimientos de rocas ubicada en las laderas de las montañas (Domaas 1994). Este método, al igual que el método del ángulo de alcance deslizado, se puede aplicar solo en lugares donde se han desarrollado depósitos de talud (pantalla). Además, la validez del análisis NGI se restringe a los casos de caída de rocas donde la pendiente promedio de la superficie del suelo más alejada del talud es menor de 12°. En tales condiciones, se derivó una relación entre la altura total de caída (H) y la distancia recorrida (S_1) por los bloques de roca más allá del pie de talud (ver Figura 02). Cuanto mayor es la altura, mayor es S_1 . La línea del límite se expresa de la siguiente forma:

$$S_1 = aH + b = 0.3065H + 24.1m \dots\dots\dots(6)$$

Por otra parte, la predicción del área cubierta por el material deslizado se podría obtener considerando el área afectada por la llegada de los escombros de deslizamientos. Se ha encontrado una proporcionalidad aproximada entre el volumen (V) de los escombros de los deslizamientos de tierra y el área (A) cubierta por ellos. Estas relaciones han sido observadas (T. R. H. Davies, 1982). Proporciona la siguiente ecuación empírica:

$$\text{Log} A = 1.9 + 0.57 \text{Log} V \dots\dots\dots(7)$$

1.7 Análisis de efectos

1.7.1 Elementos de riesgo

El análisis por consecuencia se basa en los elementos de riesgo y su vulnerabilidad, estos elementos son preliminares en comparación con otros peligros. Se tiene en cuenta que la vulnerabilidad es el grado de pérdida de un elemento dentro del área afectada por el deslizamiento.

La vulnerabilidad de los elementos de riesgo al deslizamiento podría ser: instrumentación geotécnica instalada, volquetes que transportan desmonte, personal obrero y supervisor, el acceso construido y el medio ambiente. Estos, requieren análisis particulares en términos de definición y clasificación.

Dentro del deslizamiento, pueden existir áreas sensibles donde el daño será más probable (o mayor), sin importar el desplazamiento total del deslizamiento o la energía liberada. Esto ocurre, por ejemplo, en los límites del deslizamiento, como la cresta del depósito de desmonte donde se podrían desarrollar tensiones de tracción con el resultado de grietas por tensión, agotamiento de la superficie del suelo y rotación local.

1.7.2 Probabilidad espacial temporal ($P_{(t,s)}$)

Se define si los elementos en riesgo son móviles (por ejemplo, personas en actividad operativa y/o vehículos circulando) o cuando hay variaciones de ocupación de las instalaciones (por ejemplo, entre la noche y el día, entre semana y fines de semana, verano e invierno), es necesario tener en cuenta la probabilidad de que haya personas (o un número particular de personas) en el área afectada por el posible deslizamiento.

Estos cálculos permiten la posibilidad de que las personas reciban advertencias del inminente deslizamiento y puedan evacuar el área. Cada caso debe considerar los detalles de la situación. Generalmente, es más probable que las personas observen el inicio del movimiento y se retiren del área de deslizamiento; o afecte directamente a estas personas a menos que la velocidad de movimiento sea lenta.

1.8 Evaluación de Riesgos

1.8.1 Determinación de la probabilidad anual de riesgos

Leventhal (2007), propone rangos de frecuencia y probabilidad anual para riesgos por deslizamientos, tal como se señala en la Tabla 3.

Tabla 3. Determinación de probabilidad anual de riesgos

frecuencia	Probabilidad anual
Casi seguro	1:10
Probable	1:100
Posible	1:1000
Improbable	1:10,000
Raro	1:100,000
Poco creíble	1:1,000,000

Fuente: (Leventhal, 2007)

1.8.2 Determinación de riesgo por pérdida de vida

Dado que, en el medio, no se cuenta con estándares para definir el riesgo tolerable que relaciona la seguridad percibida; se puede utilizar la Tabla 4 que muestra los criterios de riesgo de muerte individual, descritos por Leroi E. et al. (2005).

Los riesgos tolerables son riesgos dentro de un rango con el que la sociedad puede vivir para obtener ciertos beneficios. Es un rango de riesgos considerado como nada

despreciable y necesita ser mantenido bajo revisión y reducido aún más si es posible.

Los riesgos aceptables son aquellos que todos los afectados están dispuestos a aceptar; por lo cual, no se requiere acciones para reducir sus efectos. No obstante, se puede disponer de medidas razonablemente practicables a bajo costo en términos de dinero, tiempo y esfuerzo.

El Comité Nacional Australiano de Grandes Represas (ANCOLD) ha adoptado criterios de riesgo tolerables para evaluar los riesgos que se plantean en presas.

Un riesgo de 1 en 100,000 significa que, en cualquier año, una persona muere por cada 100,000 personas que realizan esa actividad en particular.

La guía de notas de práctica de AGS recomienda que 1: 100,000 es tolerable en áreas desarrolladas, donde se pueden realizar obras como parte del desarrollo para limitar el riesgo. El nivel tolerable se eleva a 1: 10,000 en áreas establecidas, donde riesgos de deslizamientos específicos pueden haber existido para muchos años. El riesgo aceptable generalmente se toma como una décima parte del riesgo tolerable (1: 1,000,000 para nuevos desarrollos y 1: 100,000 para áreas establecidas) y se deben hacer esfuerzos para lograr estos cuando sea factible y financieramente realista.

Los reguladores pueden decidir aplicar criterios de "riesgo aceptable" para casos de consecuencias graves, como escuelas, hospitales y servicios de emergencia en reconocimiento de la importancia de estas estructuras y como una forma de cubrir los riesgos sociales. Esto también se refleja en los criterios recomendados para la pérdida de propiedad para diferentes niveles de importancia de estructuras a continuación.

1.8.3 Análisis de riesgos

Para el análisis de riesgos del DDM, se puede utilizar las directrices del Comité Nacional Australiano de Grandes Represas (ANCOLD, 2003), esto debido a que el resultado de la falla de una presa y el deslizamiento de taludes del DDM, tienen algunas similitudes.

Dado que el impacto ambiental, social y legal no se cuantifican, solo se puede utilizar el juicio para evaluar estos factores asociados. La pérdida de vidas se basa en la suposición de asumir que, una persona se encuentra en la zona de la posible falla del talud, y esta persona pierde la vida, la probabilidad anual es simplemente la probabilidad

Tabla 4. Determinación de riesgos por pérdida de vida

Industria	Descripción	Riesgo/añal	Referencia
Presas	Límite tolerable	10^{-4} /año preso existente, público más el riesgo sujeto a ALARP 10^{-5} /año nueva presa o mayor aumento, público con mayor riesgo, sujeto a ALARP.	(ANCOLD, 2003)
Deslizamientos (con diseño de ingeniería y pendientes naturales)	Límite tolerable	10^{-4} /año público de mayor riesgo, talud existente 10^{-5} /año, público en mayor riesgo, talud nuevo	AGS (2000)

Fuente: Extraída de (Leroi E. et al., 2005)

Abreviatura: ALARP: Riesgos tan bajos como sea razonablemente aceptable

anual de que el deslizamiento ocurra multiplicada por la probabilidad temporal.

Un enfoque más objetivo para la cuantificación del riesgo se da a partir de la curva F-N, la cual ofrece una vista gráfica de los criterios de aceptabilidad del riesgo. Estas curvas representan la relación entre el número de muertes (N) de un solo evento del peligro con la probabilidad del peligro (P). N se puede trazar para F-N y comparar con el riesgo generalmente aceptado.

La Figura 3, elaborado por ANCOLD ALARP (riesgos tan bajos como sea razonablemente aceptable), muestra los criterios de niveles de riesgos aceptables hacia las personas, en la citada figura se observa los límites entre aceptable, tolerable (o como bajo) e intolerable.

II. MÉTODOS

A continuación, se detalla la metodología empleada en la presente investigación.

2.1 Recopilación y análisis de la información existente

Consistió en la recopilación y análisis de información respecto a las condiciones de sismicidad, climatológicas y de geodinámica externa de la zona de estudio; así como, las características geotécnicas del emplazamiento y de la configuración del diseño del depósito de desmonte de mina que está ubicado en el norte del Perú, a una altitud aproximada de 3,900 msnm; provincia de Pataz, departamento de La Libertad.

2.2 Análisis de fallas del DDM

Para el DDM se ha considerado el tipo de falla por derrumbe en el borde que consiste en el deslizamiento de una capa de material o el desprendimiento de la cresta con poca traslación de masa en ambos casos. Los factores que influyen en el tipo de fallas por derrumbe son:

- Disposición con alta frecuencia y con gran volumen, esto ocasiona que el desmonte no se consolide adecuadamente a su ángulo de reposo (37° aprox.) y se generen súbitos reacomodos posteriores que afectan principalmente la cresta.
- Movimientos sísmicos que provoquen el deslizamiento de materiales superficiales.
- Altas precipitaciones sobre el depósito de desmonte con contenido de finos que producen pérdida de resistencia y su consecuente deslizamiento.

2.3 Estimación de la distancia de deslizamiento

Para el DDM se ha estimado la distancia y velocidad de deslizamiento de taludes, basados en observaciones de campo y en el análisis de la relación entre los parámetros que caracterizan el deslizamiento de suelo (volumen), la trayectoria (morfología local, obstrucciones) y la distancia recorrida del material deslizado.

Para el presente análisis de desplazamiento se ha tomado en cuenta casos prácticos de acuerdo con la ecuación propuesta por Okura et al. (2000); la altura de caída (H) usualmente no es una variable conocida, excepto

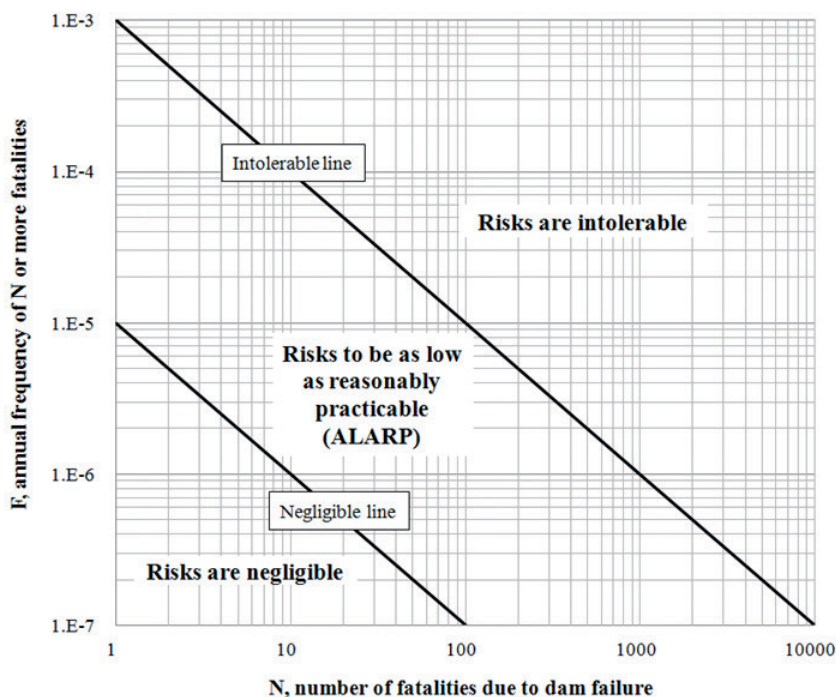


Figura 3. Criterio de aceptación de riesgos F-N (ANCOLD, 2003)

para pendientes que tienen una superficie plana. En estos casos, se ha obtenido la solución gráfica asumiendo un ángulo de alcance, para el cual se trazó una línea desde la zona inicial (fuente); la intersección con la superficie topográfica dará valores de H y L.

De acuerdo con las investigaciones (Domaas 1994), para el caso del talud diseñado del DDM, cuya altura máxima de taludes son menores a 100 m, el ángulo de alcance deslizado se estimó en 20°.

Para el análisis se trazaron varios límites de ángulos de alcance desde los diferentes vértices de la falla, teniendo en cuenta la probabilidad que los bloques se desplacen más. Estos ángulos son de 33°, 32° y 30° que corresponden a una probabilidad de 1, 0.1 y 0.01, respectivamente.

Para calcular la distancia de viaje del desplazamiento (S1) del DDM, se tomó en cuenta la ecuación propuesta por el NGI (ecuación 7).

Tomando en cuenta el volumen de material que sería deslizado (V) en el Depósito de Desmonte de Mina, se ha estimado el área cubierta por el material deslizado (A) utilizando la ecuación 8.

2.4 Consideraciones para el hipotético deslizamiento del DDM

A continuación, se define algunas consideraciones y supuestos planteados para la evaluación del presente estudio:

- De acuerdo con la granulometría del desmonte y al método de disposición, el material almacenado será medianamente denso.
- Se estima que la probabilidad de falla por sismo sea mayor a 10^{-3} AEP. Es decir, ocurre un evento sísmico (sismo máximo creíble).
- El diseño proyectado considera un sistema de manejo de agua de escorrentía superficial y subterránea, conformado por canales, sub-drenes, pozas etc. Sin embargo, para el presente análisis, se ha considerado que el sistema de drenaje colapse y el flujo de agua ingrese al DDM.
- El factor de seguridad del DDM con cargas estáticas, es de 2.2.
- Se ha considerado que el DDM tendrá una falla, incluso ante cargas estáticas, esto sería probable cuando el sistema de drenaje falle e ingrese el flujo de agua al depósito, ante un evento de lluvia extrema. La probabilidad de que este evento ocurra y afecte a las instalaciones y al acceso proyectado, será de 0.25, este valor considera la probabilidad estacional de la zona de estudio.
- El análisis de la falla se ha realizado por el método empírico.
- Posterior al evento sísmico, se estima de manera crítica, que el volumen de material de desmonte que se deslizaría, afectando a las instalaciones que

se ubican en el depósito (Piezómetros y pozas), y al personal que estaría realizando mediciones. Se supone que, en la rampa de acceso, estaría circulando 02 volquetes con sus respectivos operadores.

2.5 Análisis por consecuencia

Los principales efectos de las fallas del DDM que puede ejercer sobre los elementos expuestos, dependen del tipo de desplazamiento y deformaciones asociadas a las pendientes que generan presión, ya sea lateral o resultante del impacto.

2.5.1 Probabilidad espacial temporal ($P_{(T:S)}$)

Para los elementos de riesgo móviles, se ha determinado la proporción de un año (entre 0 y 1.0) en el que una persona o vehículo estará aguas abajo o en el área de deslizamiento, durante el evento. Para la ocupación de las instalaciones (instrumentación geotécnica), es un cálculo de la proporción de un año (entre 0 y 1.0) en el que el número de personas que se considera están monitoreando.

2.5.2 Vulnerabilidad de las personas ($D_{(D:T)}$)

Para el presente análisis, se considera un alto grado de personas en riesgo, de ocurrir un evento de deslizamiento del DDM, por lo cual, se ha supuesto que todo el personal ubicado en la zona de falla perdería la vida (es decir, se asumió la vulnerabilidad, 1.0).

2.5.3 Estimación de la probabilidad

Para las personas que se encuentren ubicadas en la zona del DDM, la probabilidad anual que las personas con mayor riesgo pierdan la vida, durante un evento de falla potencial, está dado por:

$$P_{LOL} = P_{(L)} \times P_{(T:L)} \times P_{(S:T)} \times V_{(D:T)} \dots \dots \dots (8)$$

2.6 Evaluación de Riesgos

2.6.1 Determinación de probabilidad anual de riesgos

Para el DDM, se ha considerado un nivel moderado (M); frecuencia "Posible" con una probabilidad de 1:1000 ($P=0.001/\text{año}$).

2.6.2 Análisis de riesgos del DDM

Para el análisis del riesgo por deslizamiento, se ha tomado en cuenta la posibilidad de pérdida de vidas. En la actualidad la unidad minera, no cuenta con criterios de aceptación estándar disponibles respecto a la posible pérdida de vidas, por lo cual, se recurrió a las directrices de ANCOLD (2003), esto debido a que el resultado de la falla de una presa y el deslizamiento de taludes del DDM, tienen algunas similitudes.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estimación de la distancia de deslizamiento

Para la estimación de la distancia de deslizamiento, se consideró que el DDM falla a partir de la sección crítica

(sección más desfavorable) a causa de un evento sísmico extremo (cuya magnitud sería mayor de VII), este evento hipotético originaría el deslizamiento del material apilado que gatillará el deslizamiento a partir de la superficie de falla definido en el análisis de estabilidad física; el mecanismo de falla sería de tipo “derrumbe en el borde” y “rotacional”.

De manera hipotética, el volumen a deslizar se definió a partir de la superficie de falla de la sección crítica realizada en el modelo geotécnico de estabilidad física; se considera que se deslizaría toda la masa superior delimitada desde la superficie de falla circular (Figura 4). En consecuencia, el

material de desmonte deslizado será de 459,381.57 m³ (Ver Figura 5).

Para el volumen conceptual deslizado para el DDM y reemplazando en la ecuación (3):

$$\text{Log tan } \alpha = -0.159 - 0.068 \text{ Log } 459,381.57$$

$$\alpha = 16^\circ$$

Dado que, $H < 200$ m

$$\psi = 27.5^\circ$$

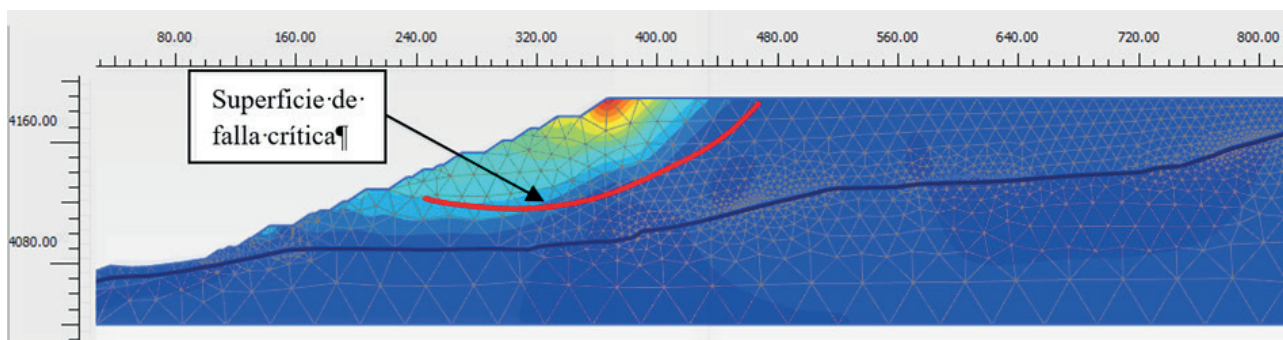


Figura 4. Modelo de estabilidad física y superficie de falla crítica del DDM

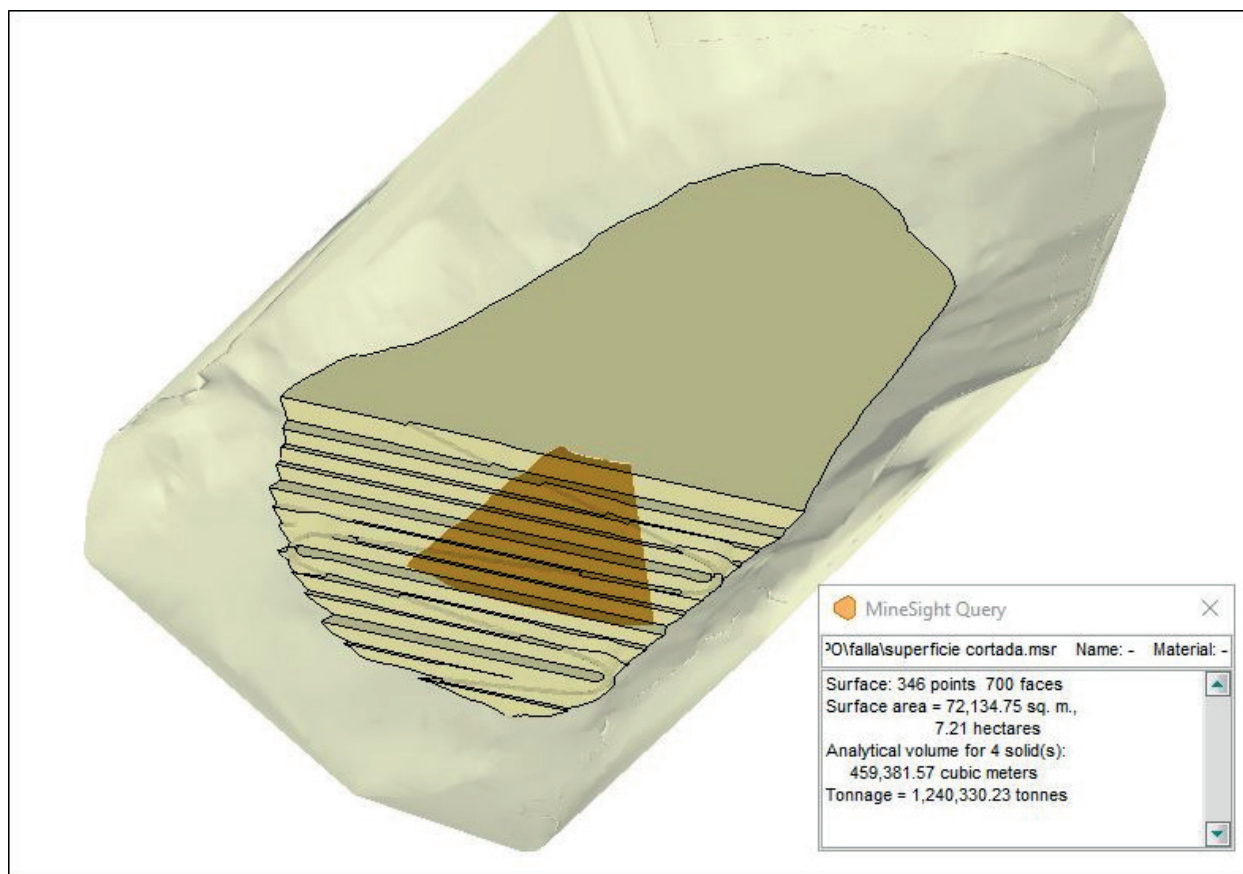


Figura 5. Esquema conceptual de falla en la cresta del DDM

Reemplazando “ α ” en la ecuación (2), $L=3.593H$.

De acuerdo con la Tabla 01, talud de relleno:

$$\text{Log } L = 0.453 + 0.547 \text{ Log } H - 0.305 \text{ Log } (V/W)$$

$$\text{Log } L = 0.453 + 0.547 \text{ Log } 0.278 * L - 0.305 \text{ Log } (2296.91)$$

$$L = 391 \text{ m}; H = 108.85 \text{ m.}$$

Reemplazando en la ecuación (1): $L_e = 226.43 \text{ m}$

De acuerdo con el diseño proyectado del DDM que tiene taludes con altura máxima menor a 100 m, se consideró un ángulo de 16°; por lo tanto, el ángulo de alcance deslizado se estimó en 20°. Reemplazando en la ecuación 4, H_1 se calculó en 11.60 m.

Para el cálculo de la distancia de recorrido más lejano S1, se consideró que la pendiente promedio de la superficie del suelo más alejada del talud es menor de 12°; según el NGI, se utilizó la relación entre la altura total de caída (H) y S1. Se reemplazó en la ecuación 6, obteniéndose un valor de $S1 = 57.46 \text{ m}$

Para el DDM, el área cubierta por el material deslizado (A) se calculó utilizando la ecuación 7 que relaciona el volumen de los escombros del deslizamiento (V) con la citada área. El valor de A es de 134,103 m² (13.41 ha).

En la Tabla 5. Se resumen los parámetros de deslizamiento del DDM que fueron calculados utilizando las ecuaciones señaladas en el presente artículo.

3.2 Determinación de $(P_{(T:S)})$

Para el DDM, se ha considerado que, durante el evento, obreros estarían ubicadas en un punto de instrumentación geotécnica y vehículos circulando por la rampa de acceso.

Se ha estimado, que 2 personas estarían realizando trabajos de monitoreo (mayor riesgo), en un tiempo

promedio de 3 horas/día, 24 veces/año. Asimismo, 1 supervisor estaría ubicado en la misma zona, en un periodo de 1 hora por día.

Por lo tanto:

$$P_{(T:S)1} = (3/24) * (24/365) = 0.0082$$

$$P_{(T:S)2} = (1/24) * (24/365) = 0.0027$$

Para el caso de los vehículos que serían afectados durante el deslizamiento, se ha estimado 2 volquetes, de un total de 15 volquetes que estarían circulando por la rampa de acceso del depósito a una velocidad promedio de 25 Km/hora.

La probabilidad de que un vehículo circule por la rampa de acceso, y sobre este se desliza el desmonte, está dado por:

$$P_{(T:S)} = \frac{N_v}{24} * \frac{L}{1000} * \frac{1}{V_v}$$

N_v : Numero de vehículos por día en promedio

L: Longitud promedio del vehículo (m)

V_v : Velocidad del vehículo (Km/h)

$$P_{(T:S)3} = (10/24) * (12/1000) * (1/25)$$

Por lo tanto, $P_{(T:S)3} = 1.41 \times 10^{-4}$.

Si los dos volquetes se trasladan 250 veces al año:

$$\text{Por lo tanto, } P_{(T:S)4} = 2 \times 250 \times 1.416 \times 10^{-4} = 7.08 \times 10^{-2}$$

La Tabla 6 presenta el resumen de la probabilidad anual de pérdidas de vidas.

Tabla 5. Parámetros de deslizamiento del DDM - método empírico

Parámetro/Valor	α (°)	β (°)	ψ (°)	L (m)	H (m)	H_1 (m)	L_e (m)	S_1 (m)
Valores	16	46	27.5	391	109	11.6	226	57.5

Abreviaturas: α : ángulo de alcance; β : ángulo de alcance de deslizamiento; ψ : ángulo entre inicio y pie del talud deslizado; L: distancia de recorrido H: altura de caída vertical; H_1 : altura de material deslizado L_e : distancia de la proyección horizontal de la desviación más lejano trazada desde la corona del deslizamiento; S_1 : distancia de recorrido más lejano.

Tabla 6. Resumen de probabilidad anual de pérdida de vidas

Tipo de carga	Acción/ubicación de las personas	Nº personas	Probabilidad temporal	Probabilidad anual $P_{(T:S)}$	Probabilidad acumulada anual F
estático (evento de lluvia) 10 ⁻⁴ /año	Monitoreo/instrumentación	2	0.0082	4.0 x 10 ⁻⁶	5.55 x 10 ⁻⁶
	supervisor/instrumentación	1	0.0027	1.4 x 10 ⁻⁶	
	Conductor/rampa de acceso	2	0.00014	7.08 x 10 ⁻⁸	
Dinámico (evento de sismo) 10 ⁻⁵ /año	Monitoreo/instrumentación	2	0.0082	4.0 x 10 ⁻⁷	5.55 x 10 ⁻⁷
	supervisor/instrumentación	1	0.0027	1.4 x 10 ⁻⁷	
	Conductor/rampa de acceso	2	0.00014	7.08 x 10 ⁻⁹	

Abreviaturas: AEP: Probabilidad anual de excedencia; LOL: Pérdida de vidas.

3.3 Evaluación del riesgo del DDM

Como se señaló, para la evaluación de riesgos, se aplicó casi con certeza a la pérdida de vidas potencial o esperada. El criterio de aceptación más cercano para el DDM, han sido los criterios recomendados por ANCOLD (2003). Las dos medidas de riesgo aceptable son el riesgo individual y el riesgo social.

- Riesgo individual: el nivel de riesgo socialmente aceptable para un individuo en particular.
- Riesgo social: el nivel de riesgo socialmente aceptable en términos de eventos que impactan en la sociedad a nivel comunitario, regional o nacional.

Cuando se evalúa el riesgo individual, ANCOLD (2003) propone examinar dos situaciones. El primero es el nivel promedio de riesgo individual que considera el riesgo para un individuo cuando se toma como una persona en la población general en riesgo (PAR).

El segundo es el nivel de riesgo para la persona más expuesta, que normalmente sería la persona más cercana a la presa. Las pautas de riesgo de ANCOLD (2003) recomiendan un nivel promedio de riesgo individual de 106/año para todas las presas nuevas. Para la persona con mayor riesgo, este valor es 10 veces mayor. El nivel promedio de riesgo para miembros particulares del público para una represa existente es 105/año y para una persona definida o la más expuesta es 104/año, pero estos límites están sujetos a los límites de “tan bajo” principio “razonablemente práctico” (ALARP).

El gráfico “F-N” es acumulativo que considera la probabilidad de que se pierdan N o más vidas en todas las condiciones de carga. N es el número incremental de vidas perdidas. Iniciando con el mayor valor de N para una carga en particular, las probabilidades se agregaron progresivamente para cada valor de N y cada tipo de carga. El resultado es un gráfico de líneas que cubre el LOL para todos los tipos de carga.

Para la evacuación de falla potencial del DDM, los valores F-N graficados en la Figura 3, se encuentran por debajo de la “línea despreciable” en la región “despreciable”. Para el “promedio individual”, el mejor enfoque parecería ser los distintos grupos, es decir, las personas que realizan el monitoreo, el supervisor y las personas que estarían conduciendo los volquetes, por separado. Si bien, por ejemplo, el chofer del volquete puede morir por el

deslizamiento, forman parte de un grupo general de (15x2) personas cada día expuestas al riesgo. Por otro lado, se supone que las personas que ejecutan el monitoreo y el supervisor mueren, si se produce el deslizamiento. En la Tabla 7, se resume la probabilidad anual de pérdidas de vidas.

IV. CONCLUSIONES

1. Se analizó y evaluó los riesgos por deslizamiento del depósito de desmonte de mina de gran altura considerando un evento sísmico, determinando la distancia de recorrido del material deslizado mediante métodos empíricos señalados en el numeral 1.6 del presente artículo; y su consecuencia por afectación a las personas.
2. En el estudio se ha cuantificado el peligro y el riesgo para el hipotético deslizamiento del DDM proyectado. Para el análisis del peligro, donde se determinó la distancia de deslizamiento, se utilizó el método empírico. Para el análisis de la frecuencia, se consideró una probabilidad de 10^{-4} /año para eventos de precipitaciones y una probabilidad de 10^{-5} /año para eventos de sismo. El análisis por consecuencia, considero como elemento de riesgo principal a las personas que se ubicarían en el área afectada por el potencial deslizamiento, cuya probabilidad espacial temporal es de 7.08×10^{-2} ; la vulnerabilidad asumida fue de 1.0. El resultado de la probabilidad anual de pérdidas de vidas fue de 5.55×10^{-6} para un evento de lluvia y de 5.55×10^{-7} para un evento sísmico.
3. La evaluación de riesgo por deslizamiento del DDM, se cuantificó trazando la probabilidad anual de muertes contra el número de muertes esperadas. La curva F/N sugiere que el riesgo se encuentra por debajo de la “línea despreciable” en la región “despreciable”, tanto desde el punto de vista del riesgo individual como desde el punto de vista del riesgo social; sin embargo, el propietario debe tomar medidas a largo plazo para reducir los riesgos para salvaguardar vidas. Aunque las curvas F/N pueden usarse objetivamente para evaluar si un riesgo vale la pena el gasto de fondos, las circunstancias psicológicas o políticas pueden reemplazar la noción de riesgo aceptable.

Tabla 7. Resumen de probabilidad anual de pérdida de vidas

Personas localización	N° personas	Factor LOL/PAR	Riego individual promedio/año (probabilidad anual x factor de PAR)			ANCOLD Límite/año Presas nuevas
			Estático	Sísmico	Total	
Monitoreo instrumentación	2	2/2	4.0×10^{-6}	4.0×10^{-7}	4.52×10^{-6}	10^{-6}
Supervisor instrumentación	1	1/1	1.4×10^{-6}	1.4×10^{-7}	1.50×10^{-6}	10^{-6}
Conductor de volquete rampa de acceso	2	2/(2x15)	4.72×10^{-9}	4.72×10^{-10}	5.19×10^{-9}	10^{-6}

Abreviaturas: LOL: Pérdida de vida; PAR: Población en riesgo

4. Teniendo como base la literatura técnica referida a los posibles modos de falla de instalaciones similares al DDM, se ha estimado la distancia de recorrido utilizando métodos empíricos disponibles y el juicio de expertos; se evaluó que la distancia máxima de recorrido del desmonte de mina almacenado será de 391 m respecto al límite de la cresta del talud más crítico.

V. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y, en especial, a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de dicha institución, por ofrecer oportunidades de superación profesional.

Contribución de autoría:

Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Administración del proyecto, Supervisión, Validación y Redacción - revisión y edición: Fernando Samuel Mendoza Maldonado.

Curación de datos, Adquisición de fondos, Investigación, Recursos, Software, Visualización y Redacción - borrador original: Frank Martín Maldonado Pariguana.

VI. REFERENCIAS

- ANCOLD. (2003). *Guidelines on Risk Assessment*. The Australian National Committee on Large Dams Incorporated. <https://www.ancold.org.au/?product=guidelines-on-risk-assessment-2003>
- Corominas, J. (2011). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *https://doi.org/10.1139/T96-005*, 33(2), 260–271. <https://doi.org/10.1139/T96-005>
- Corominas, J., & Alonso, E. E. (1990). Geomorphological effects of extreme floods (November 1982) in the southern Pyrenees. *Proceedings of Two Lausanne Symposia. IAHS Publ.*, 295–302. https://www.researchgate.net/publication/238732811_Geomorphological_effects_of_extreme_floods_November_1982_in_the_southern_Pyrenees
- Corominas, J., Copons, R., Vilaplana, J. M., Altimir, J., & Amigó, J. (2003). Integrated Landslide Susceptibility Analysis and Hazard Assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards* 2003 30:3, 30(3), 421–435. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007094.74878.D3>
- Cruden, D. M., & V. D. J. (1996). *Landslide Types and Processes, Special Report, Transportation Research Board*. National Academy of Sciences. https://www.researchgate.net/publication/269710355_CrudensDM_Varnes_DJ_1996_Landslide_Types_and_Processes_Special_Report_Transportation_Research_Board_National_Academy_of_Sciences_24736-75
- Davies, T. R. H. (1982). Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization. *Rock Mechanics* 1982 15:1, 15(1), 9–24. <https://doi.org/10.1007/BF01239474>
- Davies, T. R., McSaveney, M. J., & Hodgson, K. A. (1999). A fragmentation-spreading model for long-runout rock avalanches. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(6). <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/t99-067>
- Evans, S. G., & Hungr, O. (2011). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *https://doi.org/10.1139/T93-054*, 30(4), 620–636. <https://doi.org/10.1139/T93-054>
- Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S., & Leroi, E. (2005). A Framework for Landslide Risk Assessment and Management. In R. F. R. C. and E. Eberhardt. Oldrich Hungr (Ed.), *Landslide Risk Management* (pp. 3–25). <https://play.google.com/books/reader?id=VzjNBQAAQBAJ&pg=GBS.PP1>
- Finlay, P. J., Mostyn, G. R., & Fell, R. (2011). Landslide risk assessment: prediction of travel distance. *https://doi.org/10.1139/T99-012*, 36(3), 556–562. <https://doi.org/10.1139/T99-012>
- Hsu, K. J. (1975). Catastrophic Debris Streams (Sturzstroms) Generated by Rockfalls. *GSA Bulletin | GeoScienceWorld*, 86(1), 129–140. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsbulletin/article-abstract/86/1/129/187144/Catastrophic-Debris-Streams-Sturzstroms-Generated?redirectedFrom=fulltext>
- Hungr, O., Corominas, J., & Eberhardt, E. (2005). Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. *Landslide Risk Management*, 109–138. <https://doi.org/10.1201/9781439833711-7>
- Hunter, G., & Fell, R. (2011). Travel distance angle for “rapid” landslides in constructed and natural soil slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1123–1141. <https://doi.org/10.1139/T03-061>
- Hutchinson, J. N. (1988). *Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology*. http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_classification_hutchinson.htm
- Jakob, M., & Weatherly, H. (2005). Debris flow hazard and risk assessment, Jones Creek, Washington. *Landslide Risk Management*, 1, 543–552. <https://doi.org/10.1201/9781439833711-38>
- Leroi E., Bonnard Ch., Fell R., & McInnes R. (2005). *Landslide Risk Management* (R. F. R. C. and E. Eberhardt. Oldrich Hungr, Ed.; pp. 159–192). Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management. <https://books.google.com.pe/books?id=VzjNBQAAQBAJ&pg=PP1&hl=es&pg=PR4#v=onepage&q&f=false>
- Leventhal, A. R. (2007). A national landslide risk management framework for Australia. *Australian Geomechanics Society*, 42(1). <https://australiangeomechanics.org/papers/a-national-landslide-risk-management-framework-for-australia/>
- Nicoletti, P. G., & Sorriso-Valvo, M. (1991). Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches. *GSA Bulletin | GeoScienceWorld*, 103(10), 1365–1373. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsbulletin/article-abstract/103/10/1365/182525/Geomorphic-controls-of-the-shape-and-mobility-of?redirectedFrom=fulltext>
- Okura, Y., Kitahara, H., Sammori, T., & Kawanami, A. (2000). The effects of rockfall volume on runout distance. *Engineering Geology*, 58(2), 109–124. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00049-1)

- Scheidegger, A. E. (1973). On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics 1973* 5:4, 5(4), 231–236. <https://doi.org/10.1007/BF01301796>
- Scheller, E. (1971). *Bericht über die 86. ordentliche Generalversammlung der Schweizerischen Geologischen Gesellschaft: Samstag und Sonntag, 17. und 18. Oktober 1970* (pp. 195–202). <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=egh-001:1971:64::813#248>
- Silgado Ferro, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 -1974) - [Boletín C 3]. *Repositorio Institucional INGEMMET. Instituto de Geología y Minería. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 3, 1–130. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/251>