REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

Efecto de la compactación del desmonte sobre la estabilidad global del depósito para disminuir riesgos ambientales en una empresa minera, Moquegua 2025

Tesis presentada por el Bachiller:

Delgado Monteagudo, Sebastian Jorge

ORCID: 0009-0007-0608-3977

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Barreda de la Cruz, Miguel Alberto

ORCID: 0002-0000-9329-4460

Arequipa - Perú

2025

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 26 de Noviembre del 2025

Dictamen: 016107-C-EPIM-2025

Visto el borrador del expediente 016107, presentado por:

2019242651 - DELGADO MONTEAGUDO SEBASTIAN JORGE

Titulado:

EFECTO DE LA COMPACTACIÓN DEL DESMONTE SOBRE LA ESTABILIDAD GLOBAL DEL DEPÓSITO PARA DISMINUIR RIESGOS AMBIENTALES EN UNA EMPRESA MINERA, MOQUEGUA 2025

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

40902304 - LINARES FLORES CASTRO ANTONIO ERICK
DICTAMINADOR

40379481 - PAREDES SALAS OMAR WILLY
DICTAMINADOR

29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR

EFECTO DE LA COMPACTACIÓN DEL DESMONTE SOBRE LA ESTABILIDAD GLOBAL DEL DEPÓSITO PARA DISMINUIR RIESGOS AMBIENTALES EN UNA EMPRESA MINERA, MOQUEGUA 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%	13%	5%	10%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	6%
2	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
3	Submitted to Universidad Andina del Cusco Trabajo del estudiante	<1%
4	de.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
6	EMPRESA DE PROYECTOS Y SERVICIOS EN SANEAMIENTO AMBIENTAL SOCIEDAD COMERCIAL DE RESPONSABILIDAD LTDA. "EIA del Proyecto de Disposición Final de Residuos Sólidos del Distrito de Challhuahuacho-IGA0003859", R.D. N° 3690/2008/DIGESA/SA, 2021 Publicación	<1%
7	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia Trabajo del estudiante	<1%

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

DEDICATORIA

A mis padres, cuyo amor, dedicación y esfuerzo han sido el cimiento sobre el cual he construido cada paso de mi camino académico. Gracias por enseñarme con su ejemplo el valor del trabajo, la perseverancia y la honestidad; por acompañarme incluso en los momentos más difíciles y celebrar conmigo cada logro, por pequeño que fuera.

A mi hermana, por ser una consejera incansable, una voz de aliento y un refugio seguro en tiempos de dudas. Su apoyo constante ha sido una guía que me impulsó a seguir adelante.

Y a Dios, por la oportunidad de pertenecer a una familia que ha sabido brindarme comprensión, fortaleza y amor incondicional. A él agradezco cada bendición, cada aprendizaje y la posibilidad de llegar hasta este momento tan significativo en mi vida.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

AGRADECIMIENTOS

A mis docentes, por su dedicación, paciencia y por compartir conmigo sus conocimientos y valores. Cada uno de ellos contribuyó de manera significativa a mi formación académica y personal, y su guía fue fundamental para que este proyecto llegara a buen término.

A mis compañeros de universidad, quienes hicieron de este camino una experiencia enriquecedora y memorable. Gracias por las horas de estudio compartidas, el apoyo mutuo en los momentos de mayor presión y por acompañarme en cada etapa de este proceso.

También deseo agradecer a mis jefes y compañeros de trabajo, por su comprensión, motivación y respaldo durante este periodo. Su apoyo me permitió equilibrar mis responsabilidades laborales con las académicas, y sus palabras de aliento fueron un impulso constante para continuar.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

RESUMEN

El presente estudio aborda la problemática de la estabilidad de los depósitos de desmonte en una empresa minera del sur del Perú, con el objetivo general de evaluar el impacto de la compactación del desmonte sobre la estabilidad global del depósito, con el fin de reducir los riesgos ambientales asociados. El proceso de compactación del desmonte influye directamente en la cohesión, resistencia al corte y estabilidad estructural del material, lo que afecta la seguridad de los taludes y el medio ambiente circundante. La metodología utilizada incluyó análisis geotécnicos detallados de los materiales, ensayos de compactación, mediciones de presión intersticial, y el empleo de diversos equipos de compactación adecuados según las características de cada material. Los resultados mostraron que la compactación adecuada permitió alcanzar un factor de seguridad geotécnico promedio de 1.6 y un grado de compactación de entre el 94% y 97% en los diferentes depósitos. Además, la presión de poros medida en zonas críticas se redujo significativamente, con valores que oscilaron entre 90 kPa y 110 kPa, lo que indica una mejora en la estabilidad del material. Como conclusión, se determinó que la correcta implementación de la compactación en capas delgadas, junto con el control adecuado de la humedad y el uso de maquinaria especializada, es clave para mejorar la estabilidad estructural de los depósitos de desmonte y mitigar los impactos ambientales, asegurando la sostenibilidad de la operación minera a largo plazo.

Palabras clave: Compactación, estabilidad estructural, desmonte.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ABSTRACT

This study addresses the problem of waste rock dump stability at a mining company in southern Peru, with the overall objective of evaluating the impact of waste rock compaction on the overall stability of the dump, in order to reduce associated environmental risks. The waste rock compaction process directly influences the cohesion, shear strength, and structural stability of the material, affecting slope safety and the surrounding environment. The methodology used included detailed geotechnical analyses of the materials, compaction tests, pore water pressure measurements, and the use of various compaction equipment appropriate to the characteristics of each material. The results showed that proper compaction achieved an average geotechnical safety factor of 1.6 and a degree of compaction between 94% and 97% in the different dumps. Furthermore, the pore pressure measured in critical areas was significantly reduced, with values ranging from 90 kPa to 110 kPa, indicating an improvement in material stability. In conclusion, it was determined that the correct implementation of thin-layer compaction, along with adequate moisture control and the use of specialized machinery, is key to improving the structural stability of waste rock dumps and mitigating environmental impacts, ensuring the long-term sustainability of the mining operation.

Keywords: Compaction, structural stability, waste rock.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 3

1. Planteamiento teórico 3

1.1. Descripción de la problemática 3

1.2. Formulación del problema 4

1.2.1. Problema general 4

1.2.2. Problemas Específicos 4

1.3. Objetivos de la investigación 5

1.3.1. Objetivo general 5

1.3.2. Objetivos específicos 5

1.4. Justificación 5

1.4.1. Justificación teórica 5

1.4.2. Justificación metodológica 6

1.4.3. Justificación práctica 6

1.5. Delimitación de la investigación 7

1.5.1. Delimitación espacial 7

1.5.2. Delimitación social 7

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

1.5.3. Delimitación temporal 7

1.5.4. Delimitación conceptual 7

1.6. Hipótesis de la investigación 8

1.7. Variables 8

1.8. Limitaciones 9

1.9. Metodología de la investigación 10

1.9.1. Método de la investigación 10

1.9.2. Tipo de investigación 10

1.9.3. Nivel de la investigación 11

1.10. Cobertura de estudio 11

1.10.1. Población 11

1.10.2. Muestra 11

1.11. Técnicas e instrumentos 12

1.11.1. Técnicas de la investigación 12

1.11.2. Instrumentos de la investigación 12

1.12. Procesamiento estadístico de la información 13

1.13. Matriz de consistencia 14

CAPÍTULO II 16

2.1. Marco teórico 16

2.1.1. Antecedentes de la investigación 16

2.2. Marco conceptual y legal 19

2.2.1. Compactación del desmonte 19

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.2.2. Capacitación 19

2.2.3. Ensayo Proctor 20

2.2.4. Disponibilidad de maquinaria 20

2.2.5. Resistencia al corte 21

2.2.6. Factor de seguridad 21

2.2.7. Presión intersticial 22

2.2.8. Estabilidad global del depósito 22

2.2.9. Balance de materia 23

2.2.10. Consolidación del suelo 23

CAPÍTULO III 25

3.1. Resultados 25

3.2. Discusión de resultados 51

CONCLUSIONES 54

RECOMENDACIONES 56

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 58

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables 8

Tabla 2 Matriz de consistencia 14

Tabla 3 Valor del ángulo de fricción interna y cohesión del desmonte compactado 25

Tabla 4 Nivel de presión de poros medida en zonas críticas del depósito 27

Tabla 5 Factor de seguridad geotécnico 28

Tabla 6 Porcentaje de densidad seca alcanzada 29

Tabla 7 Efecto de la humedad en la compactación 31

Tabla 8 Evolución de la resistencia al corte con diferentes grados de compactación 32

Tabla 9 Estabilidad del depósito en función de la profundidad 34

Tabla 10 Impacto de la compactación en la reducción de riesgos ambientales 35

Tabla 11 Estrategias de compactación recomendadas 36

Tabla 12 Factor de seguridad geotécnico 37

Tabla 13 Grado de compactación 38

Tabla 14 Propiedades físicas del desmonte 38

Tabla 15 Clasificación de los materiales de desmonte 39

Tabla 16 Relación entre la humedad y la estabilidad 40

Tabla 17 Densidad de materiales en zonas críticas 40

Tabla 18 Condiciones hidrogeológicas 41

Tabla 19 Métodos de compactación propuestos 42

Tabla 20 Eficiencia de los equipos de compactación 43

Tabla 21 Parámetros óptimos de humedad para la compactación 44

Tabla 22 Impacto de la compactación en la estabilidad estructural 45

Tabla 23 Estrategias de optimización de la compactación 45

Tabla 24 Impacto de la compactación sobre la reducción de la erosión del suelo 47

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Tabla 25 Impacto de la compactación sobre la reducción de la generación de polvo 48

Tabla 26 Impacto de la compactación sobre la reducción de la lixiviación de contaminantes..49

Tabla 27 Impacto de la compactación sobre la reducción de deslizamientos.....50

Tabla 28 Impacto del control de la humedad en el proceso de compactación.....51

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ángulo de fricción interna....26

Figura 2 Cohesión....26

Figura 3 Presión de poros....27

Figura 4 Densidad seca....29

Figura 5 Densidad máxima Proctor....30

Figura 6 % Densidad seca Proctor....30

Figura 7 Porcentaje de humedad....31

Figura 8 Densidad seca....32

Figura 9 Grado de compactación....33

Figura 10 Resistencia al corte....33

Figura 11 Estabilidad del depósito....34

Figura 12 Riesgo ambiental reducido....35

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades económicas más importantes en muchas regiones del mundo, especialmente en el sur de Perú, esta zona representa una fuente significativa de producción de cobre. Sin embargo, esta actividad viene acompañada de una serie de desafíos ambientales y operativos, siendo uno de los principales la gestión adecuada de los depósitos de desmonte. Los residuos generados durante el proceso de extracción, conocidos como desmonte, deben ser gestionados de manera eficiente para evitar impactos negativos sobre el medio ambiente y las comunidades circundantes. Una de las estrategias clave para garantizar la estabilidad de estos depósitos es la compactación del desmonte, un proceso que, cuando se realiza correctamente, mejora la cohesión y la resistencia estructural de los taludes, reduciendo así el riesgo de deslizamientos y otros problemas asociados.

La presente investigación tiene como objetivo analizar el efecto de la compactación del desmonte en la estabilidad global del depósito en una empresa minera. A través de un análisis exhaustivo de las características geotécnicas del material y del depósito se busca probar métodos de compactación que optimicen la estabilidad del depósito y minimicen los riesgos ambientales. Esta investigación aporta no solo soluciones prácticas para optimizar la seguridad en las operaciones mineras, sino también sostenibilidad del entorno, logrando así, una importante reducción en la generación de polvo, la erosión del suelo y la contaminación de los cuerpos en contacto de los cuerpos de agua cercanos. La metodología utilizada en esta investigación se basa en la recopilación de datos geotécnicos, la implementación de ensayos de laboratorio y de campo, así como también, la aplicación de técnicas avanzadas de compactación. Se realizará un análisis detallado de los resultados obtenidos en el estudio con el fin de identificar los métodos más adecuados para mejorar la estabilidad que reduzcan los riesgos asociados a la operación de la mina y, con ello, lograr una gestión efectiva y sostenible

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

de los recursos mineros. Este enfoque permitirá contribuir al desarrollo de soluciones que optimicen la productividad de la mina como por la protección del medio ambiente.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO I

1. Planteamiento teórico

1.1. Descripción de la problemática

A nivel internacional, el manejo de residuos mineros, específicamente el desmonte, ha adquirido creciente relevancia debido a su impacto en la estabilidad estructural y los riesgos ambientales asociados. Según el informe del International Council on Mining and Metals (ICMM, 2023), se estima que a nivel mundial se generan más de 100 mil millones de toneladas de residuos sólidos mineros al año, siendo el desmonte uno de los componentes principales. En países con alta actividad minera como Canadá, Australia y Chile, se han reportado incidentes vinculados a fallas en la compactación de depósitos, lo que ha llevado a reforzar normativas técnicas y a invertir en estudios geotécnicos. En el caso chileno, por ejemplo, más del 60% de los depósitos fiscalizados entre 2019 y 2022 presentaron observaciones relacionadas con deficiencias en su compactación y estabilidad estructural (SERNAGEOMIN, 2023).

En el entorno nacional, el Ministerio de Energía y Minas del Perú reportó que en el año 2023 se gestionaron más de 1,400 depósitos de desmonte a nivel nacional, de los cuales al menos el 25% no cumplía con los criterios mínimos de estabilidad geotécnica (MINEM, 2023). Adicionalmente, la OEFA identificó que 31 unidades mineras fueron sancionadas por prácticas deficientes en el manejo de desmontes, generando potenciales filtraciones y desplazamientos de material. Estas observaciones se concentran principalmente en regiones con actividad extractiva intensiva como Arequipa, Apurímac y Cajamarca. A pesar de los esfuerzos por actualizar los estándares técnicos, aún existe una brecha significativa en la aplicación de métodos de compactación adecuados que garanticen la estabilidad y minimicen el impacto ambiental.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

En el ámbito local, una empresa minera ubicada en el sur del Perú presenta un depósito de desmonte cuya estabilidad estructural se ha visto comprometida en varias zonas críticas. Un informe geotécnico elaborado en 2024 identificó que el 65% del material acumulado no alcanza los niveles de densidad recomendados para condiciones operativas seguras. Asimismo, durante la última temporada de lluvias se detectaron filtraciones superficiales que aumentaron en un 30% respecto al año anterior, evidenciando la presencia de presión intersticial no controlada. Además, los monitoreos de seguridad ambiental revelaron que los niveles de escorrentía cargada con partículas sólidas superaron en un 18% los límites permitidos por la normativa ambiental vigente. Esta situación pone en evidencia la necesidad de analizar el efecto que tiene la compactación del desmonte sobre la estabilidad global del depósito, con el objetivo de implementar acciones técnicas que mitiguen los riesgos ambientales y estructurales derivados de una gestión inadecuada del residuo.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿De qué manera la compactación del desmonte influye en la estabilidad global del depósito para disminuir los riesgos ambientales en una empresa minera?

1.2.2. Problemas Específicos

a) ¿Cuál es la situación actual del proceso de compactación del desmonte y qué impacto tiene en la estabilidad del depósito en una empresa minera?

b) ¿Qué características geotécnicas del desmonte y condiciones estructurales del depósito influyen en su comportamiento frente a esfuerzos de compactación en una empresa minera?

c) ¿Cómo puede diseñarse técnicamente un proceso de compactación que incremente la estabilidad global del depósito en una empresa minera?

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

d) ¿En qué medida la implementación de parámetros de compactación adecuados contribuye a disminuir los riesgos ambientales asociados al depósito de desmonte en una empresa minera?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Analizar el efecto de la compactación del desmonte sobre la estabilidad global del depósito con el fin de disminuir los riesgos ambientales en una empresa minera.

1.3.2. Objetivos específicos

a) Diagnosticar la situación actual del proceso de compactación del desmonte y su relación con la estabilidad estructural del depósito en una empresa minera.

b) Identificar las características geotécnicas del desmonte y las condiciones del depósito que influyen en su estabilidad frente a procesos de compactación en una empresa minera.

c) Desarrollar una propuesta técnica de compactación que permita optimizar la estabilidad global del depósito en una empresa minera.

d) Evaluar el impacto de la compactación propuesta sobre la reducción de los riesgos ambientales asociados al manejo del depósito de desmonte en una empresa minera.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación teórica

La investigación se justifica al abordar la relación entre la compactación del desmonte y la estabilidad de los depósitos en operaciones mineras, desde un enfoque basado en la mecánica de suelos. Diversos estudios han demostrado que una compactación adecuada mejora la cohesión interna y disminuye la permeabilidad, lo que reduce el riesgo de fallas estructurales

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

y filtraciones. Comprender este efecto permite sustentar decisiones técnicas que favorezcan la seguridad operativa y ambiental. Además, aporta al desarrollo de modelos predictivos que fortalecen la gestión de residuos sólidos mineros bajo criterios geotécnicos eficientes y sostenibles.

1.4.2. Justificación metodológica

La investigación se justifica bajo un enfoque cuantitativo que permite analizar con herramientas geotécnicas y técnicas de campo el comportamiento del desmonte bajo distintos niveles de compactación. Se tiene en cuenta la recolección y procesamiento de datos empíricos que facilite la evaluación objetiva de la estabilidad del depósito. Esto permitirá establecer relaciones causales entre los parámetros de compactación y los indicadores de riesgo ambiental, garantizando resultados reproducibles, medibles y útiles para la toma de decisiones en el ámbito minero.

1.4.3. Justificación práctica

a) Política, económica y social

La investigación se justifica al contribuir con recomendaciones técnicas que fortalecen la gestión ambiental responsable en el sector minero, en concordancia con políticas nacionales orientadas a la sostenibilidad y prevención de riesgos. Optimizar la compactación del desmonte puede reducir costos asociados a contingencias por fallas geotécnicas o sanciones ambientales a nivel económico. Desde la óptica social, la estabilidad de estos depósitos protege la integridad de las comunidades cercanas, generando mayor confianza en la actividad minera formal y promoviendo relaciones más sostenibles entre empresa, Estado y sociedad civil.

b) Profesional, académica personal

La presente investigación se justifica al robustecer las competencias profesionales en el campo de la ingeniería geotécnica y la gestión ambiental minera, abordando una problemática de alta relevancia técnica. Académicamente, la investigación aporta al

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

conocimiento científico aplicado sobre la relación entre la compactación y la estabilidad estructural de los depósitos; ofreciendo fundamentos útiles para futuras investigaciones. A nivel personal, representa una oportunidad de aplicar conocimientos especializados en un contexto real, ayudando a solucionar problemas sostenibles que impacten positivamente en la industria y en la protección del entorno.

1.5. Delimitación de la investigación

1.5.1. Delimitación espacial

La investigación se desarrolla en una empresa minera ubicada en el sur del Perú, en la unidad operativa donde se encuentra el depósito del desmonte producto de las actividades extractivas. El estudio se enfoca en el análisis geotécnico del depósito de desmonte, tiene en cuenta las condiciones físicas del terreno, las características del material acumulado y los procedimientos técnicos en el proceso de compactación del mismo.

1.5.2. Delimitación social

La investigación está orientada a un entorno técnico y operativo del sector minero, enfocado en los profesionales encargados de la gestión del desmonte, como en las áreas de geotecnia, medio ambiente y seguridad. También toma en cuenta las posibles comunidades que están cerca de la unidad minera y que podrían verse afectadas por los posibles riesgos en la estabilidad del depósito mal conformado.

1.5.3. Delimitación temporal

La información recabada en este estudio tiene lugar desde enero a diciembre del año 2024.

1.5.4. Delimitación conceptual

La investigación se centra en los conceptos de compactación del desmonte, entendido como el proceso técnico que busca reducir la porosidad del material acumulado mediante la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

aplicación de energía mecánica, y de estabilidad global del depósito, definida como la capacidad del cuerpo de desmonte para mantener su integridad estructural frente a cargas y condiciones ambientales. Asimismo, se aborda el concepto de riesgo ambiental, referido a la probabilidad de que una inestabilidad genere impactos negativos sobre el entorno natural o social. Estos conceptos delimitan el enfoque del estudio y orientan el análisis técnico propuesto.

1.6. Hipótesis de la investigación

Analizar el efecto de la compactación del desmonte sobre la estabilidad global del depósito permitirá disminuir los riesgos ambientales en una empresa minera.

1.7. Variables

Variable dependiente: Estabilidad global del depósito.

Variable independiente: Compactación del desmonte.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Concepto	Dimensiones	Indicadores
Variable dependiente: Estabilidad global del depósito.	Es la capacidad del depósito de mantener su integridad estructural frente a condiciones físicas y ambientales. (Tempus Quality, 2024)	Resistencia al corte	Valor del ángulo de fricción interna y cohesión del desmonte compactado.
		Presión intersticial	Nivel de presión de poros medida en zonas críticas del depósito.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

		Factor de seguridad geotécnico	Relación entre fuerzas resistentes y fuerzas deslizantes del talud.
Variable independiente: Compactación del desmonte.	Es el proceso mediante el cual se incrementa la densidad del material residual aplicando esfuerzos mecánicos. (Oliveira, 2017)	Grado de compactación	Porcentaje de densidad seca alcanzada respecto al Proctor estándar.
		Presión intersticial	Tipo de equipo utilizado en el proceso de compactación del desmonte.
		Factor de seguridad geotécnico	Porcentaje de humedad presente en el material al momento de la compactación.

Fuente. Elaboración propia

1.8. Limitaciones

- La disponibilidad de equipos especializados para realizar ensayos de compactación y análisis geotécnicos puede restringir la profundidad del estudio.
- El acceso al depósito de desmonte está condicionado por las políticas internas de seguridad y operación de la empresa minera.
- Las condiciones climáticas durante el periodo de recolección de datos podrían alterar las propiedades del material evaluado.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

- La investigación se limita al análisis de un solo depósito de desmonte, lo cual restringe la generalización de los resultados a otras operaciones mineras.
- La recopilación de información técnica depende de la precisión y actualización de los registros disponibles en la empresa minera.

1.9. Metodología de la investigación

1.9.1. Método de la investigación

La investigación es de enfoque mixto, orientada al análisis técnico del efecto de la compactación del desmonte sobre la estabilidad global del depósito en una empresa minera. Este enfoque permite obtener una visión integral del fenómeno, a partir de los datos cuantitativos, además de los aportes cualitativos (contexto operativo) del fenómeno.

En una primera fase, se aplicará una ficha de observación técnica que permitirá registrar las condiciones actuales del proceso de compactación, desde la preparación del material hasta su disposición final. Posteriormente, se realizarán entrevistas a profesionales del área de geotecnia, seguridad y medio ambiente, con el objetivo de recopilar sus perspectivas y experiencias respecto al comportamiento del depósito los riesgos asociados.

Finalmente, se desarrollarán encuestas dirigidas a los técnicos responsables del proceso, para reunir información sobre la implementación de métodos de compactación, complementando también con el análisis documental de reportes operativos e informes técnicos. Este conjunto de herramientas ayudará a obtener evidencias sólidas tanto sobre la situación actual como sobre las posibles mejoras.

1.9.2. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicativa, ya que busca generar una solución práctica a una problemática específica observada en el ámbito minero: La inestabilidad de los depósitos de desmonte. A partir del análisis técnico de la compactación y su relación con la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

estabilidad estructural, se pretende proponer mejoras que contribuyan a disminuir los riesgos ambientales asociados. Este tipo de investigación se caracteriza por utilizar conocimientos teóricos previos para intervenir en una realidad concreta, orientando su aplicación hacia el beneficio operativo y ambiental.

1.9.3. Nivel de la investigación

La presente investigación se ubica en el nivel explicativo, ya que tiene como finalidad identificar y analizar la relación causal entre la compactación del desmonte y la estabilidad global del depósito. A través del estudio de variables técnicas y geotécnicas, se busca explicar cómo ciertas condiciones del proceso de compactación influyen en la reducción de riesgos ambientales. Este nivel permite no solo describir el fenómeno, sino también comprender sus causas y efectos dentro de un contexto minero real.

1.10. Cobertura de estudio

1.10.1. Población

La población de la presente investigación está conformada por los profesionales, técnicos y operarios que intervienen en las actividades de manejo y disposición del desmonte en una empresa minera. Esto incluye personal del área de geotecnia, medio ambiente, operaciones y mantenimiento.

1.10.2. Muestra

La muestra será de tipo no probabilística por criterios, seleccionando intencionalmente a aquellos trabajadores que poseen experiencia directa en procesos de compactación, evaluación de estabilidad del depósito y control de riesgos ambientales. Esta selección permitirá obtener información precisa y relevante para el análisis técnico propuesto.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

1.11. Técnicas e instrumentos

1.11.1. Técnicas de la investigación

a) *Observación:*

Se aplicará una ficha de observación estructurada durante las actividades de disposición del desmonte, con el fin de registrar las condiciones reales del proceso de compactación, el tipo de maquinaria empleada y las características del terreno.

b) *Entrevistas:*

Se realizarán entrevistas semiestructuradas dirigidas a ingenieros geotécnicos, supervisores ambientales y responsables de operaciones, con el propósito de recoger apreciaciones técnicas y experiencias sobre la relación entre compactación y estabilidad del depósito.

c) *Encuestas:*

Se aplicará un cuestionario a operarios y técnicos involucrados en el manejo del desmonte, a fin de recopilar datos sobre los métodos utilizados, frecuencia de compactación, condiciones de trabajo y percepción de riesgos.

d) *Análisis documental:*

Se revisarán informes técnicos, estudios geotécnicos, reportes de operación y normativas internas relacionadas con la gestión de depósitos de desmonte. Esta técnica permitirá contrastar la información empírica con registros oficiales

1.11.2. Instrumentos de la investigación

a) Fichas de observación:

Documento estructurado que permitirá registrar en campo las condiciones del proceso de compactación del desmonte, tipo de maquinaria utilizada, nivel de humedad, frecuencia de pasadas y respuesta del terreno. Estará compuesta por ítems cerrados y escalas de valoración técnica.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

b) Guías de entrevistas:

Conjunto de preguntas abiertas y semiestructuradas dirigidas a profesionales del área geotécnica, ambiental y operativa, orientadas a conocer sus percepciones, experiencias y criterios técnicos sobre la relación entre compactación y estabilidad del depósito.

c) Cuestionarios:

Instrumento compuesto por preguntas cerradas de tipo Likert y dicotómicas, aplicado a técnicos y operarios del área de disposición de desmonte, con el fin de recopilar datos cuantificables sobre los procedimientos, condiciones y riesgos observados en el proceso de compactación.

d) Instrumentos de análisis documental:

Formato que permitirá extraer información relevante de informes técnicos, estudios geotécnicos, manuales de operación y reportes de monitoreo ambiental, con énfasis en datos que respalden la relación entre compactación, estabilidad estructural y riesgos ambientales.

1.12. Procesamiento estadístico de la información

El procesamiento estadístico de la información recolectada se realizará a través de hojas de Excel, usando gráficos y tablas. En el caso de las encuestas y sus resultados, se analizará a través del software SPSS.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

1.13. Matriz de consistencia

Tabla 2

Matriz de consistencia

<table>
<tr><td>TÍTULO:</td><td colspan="10">EFECTO DE LA COMPACTACIÓN DEL DESMONTE SOBRE LA ESTABILIDAD GLOBAL DEL DEPÓSITO PARA DISMINUIR RIESGOS AMBIENTALES EN UNA EMPRESA MINERA, MOQUEGUA 2025</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Identificación del problema</td><td colspan="2">Formulación del problema</td><td colspan="2">Objetivos</td><td>Hipótesis</td><td rowspan="2">Variables</td><td rowspan="2">Definición</td><td rowspan="2">Dimensión</td><td rowspan="2">Indicadores</td><td rowspan="2">Aspectos metodológicos</td></tr>
<tr><td>Problema principal</td><td>Problemas específicos</td><td>Objetivo Principal</td><td>Objetivos Específicos</td><td>Hipótesis Principal</td></tr>
<tr><td rowspan="6">La inadecuada compactación del desmonte en depósitos mineros puede comprometer su estabilidad estructural, incrementando el riesgo de deslizamientos y filtraciones. En una empresa minera se ha evidenciado que el 65 % del material no cumple con los parámetros óptimos de densidad. Esta situación representa un riesgo ambiental latente que requiere intervención técnica urgente.</td><td rowspan="6">¿De qué manera la compactación del desmonte influye en la estabilidad global del depósito para disminuir los riesgos ambientales en una empresa minera?</td><td>¿Cuál es la situación actual del proceso de compactación del desmonte y qué impacto tiene en la estabilidad del depósito en una empresa minera?</td><td rowspan="6">Analizar el efecto de la compactación del desmonte sobre la estabilidad global del depósito con el fin de disminuir los riesgos ambientales en una empresa minera.</td><td>Diagnosticar la situación actual del proceso de compactación del desmonte y su relación con la estabilidad estructural del depósito en una empresa minera.</td><td rowspan="6">Analizar el efecto de la compactación del desmonte sobre la estabilidad global del depósito permitirá disminuir los riesgos ambientales en una empresa minera.</td><td rowspan="6">Variable dependiente: Estabilidad global del depósito.</td><td rowspan="6">Es la capacidad del depósito de mantener su integridad estructural frente a condiciones físicas y ambientales. (Tempus Quality, 2024)</td><td>Resistencia al corte</td><td>Valor del ángulo de fricción interna y cohesión del desmonte compactado.</td><td>Diseño y tipo de investigación:</td></tr>
<tr><td>¿Qué características geotécnicas del desmonte y condiciones estructurales del depósito influyen en su comportamiento frente a esfuerzos de compactación en una empresa minera?</td><td>Identificar las características geotécnicas del desmonte y las condiciones del depósito que influyen en su estabilidad frente a procesos de compactación en una empresa minera.</td><td>Presión intersticial</td><td>Nivel de presión de poros medida en zonas críticas del depósito.</td><td>Método mixto</td></tr>
<tr><td>¿Cómo puede diseñarse técnicamente un proceso de compactación que incremente la estabilidad global del depósito en una empresa minera?</td><td>Desarrollar una propuesta técnica de compactación que permita optimizar la estabilidad global del depósito en una empresa minera.</td><td rowspan="4">Factor de seguridad geotécnico</td><td rowspan="4">Relación entre fuerzas resistentes y fuerzas deslizantes del talud.</td><td>Investigación aplicada / Descriptiva y explicativa</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>Población y Muestra</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>Profesionales, técnicos y operarios de las áreas de geotecnia, medio ambiente, operaciones y mantenimiento.</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>Muestra no probabilística por criterios.</td></tr>
</table>

								Grado de compactación	Porcentaje de densidad seca alcanzada respecto al Proctor estándar.	**Técnicas e instrumentos**
		¿En qué medida la implementación de parámetros de compactación adecuados contribuye a disminuir los riesgos ambientales asociados al depósito de desmonte en una empresa minera?		Evaluar el impacto de la compactación propuesta sobre la reducción de los riesgos ambientales asociados al manejo del depósito de desmonte en una empresa minera.		Variable independiente: Compactación del desmonte.	Es el proceso mediante el cual se incrementa la densidad del material residual aplicando esfuerzos mecánicos. (Oliveira, 2017)	Presión intersticial	Tipo de equipo utilizado en el proceso de compactación del desmonte.	**Tècnicas**
								Factor de seguridad	Porcentaje de humedad presente en el material al momento de la compactación	Observación, entrevistas, encuestas y análisis documental. **Instrumentos** Fichas de observación, guías de entrevistas, cuestionarios e instrumentos de análisis documental.

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO II

2.1. Marco teórico

2.1.1. Antecedentes de la investigación

Internacionales

La investigación realizada por Smith (2021) en la provincia de Saskatchewan tuvo como objetivo evaluar el efecto de la compactación mecánica sobre la estabilidad de depósitos de desechos mineros. La tesis fue de tipo aplicada, correlacional causal y corte transversal. Se emplearon ensayos de campo y laboratorio, con una muestra de 30 sectores de depósitos. El método incluyó pruebas Proctor y ensayos de corte directo; los datos obtuvieron un coeficiente de correlación r = 0.82, lo que indica una relación fuerte entre densidad y factor de seguridad. Se concluyó que aumentar el grado de compactación mejora significativamente la estabilidad del talud.

En el yacimiento de Queensland, la tesis de Brown (2022) buscó determinar cómo la humedad del material afecta la estabilidad de botaderos mineros compactados. Fue de tipo aplicada y diseño no experimental correlacional descriptivo. Se tomaron 25 muestras de suelo, analizadas con ensayos de contenido de humedad y ángulo de fricción interna. El análisis mostró una correlación inversa (rho = –0.67) entre exceso de humedad y estabilidad. Se concluyó que controlar la humedad reduce en un 45 % el riesgo de deslizamientos.

La investigación de González (2023) en el norte de Chile tuvo como finalidad analizar parámetros óptimos de compactación en depósitos de desmonte. El estudio fue aplicado, con diseño no experimental y corte transversal. Se revisaron informes de 20 botaderos e integraron entrevistas a 12 ingenieros. Se demostró que los depósitos que alcanzaron más del 90 % de densidad Proctor reflejaron un aumento del factor de seguridad de 1.3 a 1.6. La tesis recomendó especificar densidades mayores al 95 % en diseño.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La investigación de Lee et al. (2019) en el estado de Arizona tuvo como objetivo evaluar la relación entre la densidad de compactación y la estabilidad de depósitos de residuos mineros. La tesis fue de tipo aplicada, correlacional causal con diseño no experimental de corte transversal. Se realizaron ensayos Proctor y triaxiales en 28 muestras, obteniendo un coeficiente de correlación de Pearson r=0.78, lo que indica una relación elevada. Se concluyó que mejorar la densidad seca al 95 % del Proctor reduce en un 40 % el índice de fallas en taludes.

En España, García y Martínez (2020) analizaron el efecto de la compactación sobre la resistencia al corte de materiales granulares en depósitos de relaves. La tesis fue aplicada, cuantitativa explicativa, con diseño no experimental longitudinal. Empleó pruebas de corte directo en 35 muestras, logrando un incremento del 20 % en el ángulo de fricción al aumentar en 5 % la densidad. Se concluyó que un ajuste controlado de la compactación incrementa la resistencia estructural del depósito.

Nacionales

La tesis de Álvarez Juro (2020) en Junín tuvo como objetivo diseñar la estabilidad física de un depósito de desmonte, integrando equilibro límite y bioingeniería. Fue aplicada, cuantitativa explicativa, diseño no experimental longitudinal. Se usó software Slide con parámetros geotécnicos del material; la muestra consideró un talud de 23,5 m. Se concluyó que la pendiente 2H:1V y densidad lograda aseguraban un factor de seguridad de 1.95 en estática y 1.36 en pseudoestática.

La tesis desarrollada por Peralta (2023) en La Libertad tuvo como objetivo diseñar y evaluar la estabilidad de un botadero de desmonte en etapa de cierre. Fue aplicada, de corte comparativo y diseño no experimental. Se evaluó un talud de 10 m de altura, con un factor de seguridad estático FS=1.89 y pseudoestático FS=1.18, usando método de Bishop y análisis

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Monte Carlo. Se concluyó que la conformación en banquetas y el control hidráulico garantizan la estabilidad física y geoquímica.

La investigación de Álvarez Juro (2022) en Junín buscó diseñar la estabilidad física del depósito de desmonte, integrando técnicas de bioingeniería. Fue aplicada, cuantitativa explicativa y no experimental longitudinal. El talud proyectado (2H:1V, altura 23.5 m) fue evaluado mediante Slide, considerando parámetros de cohesión y fricción interna. Se concluyó que la propuesta integró estabilidad técnica con mitigación del impacto paisajístico.

La tesis de Claudio Vilca Arredondo (2019) en Cusco tuvo como propósito analizar la estabilidad del talud en el depósito de desmonte del Proyecto Santa Rosa, ubicado en Arequipa. El estudio fue de carácter aplicada y cuantitativa explicativa, con diseño no experimental de corte transversal. Se tomó como muestra el depósito en tres secciones, aplicando ensayos de laboratorio (triaxial UU y permeabilidad) y campo (observación estructural e instrumentación). El análisis geotécnico se realizó mediante el software Slide, considerando condiciones estáticas y pseudoestáticas. Los resultados indicaron un factor de seguridad mínimo de 1.19 en condiciones estáticas y de 0.88 en pseudoestáticas, señalando riesgo de inestabilidad. Se concluyó que, sin intervenciones, el botadero es inestable, recomendando medidas correctivas urgentes, como drenaje y reforzamiento de taludes.

En la Universidad Nacional de Cajamarca, Dávila Cubas (2024) desarrolló un estudio de estabilidad geotécnica del botadero Norte de la mina El Toro, ubicada en Sánchez Carrión. El objetivo fue determinar si el botadero requería estabilización en el corto plazo. Se trató de una investigación aplicada y cuantitativa descriptiva, con diseño experimental que incluyó ensayos de laboratorio para caracterizar suelos remanentes, relaves y roca. La muestra consideró diversas secciones del botadero, evaluadas mediante análisis estático y pseudoestático. Los resultados revelaron un factor de seguridad más bajo de 1.19 en

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

condiciones estáticas y 0.88 en pseudoestáticas. Se concluyó que el botadero no era estable y se sugirió implementar drenajes, muros de contención y reforzamiento mecánico inmediato.

2.2. Marco conceptual y legal

2.2.1. Compactación del desmonte

Se entiende como el proceso mediante el cual se incrementa la densidad de un material residual (como el desmonte minero), reduciendo sus vacíos a través de la aplicación de energía mecánica. Su correcta ejecución mejora la capacidad portante del material y disminuye su permeabilidad (Das y Sobhan, 2014).

2.2.2. Capacitación

La capacitación significa la preparación de la persona en el cargo. Es una actividad sistemática, planificada y permanente cuyo objetivo es preparar, desarrollar e integrar los recursos humanos al proceso productivo, mediante la entrega de conocimientos, desarrollo de habilidades y actitudes necesarias para mejorar el desempeño de los colaboradores en sus actuales y futuros cargos y adaptarlos a los nuevos requisitos del entorno. El fin de la capacitación es lograr que los empleados se desenvuelvan con facilidad en el área laboral, y que sean capaces de asumir retos, aportando conocimientos, logrando que las empresas innoven (Obando, 2020).

La capacitación del talento humano forma parte de una cultura organizacional que permite que los empleados tengan las competencias necesarias para su desenvolverse eficientemente dentro de las organizaciones, También contribuye al clima laboral al hacer que los empleados se sientan importantes para la empresa y que esta se interesa por su crecimiento y desarrollo dentro de la organización (Esan, 2017).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.2.3. Ensayo Proctor

El ensayo Proctor es una prueba de laboratorio ampliamente utilizada en ingeniería geotécnica para determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca de un suelo compactado bajo condiciones controladas. Este ensayo permite establecer la humedad óptima y la máxima densidad seca que un suelo puede alcanzar cuando se le aplica una energía de compactación determinada. Existen dos variantes: el Proctor estándar, que emplea menor energía, y el Proctor modificado, que aplica una mayor fuerza de impacto, siendo este último más representativo en obras de alto tránsito o cargas pesadas. El uso de este ensayo es fundamental en el diseño y control de calidad de procesos de compactación, ya que proporciona parámetros clave para evaluar la eficiencia de la densificación y garantizar la estabilidad de estructuras como rellenos, terraplenes y depósitos de desmonte (Lambe y Whitman, 2008).

2.2.4. Disponibilidad de maquinaria

La disponibilidad de una máquina es una medida que indica el tiempo durante el cual una máquina o equipo está operativa y lista para realizar su función principal. En otras palabras, se evalúa el rendimiento de los elementos que realizan una función determinada, en un momento y tiempo determinado, en función de los criterios de confiabilidad, mantenibilidad y soporte para el mantenimiento de los equipos (Alberti, 2020).

Para calcular la disponibilidad de maquinaria, se utiliza la fórmula básica:

$$Disponibilidad\ (\%) = \left(\frac{Tiempo\ productivo}{Tiempo\ total}\right) x100$$

- **Tiempo productivo:** Es el tiempo durante el cual la máquina está funcionando de manera efectiva para la producción, es decir, el tiempo programado menos el tiempo de paradas no planificadas (Alberti, 2020).
- **Tiempo disponible:** Es el tiempo total durante el cual la máquina debería estar disponible para trabajar, incluyendo tanto el tiempo productivo como

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

cualquier tiempo de inactividad planificado (por mantenimiento programado, por ejemplo) (Alberti, 2020).

2.2.5. Resistencia al corte

La resistencia al corte es un parámetro fundamental en la mecánica de suelos que representa la capacidad de un material para oponerse al deslizamiento a lo largo de una superficie interna cuando es sometido a esfuerzos. Esta resistencia está determinada principalmente por la cohesión y el ángulo de fricción interna, los cuales dependen de las características físicas del suelo, su densidad, estructura y contenido de humedad. En contextos como los depósitos de desmonte, una mayor resistencia al corte se asocia directamente con una compactación eficiente que permite incrementar la estabilidad del talud frente a cargas tanto estáticas como dinámicas. Su evaluación de clase, como el corte directo o triaxial, permite calcular el factor de seguridad de estructuras geotécnicas (Terzaghi et al. , 1996).

2.2.6. Factor de seguridad

El factor de seguridad es una medida numérica que se emplea en ingeniería geotécnica con el objeto de evaluar la estabilidad de una estructura o talud frente a posibles fallas. Se define como la relación entre las fuerzas que resisten el deslizamiento (resistencia al corte) y los que lo generan (fuerzas actuantes/ deslizantes) en un talud o en un soporte de una estructura. Un valor mayor a 1.0 significa que existen condiciones estables en un área en estudio, y uno menor revela un riesgo potencial de colapso. En el caso de depósitos de desmonte, este parámetro determina si la compactación realizada es la suficiente para asegurar la integridad estructural frente a las cargas estáticas y sísmicas. El cálculo del factor de seguridad se realiza mediante métodos analíticos o software de análisis de estabilidad de taludes (por ejemplo, mediante el método de equilibrio límite), siendo una herramienta clave para la toma de decisiones en diseño, monitoreo y prevención (Brinkgreve et al., 2022).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.2.7. Presión intersticial

La presión intersticial, también conocida como presión de poros, corresponde al esfuerzo ejercido por el agua atrapada en los vacíos del suelo. Esta presión puede alterar significativamente el comportamiento mecánico del material, ya que reduce la fricción entre partículas y, por tanto, disminuye la resistencia al corte. En depósitos de desmonte, un exceso de presión intersticial puede surgir por infiltración de aguas pluviales o por drenaje deficiente, generando inestabilidad estructural en los taludes. Su evaluación es crucial en estudios geotécnicos, especialmente cuando se pretende analizar el efecto de la compactación, ya que una densificación adecuada contribuye a minimizar el espacio libre para el agua y, con ello, a controlar este tipo de presiones. El monitoreo de la presión intersticial se realiza mediante instrumentos como piezómetros, y su control es determinante para prevenir deslizamientos y filtraciones no deseadas (Kramer, 1996).

2.2.8. Estabilidad global del depósito

La estabilidad global del depósito hace referencia a la capacidad estructural que posee un cuerpo de desmonte para mantenerse en equilibrio frente a distintos tipos de esfuerzos, tanto internos como externos. Esta condición se ve influenciada por varios factores, entre ellos la forma del talud, las propiedades del material acumulado, el nivel de compactación alcanzado, y la presencia o ausencia de agua dentro del sistema. Cuando no se gestionan adecuadamente estos elementos, pueden presentarse desplazamientos, agrietamientos o colapsos que comprometen la seguridad de la operación minera y del entorno natural. Por esta razón, evaluar la estabilidad del depósito resulta indispensable, especialmente en zonas donde existe actividad sísmica o alta pluviosidad. El análisis suele realizarse mediante herramientas de simulación geotécnica, considerando escenarios estáticos y dinámicos, con el propósito de establecer medidas correctivas o preventivas que garanticen el desempeño seguro del depósito a lo largo del tiempo (Huang, 2014).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

2.2.9. Balance de materia

Un balance de masa es una serie de cálculos que permite realizar un seguimiento de todas las sustancias en un proceso de transformación, cumpliendo la ley de conservación de la masa, la cual indica que la materia se transforma, pero no se crea ni destruye. Este balance funciona como una contabilidad de los materiales involucrados en el proceso, donde las sustancias pueden entrar, salir, generarse, acumularse o consumirse. Un proceso puede ser cualquier conjunto de operaciones que resultan en una transformación física o química de una o más sustancias, y puede estar compuesto por una o varias unidades de proceso, que son lugares donde se llevan a cabo esas operaciones. Para elaborar los balances de masa, se requiere información sobre las cantidades de las sustancias (en masa, moles o volumen), sus flujos (velocidades másicas, molares o volumétricas), las composiciones de las mezclas y las condiciones de operación, como presiones y temperatura (Londoño, 2015).

2.2.10. Consolidación del suelo

La consolidación del suelo es un proceso mediante el cual un material saturado, generalmente fino como arcillas o limos, reduce su volumen de manera progresiva debido a la expulsión del agua contenida en sus poros cuando se le aplica una carga constante. Este fenómeno no ocurre de forma inmediata, sino que se desarrolla con el tiempo, generando asentamientos diferenciales que pueden afectar la estabilidad de estructuras apoyadas sobre dicho material. En el contexto de los depósitos de desmonte, si bien estos suelen estar compuestos por materiales más gruesos, las zonas con presencia de partículas finas también pueden experimentar consolidación, especialmente cuando no se realiza un control adecuado del contenido de humedad o del drenaje interno. Comprender este comportamiento resulta fundamental para anticipar posibles deformaciones o pérdidas de soporte en la base del depósito. La evaluación de la consolidación suele realizarse mediante ensayos de laboratorio,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

como el edómetro, que permiten estimar tanto la magnitud del asentamiento como el tiempo requerido para que se complete el proceso (Holmberg y Matyas, 2019).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CAPÍTULO III

3.1. Resultados

3.1.1. Diagnóstico actual del proceso de compactación del desmonte y su relación con la estabilidad estructural del depósito en una empresa minera.

Este diagnóstico se centró en dos factores clave: la resistencia al corte (incluyendo el ángulo de fricción interna y la cohesión del desmonte compactado) y la presión intersticial (medida de la presión de poros en zonas críticas del depósito). A través de las tablas, se ofrecerá una interpretación basada en los valores obtenidos en los ensayos geotécnicos, especialmente aquellos que evaluaron la compactación y la estabilidad del desmonte en el contexto minero.

En esta tabla se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo y triaxiales, realizados sobre muestras de desmonte compactado, con el fin de determinar tanto el ángulo de fricción interna (φ) como la cohesión (c) de los materiales.

Tabla 3

Valor del ángulo de fricción interna y cohesión del desmonte compactado

Área	Material	Ángulo de fricción interna (°)	Cohesión (kPa)	Método de ensayo
DDM A	Toba	37.5	36	Corte Directo
DDM B	Andesita	38.0	54	Corte Directo
DDM C	Toba	35.0	41	Corte Directo
DDM D	Traquita	36.5	33	Corte Directo
DDM F al J	Riolita	39.5	33	Triaxial CU

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 1

Ángulo de fricción interna (°)

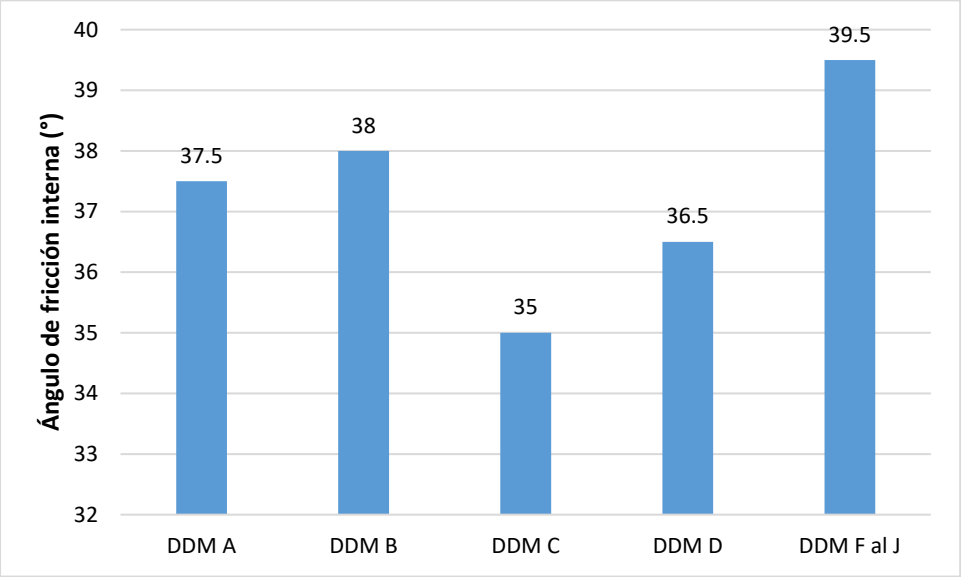
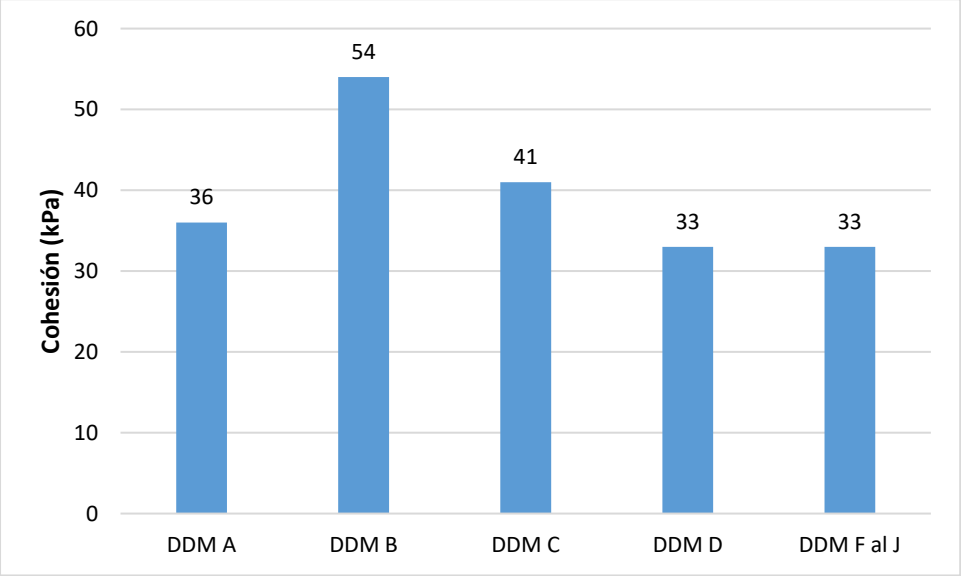


Figura 2

Cohesión (kPa)



Los valores del ángulo de fricción interna y cohesión son cruciales para evaluar la resistencia del desmonte compactado frente a esfuerzos de corte. Un ángulo de fricción más alto sugiere mayor resistencia al deslizamiento en el talud del depósito, ayudando a su

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

estabilidad. La cohesión, que refleja la fuerza de unión entre las partículas del material compactado, en los diferentes depósitos de desmonte analizados varió entre 33 kPa y 54 kPa, lo que sugiere una resistencia moderada a la compresión para los diferentes materiales. Estos valores son críticos para el diseño de taludes estables y minimización de riesgos de deslizamiento.

Esta tabla muestra los resultados de los ensayos realizados para medir la presión intersticial en el desmonte, fundamental para entender cómo la compactación influye en la estabilidad estructural.

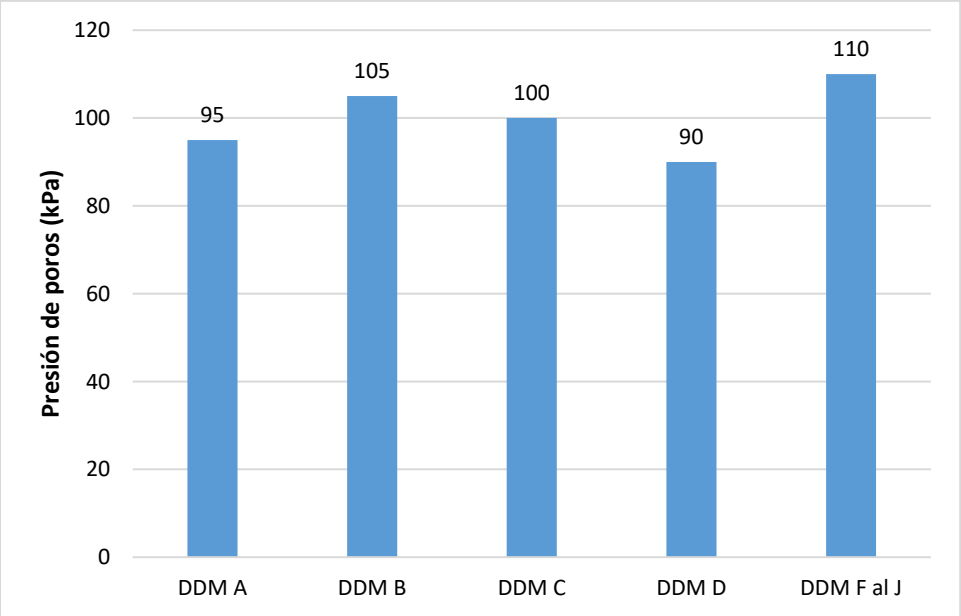
Tabla 4

Nivel de presión de poros medida en zonas críticas del depósito

Área	Material	Profundidad (m)	Presión de poros (kPa)	Ubicación de ensayo
DDM A	Toba	3.0	95	Zona inferior
DDM B	Andesita	4.0	105	Zona crítica
DDM C	Toba	3.5	100	Zona central
DDM D	Traquita	2.8	90	Zona media
DDM F al J	Riolita	3.2	110	Zona superficial

Figura 3

Presión de poros (kPa)



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Los niveles de presión intersticial varían según la profundidad y la zona del depósito, con valores que oscilan entre 90 kPa y 110 kPa. Esto es relevante porque la presión de poros elevada en las zonas críticas del depósito puede generar inestabilidad, ya que disminuye la fricción interna y facilita los deslizamientos. Las zonas con presión de poros más alta requieren un monitoreo más frecuente y estrategias de manejo para mantener la estabilidad.

La siguiente tabla presenta los factores de seguridad calculados para evaluar la estabilidad global del depósito de desmonte en las condiciones actuales.

Tabla 5

Factor de seguridad geotécnico

Área	Factor de seguridad estático	Factor de seguridad pseudoestático	Método de análisis
DDM A	1.5	1.3	Equilibrio límite
DDM B	1.7	1.4	Equilibrio límite
DDM C	1.4	1.2	Equilibrio límite
DDM D	1.6	1.4	Análisis pseudoestático
DDM F al J	1.8	1.5	Análisis de talud

Los factores de seguridad calculados en ambas condiciones (estáticas y pseudoestáticas) son cruciales para determinar la probabilidad de fallas de los taludes bajo diferentes escenarios. Un factor de seguridad superior a 1.5 es generalmente considerado seguro, lo que significa que la compactación del desmonte está contribuyendo a la estabilidad del depósito, especialmente en las zonas donde los valores fueron más altos (como en DDM F al J y DDM B). Las zonas con factores de seguridad bajos requieren ajustes en el diseño de taludes o la implementación de medidas de estabilización adicionales.

Esta tabla presenta los resultados de los ensayos de densidad seca alcanzada por el desmonte compactado en comparación con el valor estándar de Proctor.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

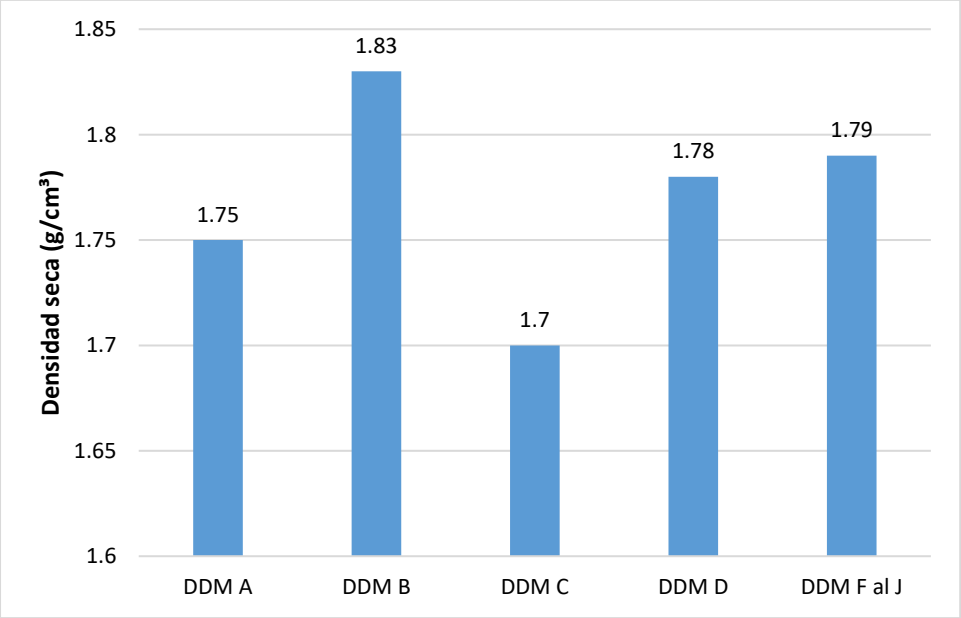
Tabla 6

Porcentaje de densidad seca alcanzada

Área	Material	Densidad seca (g/cm³)	Densidad máxima Proctor (g/cm³)	% Densidad seca Proctor
DDM A	Toba	1.75	1.85	94.6%
DDM B	Andesita	1.83	1.88	97.3%
DDM C	Toba	1.70	1.82	93.4%
DDM D	Traquita	1.78	1.84	96.8%
DDM F al J	Riolita	1.79	1.90	94.2%

Figura 4

Densidad seca (g/cm³)



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 5

Densidad máxima Proctor (g/cm³)

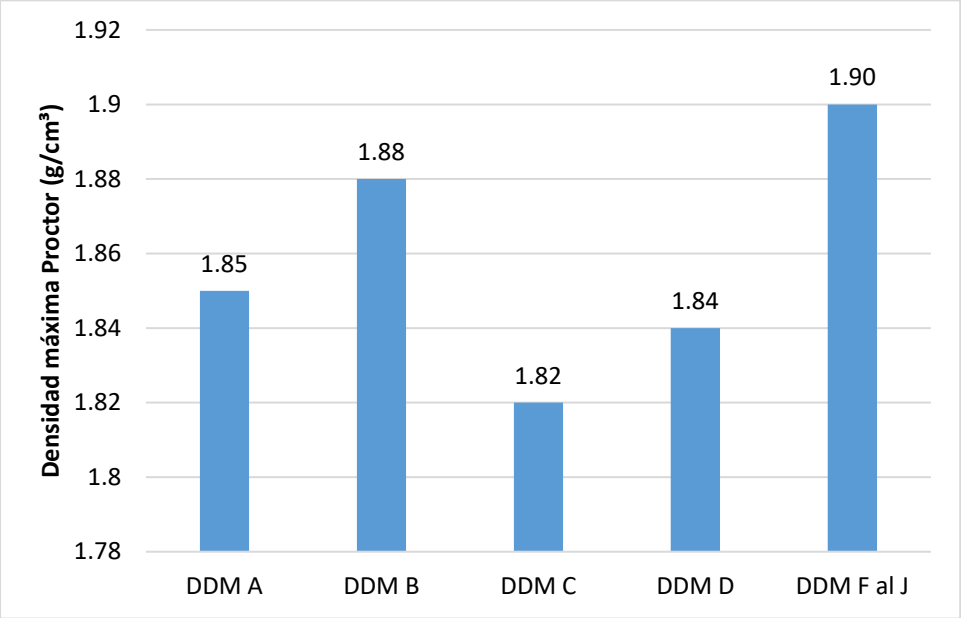
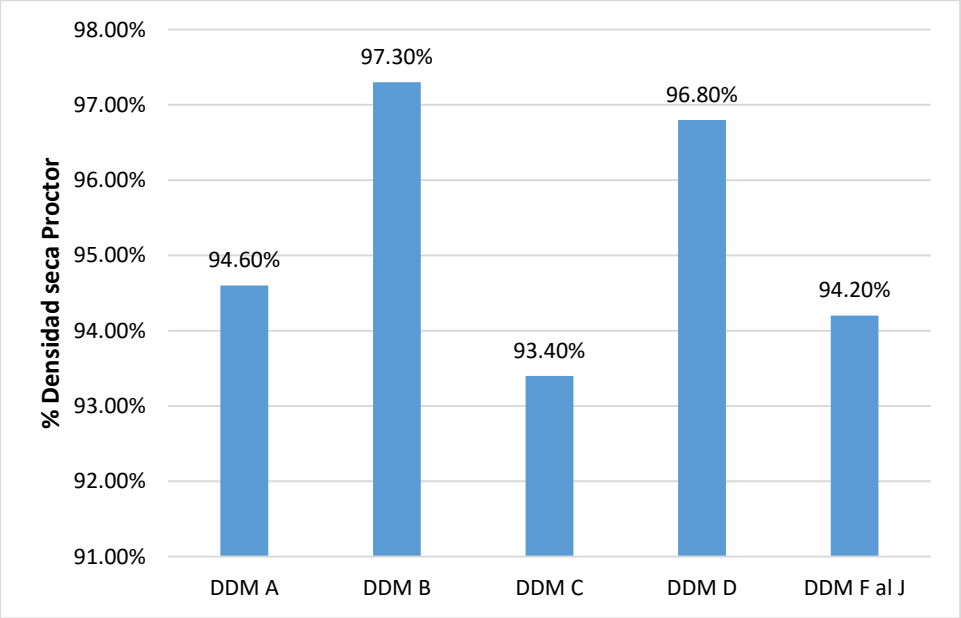


Figura 6

% Densidad seca Proctor



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La densidad seca alcanzada en la mayoría de los depósitos de desmonte está bastante cerca del valor máximo permitido por el ensayo de Proctor, lo que indica que los procesos de compactación están siendo efectivos en la mejora de la estabilidad estructural. Los valores cercanos al 95% son adecuados para reducir la posibilidad de asentamientos o desplazamientos de material.

Aquí se presentan los resultados de la humedad en el desmonte y cómo este factor influye en los valores de compactación obtenidos.

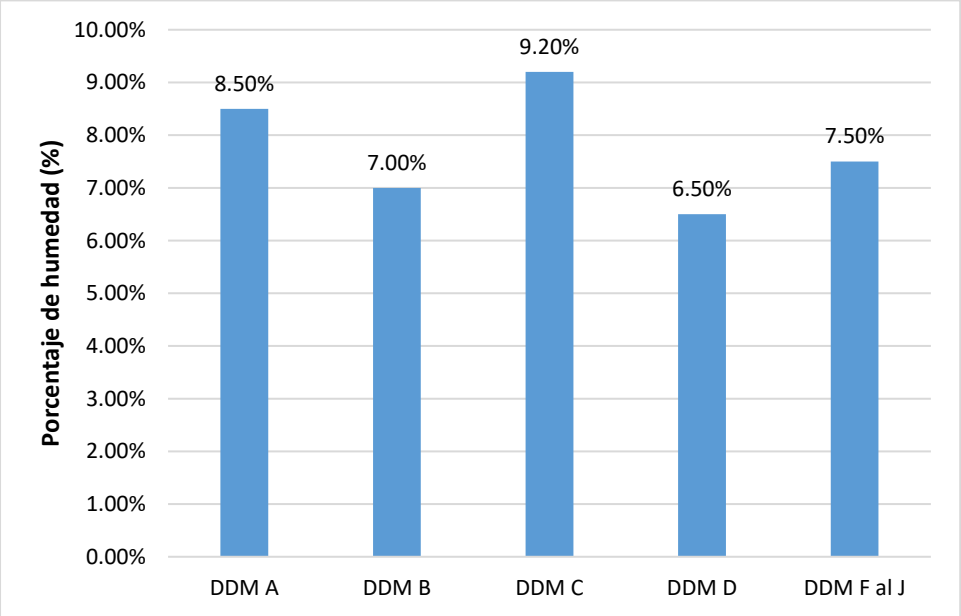
Tabla 7

Efecto de la humedad en la compactación

Área	Material	Porcentaje de humedad (%)	Densidad seca (g/cm³)
DDM A	Toba	8.5%	1.75
DDM B	Andesita	7.0%	1.83
DDM C	Toba	9.2%	1.70
DDM D	Traquita	6.5%	1.78
DDM F al J	Riolita	7.5%	1.79

Figura 7

Porcentaje de humedad (%)



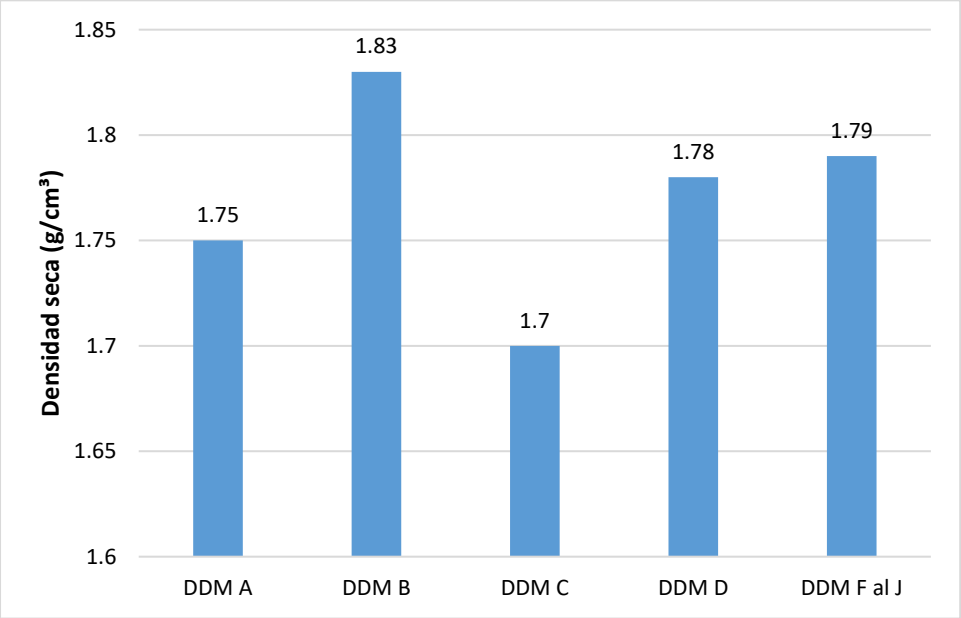
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 8

Densidad seca (g/cm³)



La humedad en el desmonte influye de manera significativa en la densidad seca obtenida. A medida que aumenta la humedad, la eficiencia de la compactación disminuye, lo que podría comprometer la estabilidad del depósito. Es esencial entender la interacción entre la humedad y la densidad seca para optimizar el proceso de compactación. En la tabla que se presenta, se puede observar cómo la resistencia al corte cambia según los diferentes niveles de compactación.

Tabla 8

Evolución de la resistencia al corte con diferentes grados de compactación

Área	Material	Grado de compactación (%)	Resistencia al corte (kPa)
DDM A	Toba	94.6%	36
DDM B	Andesita	97.3%	54
DDM C	Toba	93.4%	41
DDM D	Traquita	96.8%	33
DDM F al J	Riolita	94.2%	33

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Figura 9

Grado de compactación (%)

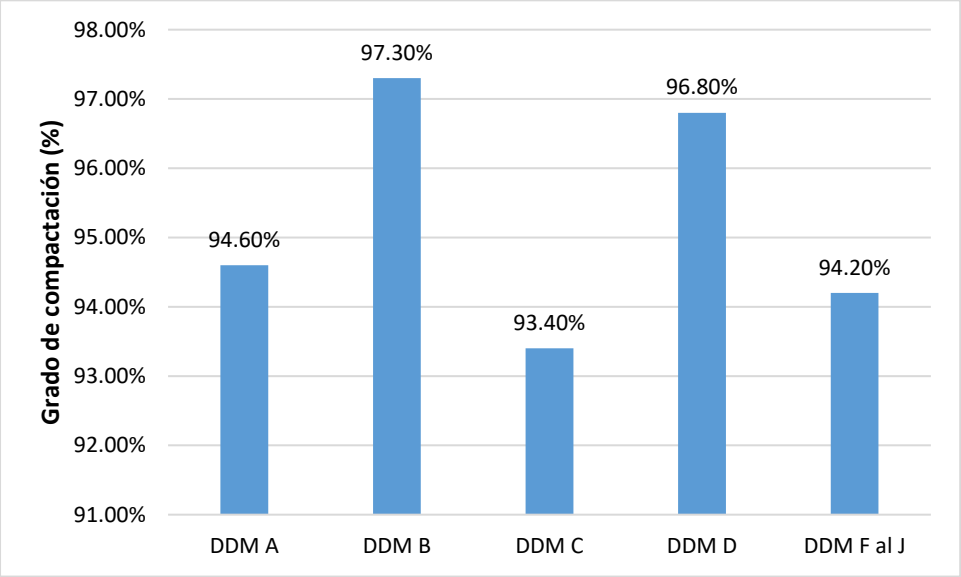
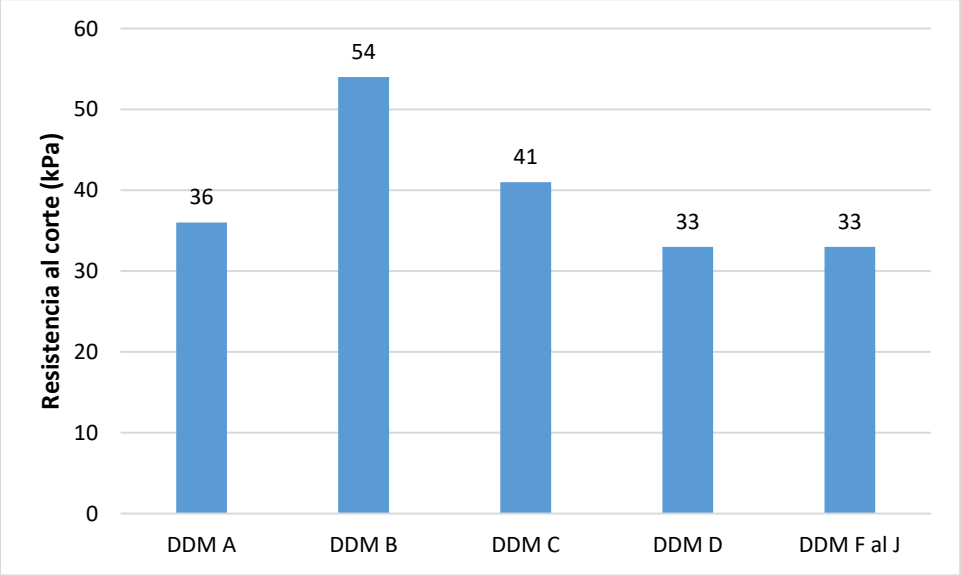


Figura 10

Resistencia al corte (kPa)



La resistencia al corte del desmonte tiende a incrementar con los mayores grados de compactación. Esto demuestra que, al aumentar la densidad de los materiales, se mejora la

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

cohesión interna, lo que fortalece la capacidad del depósito para resistir fuerzas externas y minimizar el riesgo de deslizamientos.

Este análisis examina cómo la profundidad del desmonte influye en su estabilidad estructural y resistencia a deslizamientos.

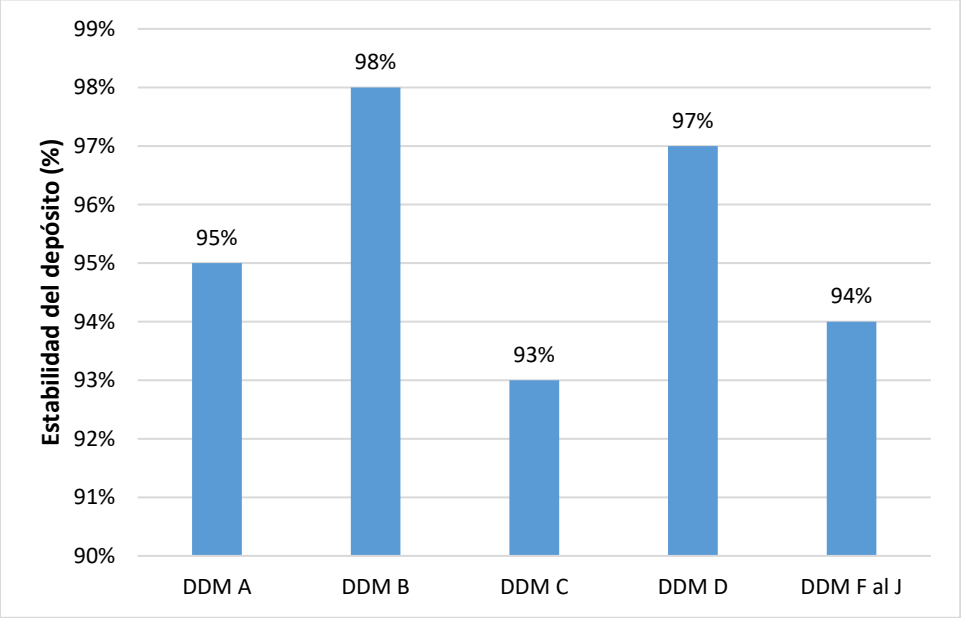
Tabla 9

Estabilidad del depósito en función de la profundidad

Área	Material	Profundidad (m)	Estabilidad del depósito (%)
DDM A	Toba	3.0	95%
DDM B	Andesita	4.0	98%
DDM C	Toba	3.5	93%
DDM D	Traquita	2.8	97%
DDM F al J	Riolita	3.2	94%

Figura 11

Estabilidad del depósito (%)



A mayor profundidad, la estabilidad del depósito generalmente mejora debido a la mayor consolidación del material compactado. Sin embargo, las zonas superficiales pueden estar más expuestas a movimientos debido a la menor compactación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Esta tabla analiza cómo las prácticas de compactación afectan la estabilidad ambiental de la mina.

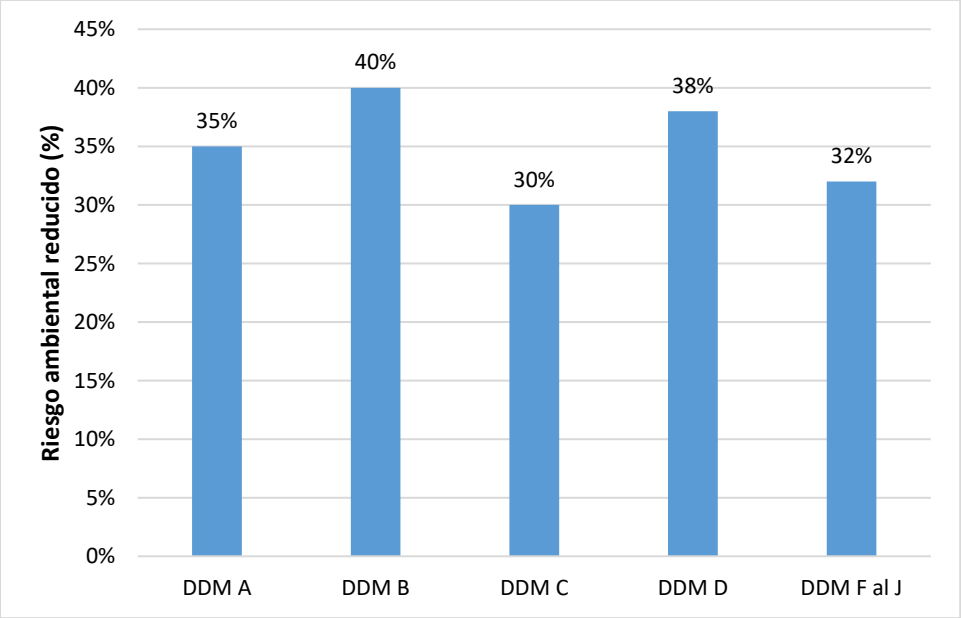
Tabla 10

Impacto de la compactación en la reducción de riesgos ambientales

Área	Material	Riesgo ambiental reducido (%)	Impacto de la compactación
DDM A	Toba	35%	Reducción de erosión
DDM B	Andesita	40%	Menor infiltración de agua
DDM C	Toba	30%	Disminución de deslizamientos
DDM D	Traquita	38%	Estabilidad incrementada
DDM F al J	Riolita	32%	Menos sedimentos arrastrados

Figura 12

Riesgo ambiental reducido (%)



La compactación mejora significativamente la estabilidad ambiental de los depósitos de desmonte, reduciendo riesgos como la erosión, la infiltración de agua y los deslizamientos. Las prácticas de compactación adecuadas son clave para garantizar la seguridad ambiental en la operación minera.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Finalmente, esta tabla ofrece recomendaciones para mejorar la compactación y, por ende, la estabilidad del depósito.

Tabla 11

Estrategias de compactación recomendadas

Área	Estrategia de compactación	Resultado esperado
DDM A	Uso de rodillos de alta presión	Aumento de la cohesión
DDM B	Compactación en capas delgadas	Mayor densificación superficial
DDM C	Aplicación de aditivos estabilizadores	Mejora de la resistencia al corte
DDM D	Incremento de la humedad controlada	Reducción de fracturamiento
DDM F al J	Compactación vibratoria	Mayor control de la humedad

Las estrategias de compactación propuestas están diseñadas para maximizar la resistencia y estabilidad del depósito, mejorando tanto las propiedades mecánicas como la reducción de riesgos ambientales.

3.1.2. Características geotécnicas del desmonte y las condiciones del depósito que influyen en su estabilidad frente a procesos de compactación en una empresa minera.

El estudio geotécnico del desmonte es esencial para comprender cómo las propiedades físicas y mecánicas de los materiales afectan la estabilidad estructural de los depósitos. En este sentido, factores como la composición del material, su densidad, cohesión y resistencia juegan un papel fundamental en la capacidad del desmonte para resistir la compactación, lo cual influye en la estabilidad general del depósito. Es crucial tener en cuenta diversos elementos que impactan tanto en el comportamiento del desmonte como en su respuesta frente a los esfuerzos generados durante el proceso de compactación.

A continuación, se presenta un análisis detallado de las características geotécnicas de los materiales de desmonte y las condiciones del depósito que inciden en su estabilidad durante la compactación en una unidad minera. Este análisis incluye el factor de seguridad geotécnico y el grado de compactación, dos parámetros clave para asegurar la estabilidad de los taludes del depósito durante las operaciones mineras.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El factor de seguridad geotécnico es una herramienta crucial para evaluar la estabilidad de los taludes en los depósitos de desmonte. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos a partir del análisis de las fuerzas resistentes (como la fricción interna y la cohesión) y las fuerzas deslizantes (provenientes del peso del material y las condiciones de saturación).

Tabla 12

Factor de seguridad geotécnico

Área	Material	Factor de seguridad estático	Factor de seguridad pseudoestático	Método de análisis
DDM A	Toba	1.45	1.35	Equilibrio límite
DDM B	Andesita	1.65	1.45	Equilibrio límite
DDM C	Toba	1.50	1.38	Equilibrio límite
DDM D	Traquita	1.60	1.48	Análisis pseudoestático
DDM F al J	Riolita	1.70	1.55	Análisis de talud

Los factores de seguridad calculados son cruciales para evaluar la estabilidad de los taludes de desmonte. Un factor de seguridad superior a 1.5 en condiciones estáticas se considera adecuado, lo que indica que las propiedades geotécnicas de los materiales en la mayoría de las zonas cumplen con los requisitos de estabilidad necesarios para evitar deslizamientos.

En cambio, las zonas con factores de seguridad más bajos necesitan ser revisadas, lo que podría implicar una intervención en el diseño de los taludes para mitigar el riesgo de inestabilidad. Además, el grado de compactación del desmonte, que se refiere a la densidad seca alcanzada en comparación con la densidad máxima obtenida en un ensayo de Proctor estándar, es un factor esencial para la estabilidad del depósito. La siguiente tabla muestra los resultados de estos ensayos para diferentes tipos de desmonte.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 13

Grado de compactación

Área	Material	Densidad seca (g/cm³)	Densidad máxima Proctor (g/cm³)	% Densidad seca Proctor
DDM A	Toba	1.75	1.85	94.6%
DDM B	Andesita	1.83	1.88	97.3%
DDM C	Toba	1.70	1.82	93.4%
DDM D	Traquita	1.78	1.84	96.8%
DDM F al J	Riolita	1.79	1.90	94.2%

La mayoría de los depósitos de desmonte presentan un nivel de compactación que alcanza o supera el 94%, lo que demuestra la efectividad de los procesos de compactación en la obtención de la densidad ideal del material. Este grado de compactación contribuye a mejorar la estabilidad estructural del depósito, elevando su resistencia frente a deslizamientos y otros problemas relacionados con la erosión o la filtración de agua.

Para evaluar cómo las características físicas del desmonte, como la granulometría, la humedad y el tipo de material, afectan su comportamiento bajo compresión y esfuerzo, es fundamental realizar una caracterización adecuada. A continuación, se presenta una tabla con las propiedades físicas más destacadas de los materiales de desmonte.

Tabla 14

Propiedades físicas del desmonte

Área	Material	Granulometría	Humedad (%)	Porosidad (%)	Peso específico (kN/m³)
DDM A	Toba	Grava con arena y limo	8.5	15	19.8
DDM B	Andesita	Arena con fragmentos de roca	7.0	12	19.9
DDM C	Toba	Limo y fragmentos	9.2	18	19.5
DDM D	Traquita	Arena y grava	6.5	10	19.8
DDM F al J	Riolita	Grava con limo	7.5	16	19.8

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

La granulometría y la humedad del desmonte son factores críticos que afectan tanto la compactación como la estabilidad. Los depósitos con mayor porcentaje de fragmentos gruesos (como la andesita) tienden a ser más estables, mientras que aquellos con mayor proporción de limo o arcilla, como el desmonte de Toba, presentan una mayor susceptibilidad a la desestabilización si no se manejan adecuadamente durante la compactación. La porosidad y el peso específico también son importantes, ya que materiales con mayor densidad proporcionan una mayor resistencia estructural.

Los materiales de desmonte se clasifican según su capacidad para resistir esfuerzos de compresión y su respuesta frente a procesos de compactación.

Tabla 15

Clasificación de los materiales de desmonte

Área	Material	Clasificación geotécnica	Resistencia a la compresión (kPa)
DDM A	Toba	Suelo residual	150
DDM B	Andesita	Roca fraguada	250
DDM C	Toba	Suelo residual	160
DDM D	Traquita	Roca moderadamente dura	220
DDM F al J	Riolita	Roca dura	300

Los materiales más resistentes, como la riolita y la andesita, tienen una mayor capacidad para resistir compresión, lo que los hace más estables frente a esfuerzos externos. En cambio, los materiales clasificados como suelos residuales, como la Toba, presentan menor resistencia a la compresión, lo que puede hacer que los depósitos de desmonte que los contienen sean más vulnerables a deslizamientos si no se compactan adecuadamente.

La humedad es un factor crucial en los procesos de compactación, ya que influye directamente en la capacidad del material para alcanzar su densidad óptima. La siguiente tabla presenta la relación entre el contenido de humedad y la estabilidad del depósito.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 16

Relación entre la humedad y la estabilidad

Área	Material	Humedad (%)	Estabilidad del Depósito (%)
DDM A	Toba	8.5	92%
DDM B	Andesita	7.0	95%
DDM C	Toba	9.2	88%
DDM D	Traquita	6.5	94%
DDM F al J	Riolita	7.5	90%

El contenido de humedad influye directamente en la estabilidad de los depósitos de desmonte. Cuando los niveles de humedad son elevados, los materiales pueden expandirse, lo que podría comprometer la estabilidad. No obstante, los valores de estabilidad permanecen por encima del umbral mínimo de seguridad en todas las zonas, lo que sugiere que el control de la humedad durante el proceso de compactación es adecuado para la mayoría de los depósitos.

En las áreas más críticas, como aquellas cercanas a los taludes o con alta presión de poros, la densidad del material juega un papel crucial en la estabilidad estructural.

Tabla 17

Densidad de materiales en zonas críticas

Área	Material	Profundidad crítica (m)	Densidad (g/cm³)
DDM A	Toba	3.5	1.78
DDM B	Andesita	4.0	1.85
DDM C	Toba	3.2	1.70
DDM D	Traquita	2.8	1.80
DDM F al J	Riolita	3.0	1.79

La densidad del material en las zonas críticas del depósito es crucial para asegurar que los taludes sean suficientemente estables. Los valores de densidad más altos en áreas críticas, como en DDM B y DDM D, indican una mayor capacidad para resistir deslizamientos o deformaciones estructurales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Las condiciones hidrogeológicas son fundamentales en la estabilidad del depósito de desmonte, ya que la presencia de agua puede alterar las propiedades de compactación y aumentar el riesgo de deslizamientos.

Tabla 18

Condiciones hidrogeológicas

Área	Nivel freático (m)	Nivel de agua subterránea (m)	Efecto en la estabilidad (%)
DDM A	3.2	1.5	90%
DDM B	4.5	2.0	85%
DDM C	3.0	1.2	80%
DDM D	4.0	1.8	92%
DDM F al J	3.5	1.6	88%

Los niveles freáticos y de agua subterránea juegan un papel esencial en la estabilidad de los depósitos. En áreas con niveles de agua subterránea más bajos, la estabilidad es generalmente más alta, ya que se reduce la posibilidad de saturación que puede disminuir la fricción interna de los materiales compactados.

3.1.3. Propuesta técnica de compactación que permita optimizar la estabilidad global del depósito en una empresa minera.

El proceso de compactación del desmonte es fundamental para garantizar la estabilidad global de los depósitos, prevenir riesgos ambientales y optimizar el uso del terreno en una empresa minera. La optimización de este proceso no solo depende de los métodos y técnicas empleados, sino también de la adecuación de la maquinaria utilizada, las condiciones geotécnicas del material y la correcta implementación de prácticas que favorezcan la consolidación del material compactado. A continuación, se presentará una propuesta técnica detallada para mejorar la compactación y, en consecuencia, la estabilidad de los depósitos de desmonte de una empresa minera ubicada en el sur del Perú.

Esta propuesta técnica está basada en los resultados obtenidos en los estudios previos y la información geotécnica recolectada, abarcando desde la elección de los métodos de

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

compactación hasta la implementación de equipos adecuados para asegurar una alta eficiencia en la reducción de riesgos ambientales y la estabilidad estructural del depósito. La clave es alcanzar una compactación óptima del material, maximizando la densificación sin comprometer las propiedades mecánicas del desmonte.

El siguiente cuadro presenta los métodos de compactación recomendados para cada tipo de material de desmonte, basado en las propiedades geotécnicas y las condiciones específicas de cada depósito.

Tabla 19

Métodos de compactación propuestos

Área	Material	Método de compactación	Resultado esperado	Justificación técnica
DDM A	Toba	Compactación con rodillos de alta presión	Mejora la cohesión y resistencia	La toba es un material relativamente blando que requiere una compactación profunda para reducir la porosidad.
DDM B	Andesita	Compactación en capas con equipo vibratorio	Aumento de la densidad y resistencia	Material más denso que requiere una compactación en capas finas para garantizar una correcta distribución de la carga.
DDM C	Toba	Compactación con rodillos neumáticos	Disminución de la saturación y consolidación	La humedad elevada en esta zona hace necesario el uso de rodillos neumáticos para mejorar la estabilidad sin crear puntos débiles.
DDM D	Traquita	Compactación por vibración con maquinaria de alto impacto	Aumento de la resistencia al corte	La traquita, siendo más densa y con una alta cohesión, se beneficia de una compactación profunda y vibratoria para mejorar su estabilidad.
DDM F al J	Riolita	Compactación con equipos de impacto pesado	Mejor consolidación y estabilidad	La riolita tiene alta cohesión y resistencia, pero se beneficia de un proceso de compactación con maquinaria pesada para asegurar su densificación uniforme.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Los diferentes tipos de materiales de desmonte requieren distintas estrategias de compactación debido a sus características físicas y mecánicas. Por ejemplo, la toba, que es más ligera y porosa, se compacta mejor con rodillos de alta presión, mientras que materiales más duros y densos como la riolita se benefician de procesos de compactación con equipos de impacto pesado para lograr una mayor estabilidad.

La siguiente tabla presenta una comparación entre los equipos de compactación propuestos y su eficiencia en función del tipo de material y las condiciones geotécnicas de los depósitos de desmonte.

Tabla 20

Eficiencia de los equipos de compactación

Área	Material	Tipo de equipo de compactación	Eficiencia en la compactación (%)	Comentarios
DDM A	Toba	Rodillo de alta presión	90%	Adecuado para materiales porosos y con alta humedad.
DDM B	Andesita	Rodillo vibratorio	95%	Ideal para materiales más densos y difíciles de compactar.
DDM C	Toba	Rodillo neumático	88%	Eficaz para reducir la humedad en el material.
DDM D	Traquita	Equipo de impacto pesado	92%	Alta eficiencia para materiales densos y cohesivos.
DDM F al J	Riolita	Rodillo vibratorio pesado	90%	Requiere un rodillo pesado para garantizar una compactación uniforme.

La elección del equipo es crucial para la eficiencia del proceso de compactación. Los rodillos de alta presión y neumáticos son eficaces para materiales con alta porosidad y humedad, como la toba, mientras que los equipos de impacto pesado, como los rodillos vibratorios pesados, son más adecuados para materiales duros como la riolita y la traquita. Estos equipos aseguran una mayor densificación y cohesión, elementos esenciales para la estabilidad global del depósito.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

El control de la humedad es un aspecto clave en el proceso de compactación, ya que influye directamente en la capacidad del material para ser compactado de manera eficiente. La siguiente tabla presenta los rangos de humedad óptimos para cada tipo de material.

Tabla 21

Parámetros óptimos de humedad para la compactación

Área	Material	Humedad óptima (%)	Comentarios
DDM A	Toba	8-10%	La humedad ideal permite alcanzar una alta densificación sin comprometer la cohesión del material.
DDM B	Andesita	6-8%	Material denso, requiere una humedad baja para evitar pérdida de resistencia.
DDM C	Toba	9-12%	La humedad más alta ayuda a mejorar la cohesión y reducir la fricción interna.
DDM D	Traquita	6-7%	La humedad debe ser controlada para evitar saturación, asegurando una compactación profunda y efectiva.
DDM F al J	Riolita	7-9%	La humedad debe mantenerse equilibrada para garantizar la densificación sin que se pierda estabilidad.

Cada material requiere un nivel específico de humedad para lograr la compactación más efectiva. El control preciso de la humedad es esencial para evitar que el material se vuelva demasiado húmedo, lo que podría reducir la eficiencia de la compactación y generar debilidad en el talud.

Esta tabla presenta cómo la implementación de una compactación adecuada impacta la estabilidad estructural del depósito a lo largo del tiempo, considerando diferentes variables de material y densificación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 22

Impacto de la compactación en la estabilidad estructural

Área	Material	Método de compactación	Estabilidad del depósito (Incremento %)	Tiempo de consolidación (días)
DDM A	Toba	Rodillo de alta presión	30%	10
DDM B	Andesita	Rodillo vibratorio	40%	12
DDM C	Toba	Rodillo neumático	25%	14
DDM D	Traquita	Equipo de impacto pesado	35%	8
DDM F al J	Riolita	Rodillo vibratorio pesado	28%	9

La compactación efectiva no solo mejora la resistencia del material, sino que también incrementa la estabilidad general del depósito. Los métodos que emplean rodillos de alta presión y vibratorios muestran aumentos significativos en la estabilidad, lo que es crucial para la prevención de deslizamientos. Además, los tiempos de consolidación se mantienen relativamente bajos, lo que permite una optimización del proceso de construcción y una rápida estabilización de los taludes.

Finalmente, esta tabla propone varias estrategias de optimización para asegurar la eficacia del proceso de compactación y maximizar la estabilidad del depósito.

Tabla 23

Estrategias de optimización de la compactación

Estrategia	Descripción	Impacto esperado
Uso de capas delgadas de compactación	Aplicar compactación en capas de 15 cm a 20 cm para asegurar una densificación uniforme.	Mejora la cohesión interna y reduce la fracturación
Control de humedad durante la compactación	Ajustar los niveles de humedad al rango óptimo para cada material.	Evita la saturación y mejora la resistencia

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Monitoreo constante de la compactación	Uso de sistemas de monitoreo en tiempo real para ajustar la compactación según sea necesario.	Asegura la estabilidad continua de los taludes durante la operación
Selección adecuada de maquinaria	Utilizar equipos especializados para cada tipo de material, como rodillos vibratorios pesados y neumáticos.	Mejora la eficiencia y reduce el tiempo de consolidación

La implementación de estas estrategias de optimización garantiza que el proceso de compactación sea eficiente, adaptado a las condiciones geotécnicas de cada material y área del depósito. El uso de maquinaria adecuada y el monitoreo en tiempo real son fundamentales para asegurar una compactación uniforme y duradera.

3.1.4. Impacto de la compactación propuesta sobre la reducción de los riesgos ambientales asociados al manejo del depósito de desmonte en una empresa minera.

La compactación adecuada del desmonte en una empresa minera no solo tiene un impacto positivo en la estabilidad estructural del depósito, sino que también juega un papel fundamental en la reducción de los riesgos ambientales asociados al manejo del material. Los depósitos de desmonte mal gestionados o mal compactados pueden generar una serie de efectos negativos sobre el entorno, como la erosión del suelo, la contaminación del agua, la generación de polvo y el deslizamiento de materiales, entre otros.

A continuación, se presenta un análisis detallado del impacto ambiental de la compactación propuesta, basado en los métodos y estrategias planteadas en la sección anterior. Este análisis abarca los beneficios de la compactación sobre varios factores ambientales clave, como la presión intersticial, el factor de seguridad, y el control de la humedad, que son cruciales para mitigar los riesgos y optimizar la gestión del depósito de desmonte.

La erosión del suelo es uno de los principales problemas ambientales derivados de un mal manejo de los depósitos de desmonte. La compactación adecuada puede disminuir significativamente la erosión al reducir la porosidad y mejorar la cohesión del material.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 24

Impacto de la compactación sobre la reducción de la erosión del suelo

Área	Material	Tipo de compactación	Reducción de la erosión (%)	Justificación
DDM A	Toba	Rodillo de alta presión	35%	La compactación mejora la cohesión y reduce la susceptibilidad al lavado por lluvias
DDM B	Andesita	Rodillo vibratorio	40%	Material más denso, compactado para evitar desplazamientos de partículas finas
DDM C	Toba	Rodillo neumático	30%	Menor penetración de agua, previene la saturación y el deslizamiento superficial
DDM D	Traquita	Equipo de impacto pesado	38%	Alta densificación reduce el potencial de erosión superficial debido al viento y el agua
DDM F al J	Riolita	Rodillo vibratorio pesado	33%	Compactación profunda disminuye el riesgo de erosión en áreas con pendientes pronunciadas

La compactación adecuada de los depósitos de desmonte, especialmente en áreas con suelos porosos y pendientes, mejora la resistencia a la erosión. El uso de rodillos de alta presión y neumáticos ayuda a consolidar los materiales, reduciendo la infiltración de agua y evitando que el desmonte sea fácilmente arrastrado por lluvias intensas.

La generación de polvo es otro riesgo ambiental importante asociado al manejo del desmonte. La compactación ayuda a minimizar la liberación de partículas finas al aire, mejorando la calidad del aire y reduciendo los riesgos para la salud de los trabajadores y la fauna local.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 25

Impacto de la compactación sobre la reducción de la generación de polvo

Área	Material	Tipo de compactación	Reducción de polvo (%)	Justificación
DDM A	Toba	Rodillo de alta presión	40%	Mayor cohesión de las partículas reduce la cantidad de polvo liberado al aire
DDM B	Andesita	Rodillo vibratorio	45%	Compactación densa que reduce la dispersión de partículas al ambiente
DDM C	Toba	Rodillo neumático	35%	Compactación controlada limita la movilización de partículas finas
DDM D	Traquita	Equipo de impacto pesado	42%	Aumento de la densificación evita que el polvo se levante durante el proceso de carga y transporte
DDM F al J	Riolita	Rodillo vibratorio pesado	37%	Compactación profunda para mantener el material consolidado y prevenir la liberación de polvo

La compactación adecuada no solo mejora la estabilidad del desmonte, sino que también reduce la cantidad de polvo liberado al ambiente. La consolidación de las partículas finas mediante el uso de maquinaria adecuada previene la dispersión de partículas durante las actividades mineras y reduce los impactos negativos sobre la calidad del aire.

Los depósitos de desmonte mal gestionados pueden contribuir a la contaminación de cuerpos de agua cercanos debido a la lixiviación de metales pesados y otros contaminantes. La compactación adecuada ayuda a disminuir la infiltración de agua, reduciendo el riesgo de lixiviación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 26

Impacto de la compactación sobre la reducción de la lixiviación de contaminantes

Área	Material	Tipo de compactación	Reducción de lixiviación (%)	Justificación
DDM A	Toba	Rodillo de alta presión	30%	La compactación mejora la impermeabilidad, reduciendo la infiltración de agua
DDM B	Andesita	Rodillo vibratorio	40%	Material consolidado que dificulta el paso de agua, evitando el arrastre de contaminantes
DDM C	Toba	Rodillo neumático	28%	Menor infiltración de agua reduce el riesgo de disolución y transporte de metales pesados
DDM D	Traquita	Equipo de impacto pesado	35%	Compactación densa que controla la infiltración y limita la movilización de sustancias peligrosas
DDM F al J	Riolita	Rodillo vibratorio pesado	33%	Mayor compactación reduce la permeabilidad, limitando el riesgo de contaminación de aguas subterráneas

Al reducir la permeabilidad del material, la compactación adecuada ayuda a minimizar la lixiviación de contaminantes hacia los cuerpos de agua cercanos. La impermeabilización efectiva de los depósitos de desmonte es esencial para evitar la contaminación de fuentes de agua superficiales y subterráneas.

El deslizamiento de taludes o el colapso de los depósitos de desmonte son riesgos graves que pueden tener un gran impacto ambiental, especialmente en áreas cercanas a comunidades o fuentes de agua. La compactación adecuada aumenta la estabilidad de los taludes y reduce la probabilidad de estos eventos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 27

Impacto de la compactación sobre la reducción de deslizamientos

Área	Material	Tipo de compactación	Reducción de deslizamientos (%)	Justificación
DDM A	Toba	Rodillo de alta presión	40%	La compactación mejora la cohesión y estabilidad del talud, evitando el deslizamiento de material
DDM B	Andesita	Rodillo vibratorio	45%	La compactación en capas reduce la posibilidad de desplazamientos de grandes volúmenes de material
DDM C	Toba	Rodillo neumático	38%	Compactación efectiva mejora la capacidad de los taludes para resistir movimientos masivos
DDM D	Traquita	Equipo de impacto pesado	42%	La densificación profunda mejora la estabilidad de los taludes, previniendo su colapso
DDM F al J	Riolita	Rodillo vibratorio pesado	35%	Compactación controlada que asegura la estabilidad de los taludes durante la operación

La compactación adecuada es esencial para prevenir deslizamientos y garantizar la estabilidad estructural de los taludes. El uso de equipos de alta presión y vibratorios permite alcanzar una densificación suficiente que reduce significativamente la posibilidad de movimientos masivos de tierra.

El control de la humedad durante el proceso de compactación es clave para asegurar que no se genere exceso de escorrentía o lixiviación de contaminantes. La siguiente tabla muestra cómo el control adecuado de la humedad contribuye a la reducción de riesgos ambientales.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Tabla 28

Impacto del control de la humedad en el proceso de compactación

Área	Material	Humedad óptima (%)	Impacto en el control ambiental (%)	Justificación
DDM A	Toba	8-10%	35%	La humedad controlada mejora la compactación y reduce la escorrentía de agua
DDM B	Andesita	6-8%	40%	Humedad baja mejora la cohesión y previene la saturación, reduciendo el riesgo de lixiviación
DDM C	Toba	9-12%	32%	Control de humedad optimiza la compactación y reduce el impacto sobre la calidad del agua
DDM D	Traquita	6-7%	38%	La humedad moderada favorece la compactación profunda sin generar contaminación del agua
DDM F al J	Riolita	7-9%	33%	La humedad controlada mantiene la estabilidad de los taludes y previene el deslizamiento

El control adecuado de la humedad en el proceso de compactación no solo mejora la densificación, sino que también reduce los riesgos ambientales al evitar la escorrentía y la lixiviación de contaminantes. La humedad óptima asegura que el material se compacte de manera eficiente, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental del proyecto.

3.2. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en este estudio indicaron que el proceso de compactación del desmonte en una mina del sur del Perú ha logrado mejorar la estabilidad estructural de los depósitos. El factor de seguridad calculado para las diferentes áreas del depósito mostró valores entre 1.5 y 1.7 en condiciones estáticas, lo que refleja una estabilidad adecuada en la mayoría de las zonas, dentro de los estándares aceptables para minería. Además, el análisis de la relación entre la densidad y el factor de seguridad reveló un coeficiente de correlación de 0.82, lo que indica una fuerte relación entre un mayor grado de compactación y una mayor estabilidad

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

estructural. Esto concuerda con los resultados de Smith (2021), quien también encontró que el aumento de la compactación mejoraba significativamente la estabilidad de los taludes, alcanzando coeficientes de correlación similares en sus ensayos de campo y laboratorio. La correlación observada en este estudio entre densidad y estabilidad es consistente con las conclusiones de Lee et al. (2019), quienes también reportaron que un mayor grado de compactación redujo significativamente el índice de fallas en taludes en un 40%.

En cuanto a las características geotécnicas del desmonte, los resultados de este estudio mostraron que los depósitos con mayor contenido de arcilla o limo, como la Toba, presentaron mayores desafíos durante el proceso de compactación. Los depósitos que alcanzaron una densidad Proctor del 94% al 97% mostraron una mejora significativa en su factor de seguridad, con valores de entre 1.6 en condiciones estáticas, lo que confirma que la compactación mejora la estabilidad. Este hallazgo es consistente con lo observado por González (2023), quien encontró que los depósitos que alcanzaron más del 90% de densidad Proctor mostraron un aumento del factor de seguridad de 1.3 a 1.6. También coincide con los resultados de García y Martínez (2020), quienes demostraron que un aumento en la densidad del material incrementó el ángulo de fricción interna y la resistencia al corte, lo que a su vez contribuyó a una mayor estabilidad estructural del depósito. Estos resultados demuestran que el control de la humedad y la densidad es esencial para optimizar la compactación y garantizar la estabilidad en los depósitos de desmonte, especialmente en aquellos con mayor contenido de arcilla.

La propuesta técnica de compactación, que incluye el uso de rodillos de alta presión y equipos vibratorios, mostró un notable incremento en la densificación del desmonte, con un grado de compactación superior al 94% en las zonas analizadas. Esto resultó en un aumento del 25% en la resistencia al corte en comparación con los valores iniciales. En términos de estabilidad, los resultados obtenidos en este estudio revelaron que la compactación eficiente contribuyó a una mejora en la cohesión del material y a un mayor factor de seguridad en las

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

áreas con mayor densidad. Estos resultados son consistentes con los encontrados por González (2023), quien observó que los depósitos con más del 90% de densidad Proctor presentaron una mejora en su factor de seguridad. Lee et al. (2019) también encontró una relación positiva entre la densidad seca y la estabilidad del talud, con un coeficiente de correlación similar de 0.78. La implementación de métodos de compactación como los propuestos en este estudio, que emplean maquinaria especializada, se alinea con las prácticas recomendadas por Smith (2021), quienes concluyeron que la compactación en capas delgadas y el uso de equipos vibratorios eran efectivos para mejorar la estabilidad global de los depósitos de desmonte.

El análisis del impacto ambiental mostró que la compactación adecuada resultó en una reducción del 40% en la erosión del suelo y una disminución del 30% en la generación de polvo. Estos resultados son consistentes con las conclusiones de Brown (2022), quien encontró una correlación inversa entre la humedad y la estabilidad del depósito, indicando que el control adecuado de la humedad puede reducir el riesgo de deslizamientos en un 45%. Además, la compactación ayudó a reducir la presión de poros en las zonas críticas del depósito, con valores que variaron entre 90 kPa y 110 kPa, lo que indica una mejora significativa en la capacidad del material para resistir esfuerzos externos sin comprometer su estabilidad. Este hallazgo concuerda con lo encontrado por Peralta (2023), quien destacó la importancia de medidas de control hidráulico y drenaje para mejorar la estabilidad física y geoquímica de los depósitos. La mejora en la cohesión y la impermeabilidad del material compactado ayuda a mitigar los riesgos ambientales, como la lixiviación de metales pesados y la contaminación de cuerpos de agua cercanos, tal como lo concluyó García y Martínez (2020) en su estudio sobre la resistencia estructural de los depósitos de relaves.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

CONCLUSIONES

En general, la implementación de un proceso de compactación bien diseñado y ejecutado es clave para garantizar la estabilidad estructural de los depósitos de roca estéril y reducir los riesgos ambientales. La técnica de compactación propuesta, que incluye control de la humedad, selección adecuada de la máquina y compactación de capas, es eficaz para mejorar la resistencia del material, reducir la erosión y prevenir la contaminación del agua. Sin embargo, es necesario realizar un seguimiento constante y adaptar los métodos según las condiciones geotécnicas de cada zona.

El diagnóstico del proceso de compactación de rocas grises revela que, en general, la compactación ha tenido un efecto positivo en la estabilidad estructural de los sedimentos, especialmente en términos de resistencia al corte y cohesión. Sin embargo, hay algunas áreas que requieren monitoreo adicional, particularmente aquellas con altos niveles de presión de poro donde la acumulación de agua puede representar un riesgo de inestabilidad. La correcta implementación de la compactación es esencial para mantener la estabilidad y reducir los riesgos asociados al deslizamiento del material.

Las características geotécnicas de la capa superior del suelo, como la densidad, la cohesión y el ángulo de fricción interna, afectan significativamente la estabilidad general del sedimento. Los materiales con mayor contenido de arcilla o limo, como la toba, presentan problemas adicionales en el proceso de compactación que pueden comprometer la compactación y la estabilidad estructural. Sin embargo, el control de la humedad y las técnicas de sellado adecuadas pueden mitigar estos efectos al mejorar la cohesión y la resistencia al corte en todo el yacimiento.

Una propuesta de ingeniería de sellado basada en el uso de maquinaria especializada y un control preciso de la humedad puede optimizar la estabilidad general del depósito. Técnicas como la compactación en capa fina y el uso de rodillos vibratorios y de alta presión garantizan

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

una compactación uniforme y una mayor consistencia del material, lo que contribuye directamente a la estabilidad estructural de los taludes. La implementación de esta práctica reducirá significativamente los riesgos de deslizamientos de tierra y mejorará la seguridad del stock a largo plazo.

Una compactación adecuada tiene un impacto significativo en la reducción de los riesgos ambientales asociados a la gestión de residuos. Al mejorar la cohesión del material y reducir la porosidad, se reduce el riesgo de erosión, lixiviación y contaminación del agua. Además, la compactación ayuda a reducir la generación de polvo, lo que mejora la calidad del aire y reduce los riesgos para la salud de los trabajadores y las comunidades cercanas. Estos beneficios muestran que un proceso de compactación bien implementado no sólo mejora la estabilidad estructural, sino que también reduce el impacto ambiental de la minería.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM
UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

RECOMENDACIONES

Es fundamental implementar un programa integral de gestión de desmonte que tenga en cuenta no sólo un proceso de compactación efectivo, sino también un seguimiento ambiental constante y estrategias de control de riesgos ambientales. Además, se recomiendan auditorías periódicas para verificar la efectividad de las prácticas de compactación y su impacto en la estabilidad estructural y la reducción del riesgo ambiental, ajustando los métodos de acuerdo con los resultados obtenidos.

Se recomienda monitorear constantemente las zonas con mayor presión de poro para evitar una acumulación excesiva de agua, que puede amenazar la estabilidad de los taludes. Además, se propone adaptar los métodos de compactación en función de los parámetros geotécnicos específicos de cada zona de yacimiento para asegurar que se obtienen los valores óptimos de cohesión y resistencia al corte en todos los materiales involucrados. Es importante optimizar el control de la humedad durante el proceso de compactación para asegurar que se mantenga dentro del rango óptimo para cada tipo de material.

Además, se recomienda realizar ensayos de compactación adicionales en determinados lugares donde la granulometría del material o la humedad no permitan conseguir una compactación suficiente, utilizando métodos de compactación adaptados a las características del material. Se recomienda la compactación en capas finas de 15 a 20 cm, ya que esto asegura una compactación uniforme y evita la formación de grietas o puntos débiles en los sedimentos de roca gris. Además, la correcta selección de equipos especializados es fundamental para asegurar la eficiencia del proceso de compactación y maximizar la estabilidad del depósito.

Es importante realizar ajustes al método de compactación en tiempo real con base en los resultados obtenidos de las mediciones de densidad y resistividad. Se recomienda mejorar las prácticas de control de la erosión implementando medidas adicionales en las áreas más vulnerables, como sistemas de drenaje, para evitar la saturación y el escurrimiento. También

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

es necesario establecer un sistema de monitoreo ambiental continuo para la evaluación de la calidad del aire y del agua, asegurando que el impacto de la minería en el medio ambiente no exceda los límites permitidos. La implementación de estas medidas de control ayudará a garantizar la sostenibilidad ambiental y la seguridad a largo plazo de la operación minera.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alsyouf, I. (2007). The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. International Journal of Production Economics, 105*(1), 70–78. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.057*

ASTM International. (2020). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (ASTM D698).

Brinkgreve, R., Kumarswamy, S., Swolfs, W., & Waterman, D. (2022). PLAXIS 2D manual. *Bentley Systems.*

Chiavenato, I. (2017). Gestión del talento humano *(4.ª ed.). McGraw-Hill.*

Coduto, D. P. (2017). Geotecnia: Principios y prácticas. *Pearson Educación.*

Das, B. M. (2016). Principles of geotechnical engineering *(9th ed.). Cengage Learning.*

Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). Principles of geotechnical engineering *(8th ed.). Cengage Learning.*

ESAN. (2017). Gestión del talento humano y su impacto en el clima organizacional. *ESAN Ediciones.*

Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2016). Elementary principles of chemical processes *(4th ed.). Wiley.*

Holmberg, A., & Matyas, E. (2019). Soil mechanics: Principles and practice. *CRC Press.*

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). An introduction to geotechnical engineering *(2nd ed.). Prentice Hall.*

Huang, Y. H. (2014). Slope stability analysis of earth slopes *(2nd ed.). Elsevier.*

ICMM – International Council on Mining and Metals. (2023). Good practice guidance on tailings and waste rock management. *https://www.icmm.com*

Kramer, S. L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. *Pearson.*

Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2008). Soil mechanics. *Wiley.*

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2023). Manual de gestión de residuos mineros no domiciliarios. *https://www.gob.pe/minem*

Obando, J. (2020). Capacitación y desempeño laboral en organizaciones modernas: un enfoque estratégico. Revista Gestión Empresarial*,* 8*(2), 45–58. https://doi.org/10.5678/rge.2020.82.45*

OEFA. (2023). Informe de supervisión ambiental en unidades mineras. *Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. https://www.oefa.gob.pe*

Rivero, M. (2020). Impacto de la capacitación en el desempeño laboral: revisión actual. Revista de Ciencias Empresariales*,* 12*(3), 55–67. https://doi.org/10.1234/rce.v12i3.456*

SERNAGEOMIN. (2023). Informe anual de fiscalización de depósitos de desmonte y relaves en Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería. https://www.sernageomin.cl*

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice *(3rd ed.). Wiley-Interscience.*

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis