

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024

Presentado por:

Marco Antonio Huallpa Ccahuana

Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de
reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira -
2024**

Presentado por **Marco Antonio Huallpa Ccahuana**, para optar el título de
Ingeniero Civil

Sustentado y aprobado el 01 de setiembre de 2025 ante el jurado evaluador

Presidente:


Mg. Jinmer Bravo Apaza

Primer miembro:


Mg. Saúl José Chipa Cahuana

Segundo miembro:


Ing. Thalya Nikol Ilasaca Colque

Asesor:


Mtro. Guido Bravo Mendoza



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 208-2025

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis intitulada: **"INFLUENCIA DE SILANO HIDROLIZADO EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DEL FONDO Y TALUD DE RESERVORIO DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN SUELO NATURAL EN EL DISTRITO DE HAQUIRA-2024"**, presentado por el Bachr: **MARCO ANTONIO HUALLPA CCAHUANA**, Para optar el Título de **Ingeniero Civil**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE de (13%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 25 de agosto del 2025

Atentamente,

C. c.
Archivo
REG. N° 687

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
Hesmeralda Rojas Enriquez
Dra. Hesmeralda Rojas Enriquez
DIRECTORA DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA



Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron, directa e indirectamente, a la realización de la presente tesis.

En primer lugar, agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, comprensión y aliento constante a lo largo de mi formación profesional. Su confianza y sacrificio han sido fundamentales para alcanzar este logro.

Asimismo, expreso mi gratitud a mis amigos y compañeros, quienes me brindaron su apoyo, motivación y colaboración durante el desarrollo del presente trabajo, convirtiéndose en una fuente permanente de estímulo académico y personal.

De manera especial, agradezco a mis docentes y asesores por sus valiosas orientaciones, conocimientos compartidos y acompañamiento académico, los cuales fueron determinantes para la culminación satisfactoria de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas e instituciones que, de una u otra forma, contribuyeron al desarrollo de esta tesis y dejaron una huella significativa en este proceso académico y personal.



Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a mis seres queridos, quienes han sido guía y fortaleza a lo largo de mi camino personal y profesional. Su confianza, apoyo constante y palabras de aliento me impulsaron a perseverar y alcanzar este objetivo.

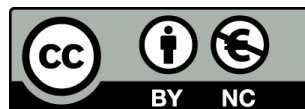
Asimismo, dedico esta tesis a todas aquellas personas que, con su ejemplo, esfuerzo y dedicación, me inspiraron a seguir adelante y a no renunciar a mis sueños. Cada uno de ellos ha sido parte fundamental de este logro.



Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio
de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024

Línea de investigación: Ingeniería de materiales.

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1 Descripción del problema	5
1.2 Enunciado del problema	7
1.2.1 Problema general	7
1.2.2 Problemas específicos	7
1.3 Justificación de la investigación	7
1.3.1 Justificación teórica	7
1.3.2 Justificación metodológica	8
1.3.3 Justificación práctica	8
CAPÍTULO II	9
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	9
2.1 Objetivos de la investigación	9
2.1.1 Objetivo general	9
2.1.2 Objetivos específicos	9
2.2 Hipótesis de la investigación	9
2.2.1 Hipótesis general	9
2.2.2 Hipótesis específicas	9
2.3 Operacionalización de variables	11
CAPÍTULO III	12
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	12
3.1 Antecedentes	12
3.1.1 Antecedentes internacionales	12
3.1.2 Antecedentes nacionales	14
3.2 Marco teórico	16
3.2.1 Bases teóricas de la variable independiente: Silano hidrolizado (SiOH)	16
3.2.2 Bases teóricas de la variable dependiente impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural	21
3.2.3 Dimensiones de la variable dependiente: Impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural	27
3.3 Marco conceptual	35
3.3.1 Hidrofobicidad	35
3.3.2 Impermeabilización	35
3.3.3 Permeabilidad	35
3.3.4 Reservorios de tierra	36
3.3.5 Silano hidrolizado	36
	1



3.3.6	El infiltrómetro	36
3.3.7	Reservorio	36
3.3.8	Fondo	36
3.3.9	Talud	36
3.3.10	Suelo natural	37
3.3.11	Densidad de campo	37
CAPÍTULO IV		38
METODOLOGÍA		38
4.1	Tipo y nivel de investigación	38
4.2	Diseño de la investigación	38
4.3	Descripción ética de la investigación	41
4.4	Población y muestra	42
4.5	Procedimiento	43
4.5.1	Ubicación del estudio de permeabilidad	44
4.5.2	Extracción de la muestra del suelo natural	45
4.5.3	Caracterización del suelo	45
4.5.4	Evaluación de permeabilidad	52
4.6	Técnica e instrumentos	54
4.7	Análisis estadístico	55
4.7.1	Media aritmética (\bar{x})	55
4.7.2	Varianza (S^2) y desviación estándar (s)	55
4.7.3	Prueba de normalidad	56
4.7.4	Homogeneidad de varianzas (Homocedasticidad)	56
4.7.5	ANOVA unifactorial	56
4.7.6	Prueba post hoc (Tukey)	57
CAPÍTULO V		59
RESULTADOS Y DISCUSIONES		59
5.1	Análisis de resultados	59
5.2	Contrastación de hipótesis	71
5.3	Discusión	86
CAPÍTULO VI		89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		89
6.1	Conclusiones	89
6.2	Recomendaciones	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		92
ANEXOS		103



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Operacionalización de variables	11
Tabla 2 — Composición del silano hidrolizado (SiOH)	18
Tabla 3 — Requisitos para el afirmado según normativa vigente	24
Tabla 4 — Clases de permeabilidad de los suelos para obras de ingeniería	31
Tabla 5 — Tasas de infiltración de los suelos para obras de ingeniería civil	32
Tabla 6 — Límites de la clasificación del agregado fino	45
Tabla 7 — Parámetros de la clasificación del agregado grueso	46
Tabla 8 — Rango de contenido de humedad según el tipo del suelo	49
Tabla 9 — Clasificación de índice de plasticidad según el SUCS	51
Tabla 10 — Proporciones de dosis de silano hidrolizado	52
Tabla 11 — Validez de contenido del instrumento para medir la variable dependiente	58
Tabla 12 — Datos de infiltración sin tratamiento en fondo de reservorio	59
Tabla 13 — Datos de infiltración sin tratamiento en talud de reservorio	60
Tabla 14 — Datos de infiltración con tratamiento de 1.25 L/m ² en fondo	60
Tabla 15 — Datos de infiltración con tratamiento de 1.25 L/m ² en talud	61
Tabla 16 — Datos de infiltración con tratamiento de 1.50 L/m ² en fondo	61
Tabla 17 — Datos de infiltración con tratamiento de 1.50 L/m ² en talud	62
Tabla 18 — Resumen de resultados de la infiltración con el fondo de reservorio	62
Tabla 19 — Resumen de resultados de la infiltración con el talud de reservorio	63
Tabla 20 — Resumen de resultados de grado compactado del suelo natural en el fondo del reservorio	65
Tabla 21 — Resumen de resultados de grado compactado del suelo natural en el talud de reservorio	66
Tabla 22 — Propiedades físicas y clasificación del suelo natural	67
Tabla 23 — Resumen del contenido de humedad según dosificación de silano hidrolizado	68
Tabla 24 — Resumen de los límites de consistencia del suelo según dosificación de silano hidrolizado	68
Tabla 25 — Evaluación de la capacidad de impermeabilización del suelo natural en el fondo y talud de reservorio según dosificación de silano hidrolizado	71
Tabla 26 — Resultados del test de Shapiro-Wilk para la normalidad de la infiltración del suelo en el fondo y talud tras dosificación de 1.25 L/m ²	72
Tabla 27 — Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la infiltración del suelo con una dosificación al 1.25 L/m ²	73
Tabla 28 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio	73
Tabla 29 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el talud de reservorio	74
Tabla 30 — Resultados del test de Shapiro-Wilk para la normalidad de la infiltración del suelo en el fondo y talud tras dosificación de 1.50 L/m ²	74

Tabla 31 — Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la infiltración del suelo con una dosificación al 1.50 L/m ²	75
Tabla 32 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio	76
Tabla 33 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el talud de reservorio	76
Tabla 34 — Resultados del test de Shapiro-Wilk para la normalidad de la compactación de campo en el fondo y talud tras dosificación de silano hidrolizado	77
Tabla 35 — Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la compactación de campo	77
Tabla 36 — ANOVA para la compactación del suelo en el fondo de reservorio	78
Tabla 37 — ANOVA para la compactación del suelo en el talud de reservorio	78
Tabla 38 — Comparaciones múltiples con Tukey de la compactación del suelo en el fondo de reservorio	78
Tabla 39 — Comparaciones múltiples con Tukey de la compactación del suelo en el talud de reservorio	79
Tabla 40 — Subconjuntos homogéneos para la compactación del suelo en el fondo de reservorio	79
Tabla 41 — Subconjuntos homogéneos para la compactación del suelo en el talud de reservorio	80
Tabla 42 — Características físicas del suelo en función de la dosificación de silano hidrolizado	81
Tabla 43 — Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la infiltración del suelo	82
Tabla 44 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio	83
Tabla 45 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el talud de reservorio	83
Tabla 46 — Comparaciones múltiples con Tukey de la infiltración promedio del suelo en el fondo de reservorio	84
Tabla 47 — Subconjuntos homogéneos para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio	84
Tabla 48 — Comparaciones múltiples con Tukey de la infiltración promedio del suelo en el talud de reservorio	85
Tabla 49 — Subconjuntos homogéneos para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio	86
Tabla 50 — Matriz de consistencia	104



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Modo de acción del silano hidrolizado (SiOH)	17
Figura 2 — Permeámetro de carga constante	29
Figura 3 — Distrito de Haquira, lugar exacto donde llevar a cabo la investigación	44
Figura 4 — Grafico de comparación dosificación vs infiltración	63
Figura 5 — Grafico de comparación dosificación vs infiltración	63
Figura 6 — Grafico de comparación dosificación vs grado de compactado en el fondo	65
Figura 7 — Grafico de comparación dosificación vs grado de compactado en talud	66
Figura 8 — El agua en peligro por carencia de reservorios adecuados	105
Figura 9 — Validación de instrumento 01	106
Figura 10 — Validación de instrumento 02	107
Figura 11 — Validación de instrumento 03	108
Figura 12 — Factura de compra del silano	109
Figura 13 — La imagen muestra el producto químico de silano	109
Figura 14 — Ficha técnica del producto silano	110
Figura 15 — Ficha técnica del producto silano	111
Figura 16 — Certificado de análisis de silano	112
Figura 17 — Se observa traslado de la muestra del suelo para ensayo en laboratorio	113
Figura 18 — Verificación de las mallas de granulometría	113
Figura 19 — Análisis granulométrico y límites	113
Figura 20 — Se observa el reservorio para realizar los ensayos	114
Figura 21 — Prueba de densidad de campo en el fondo de reservorio	114
Figura 22 — Colocación de anillo para el ensayo en el fondo de reservorio	115
Figura 23 — Prueba de ensayo en el fondo de reservorio sin tratamiento	115
Figura 24 — Colocación de anillo para el ensayo sin tratamiento en talud de reservorio	116
Figura 25 — Medición de infiltración en talud reservorio sin tratamiento	116
Figura 26 — Preparación de silano hidrolizado para el fondo de reservorio	117
Figura 27 — Tratamiento del fondo de reservorio con silano hidrolizado	117
Figura 28 — Suelo tratado con silano hidrolizado del fondo reservorio	118
Figura 29 — Ensayo con tratamiento en el fondo de reservorio	118
Figura 30 — Ensayo con tratamiento en el talud de reservorio	119
Figura 31 — Medición de permeabilidad en el talud del reservorio	119
Figura 32 — Medición de permeabilidad en el fondo del reservorio	120
Figura 33 — Observación de filtración de agua en fondo de reservorio	120
Figura 34 — Se observa filtración con tratamiento en fondo de reservorio	121
Figura 35 — Observación de filtración en talud de reservorio	121
Figura 36 — Ensayo con dosificación de tratamiento en fondo de reservorio	122
Figura 37 — Se observa el reservorio señalizado con cinta para sus respectivos ensayos	122
Figura 38 — Ensayos de densidad de campo	123



Figura 39 — Preparación de silano para los ensayos de talud y fondo	123
Figura 40 — Resultados de granulometría	124
Figura 41 — Resultados de contenido de humedad sin tratamiento	125
Figura 42 — Resultados de contenido de humedad con tratamiento de 1.25 L/m ² de silano hidrolizado	125
Figura 43 — Resultados de contenido de humedad con tratamiento de 1.50 L/m ² de silano hidrolizado	126
Figura 44 — Resultados de límites de Atterberg sin tratamiento	127
Figura 45 — Resultados de límites de Atterberg con tratamiento de 1.25 L/m ² de silano hidrolizado	128
Figura 46 — Resultados de límites de Atterberg con tratamiento de 1.50 L/m ² de silano hidrolizado	129
Figura 47 — Resultados de densidad de campo sin tratamiento en fondo	130
Figura 48 — Resultados de densidad de campo con tratamiento 1.25 L/m ² en fondo	131
Figura 49 — Resultados de densidad de campo con tratamiento 1.50 L/m ² en fondo	132
Figura 50 — Resultados de densidad de campo sin tratamiento en talud	133
Figura 51 — Resultados de densidad de campo con tratamiento 1.25 L/m ² en talud	134
Figura 52 — Resultados de densidad de campo con tratamiento 1.50 L/m ²	135
Figura 53 — Resultado del ensayo de infiltración sin tratamiento en talud de reservorio	136
Figura 54 — Resultado del ensayo de infiltración con tratamiento de 1.5 L/m ² en talud	137
Figura 55 — Resultado del ensayo infiltración sin tratamiento en fondo de reservorio	138
Figura 56 — Resultado del ensayo de infiltración con tratamiento 1.50 L/m ² de fondo	139
Figura 57 — Certificado de calibración de horno eléctrico página 01	140
Figura 58 — Certificado de calibración de horno eléctrico página 02	141
Figura 59 — Certificado de calibración de horno eléctrico página 03	142
Figura 60 — Certificado de calibración de calibrador vernier página 01	143
Figura 61 — Certificado de calibración de calibrador vernier página 02	144
Figura 62 — Certificado de calibración de copa Casagrande página 01	145
Figura 63 — Certificado de calibración de copa Casagrande página 02	146
Figura 64 — Certificado de calibración de prensa hidráulica página 01	147
Figura 65 — Certificado de calibración de prensa hidráulica página 02	148
Figura 66 — Certificado de calibración de prensa hidráulica página 03	149

INTRODUCCIÓN

El distrito de Haqira se encuentra ubicado en la provincia de Cotabambas, en la región de Apurímac, Perú, se caracteriza por su relevante riqueza histórica y cultural, así como por un entorno natural diverso que condiciona las actividades productivas y sociales de su población.

En este contexto, la investigación titulada: Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira, reviste especial importancia, dado que busca aportar soluciones técnicas orientadas a mejorar la eficiencia en el almacenamiento de agua, recurso fundamental para el desarrollo de las comunidades rurales. La adecuada impermeabilización de los reservorios permite reducir pérdidas por filtración, garantizar la disponibilidad del recurso hídrico y contribuir a la seguridad hídrica de la población.

La aplicación de silano hidrolizado como tratamiento impermeabilizante representa una alternativa innovadora y sostenible, ya que permite mejorar las propiedades del suelo natural, reducir su permeabilidad y prolongar la vida útil de las infraestructuras hidráulicas. De esta manera, se contribuye no solo a la optimización del almacenamiento de agua, sino también a la conservación de los recursos hídricos y al uso eficiente de tecnologías compatibles con el desarrollo sostenible.

Asimismo, la presente investigación fomenta la adopción de soluciones técnicas modernas en el diseño, construcción y mantenimiento de reservorios, fortaleciendo las capacidades locales y promoviendo prácticas constructivas responsables con el medio ambiente.

La presente investigación aborda el problema de las pérdidas de agua por infiltración en reservorios de suelo natural en el distrito de Haqira. Para ello, se aplicó una metodología experimental con ensayos de permeabilidad mediante infiltrómetro de doble anillo, evaluando dos dosificaciones de silano hidrolizado. Los resultados evidencian una reducción significativa de la infiltración, identificándose como dosificación óptima 1.50 L/m².

El desarrollo del presente trabajo de investigación se estructura en los siguientes capítulos:



Capítulo I: Planteamiento del problema, donde se describe y formula el problema de investigación, se justifica su relevancia y se contextualiza dentro del ámbito de los reservorios de almacenamiento de agua.

Capítulo II: Objetivos e hipótesis, en el cual se establecen los objetivos generales y específicos del estudio, así como las hipótesis que orientan el análisis de las variables de investigación.

Capítulo III: Marco teórico referencial, que comprende la revisión de antecedentes, fundamentos teóricos y conceptos técnicos necesarios para sustentar científicamente la investigación.

Capítulo IV: Metodología, donde se detallan el enfoque, tipo y diseño de la investigación, así como los métodos, técnicas e instrumentos empleados para la recolección y análisis de datos.

Capítulo V: Resultados y discusión, en el que se presentan, analizan e interpretan los resultados obtenidos, contrastándolos con las hipótesis planteadas y la literatura especializada.

Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones, que resume los principales hallazgos del estudio, destaca su relevancia y propone recomendaciones y líneas futuras de investigación.

Finalmente, se incluyen los apartados correspondientes a las referencias bibliográficas y anexos, que complementan y respaldan el desarrollo de la presente investigación.



RESUMEN

El presente estudio analizó la influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y los taludes de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural, ubicado en el distrito de Haquira, provincia de Cotabambas, departamento de Apurímac. El objetivo fue determinar el efecto del silano hidrolizado sobre la permeabilidad del suelo natural de la zona, con la finalidad de reducir las pérdidas de agua por infiltración en reservorios construidos sobre suelo natural.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada, con nivel explicativo y diseño experimental. Se utilizaron muestras de suelo tratadas y no tratadas, considerando diferentes dosificaciones de silano hidrolizado. Las pruebas de permeabilidad se realizaron en campo mediante el método de doble anillo.

Los resultados evidenciaron una disminución significativa del coeficiente de permeabilidad en las muestras tratadas, alcanzando valores de infiltración de 0.027 cm/h en el fondo y 0.031 cm/h en los taludes. Estos resultados permitieron identificar una dosificación óptima de 1.50 L/m² de silano hidrolizado, la cual garantiza una adecuada impermeabilización del fondo y los taludes del reservorio, mostrando además una mayor efectividad en función de las características del suelo natural de la zona.

Se concluye que el uso de silano hidrolizado es eficaz como método alternativo de impermeabilización en reservorios construidos sobre suelo natural, contribuyendo a mejorar la eficiencia del almacenamiento hídrico en zonas alto andinas.

Los resultados fueron validados mediante análisis estadístico ANOVA y prueba post hoc de Tukey, confirmando diferencias significativas ($p < 0.05$).

Palabras clave: *Silano hidrolizado, permeabilidad, características del suelo, impermeabilización reservorios de suelo natural.*



ABSTRACT

This study analyzed the influence of hydrolyzed silane on the waterproofing of the bottom and slopes of a water storage reservoir in natural soil, located in the district of Haqira, province of Cotabambas, department of Apurímac. The objective was to determine the effect of hydrolyzed silane on the permeability of the area's natural soil, with the aim of reducing water losses due to infiltration in reservoirs built on natural soil.

The research was conducted using a quantitative, applied, explanatory, and experimental design. Treated and untreated soil samples were used, considering different dosages of hydrolyzed silane. Permeability tests were performed in the field using the double-ring method.

The results showed a significant decrease in the permeability coefficient in the treated samples, reaching infiltration values of 0.027 cm/h in the bottom and 0.031 cm/h in the slopes. These results allowed for the identification of an optimal dosage of 1.50 L/m² of hydrolyzed silane, which ensures adequate waterproofing of the reservoir's bottom and slopes, also demonstrating greater effectiveness depending on the characteristics of the area's natural soil.

It is concluded that the use of hydrolyzed silane is effective as an alternative waterproofing method for reservoirs built on natural soil, contributing to improved water storage efficiency in high Andean regions.

The results were validated using ANOVA statistical analysis and Tukey's post hoc test, confirming significant differences ($p < 0.05$).

Keywords: Hydrolyzed silane, permeability, soil characteristics, waterproofing of natural soil reservoirs.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

A nivel mundial, se dispone de información relacionada con una de las variables de estudio de esta investigación, referida a la impermeabilización del fondo y los taludes de reservorios de almacenamiento de agua construidos sobre suelo natural. La construcción de este tipo de reservorios enfrenta el desafío de prevenir las pérdidas de agua por filtración, lo cual compromete la eficiencia operativa y la sostenibilidad de los proyectos hídricos. Este problema resulta especialmente crítico en regiones donde predominan suelos de alta permeabilidad, como aquellos de textura arenosa o con baja cohesión. Las soluciones convencionales, tales como el uso de geomembranas o capas compactadas de arcilla, suelen implicar altos costos o presentan dificultades de implementación en zonas remotas o con recursos limitados, (Barranca Sáenz, 2019).

En este contexto, el uso de aditivos químicos como el silano hidrolizado (SiOH) ha surgido como una alternativa prometedora para mejorar las propiedades impermeables de los suelos naturales. El silano actúa modificando la estructura química del suelo, formando una barrera hidrofóbica a nivel de partículas, lo que contribuye a la reducción de la permeabilidad. No obstante, la efectividad de este aditivo depende de diversos factores, tales como la composición mineralógica del suelo, las condiciones climáticas y la metodología de aplicación empleada, (Calderón, 2011).

A nivel nacional, una problemática relevante es la deficiente impermeabilización de infraestructuras hidráulicas, como los reservorios de agua, lo que genera filtraciones y fugas que incrementan significativamente los costos de mantenimiento a largo plazo. Según Sika Perú (2024), aunque la inversión en impermeabilización representa aproximadamente el 5 % del costo total de una obra, una deficiente ejecución puede ocasionar incrementos de hasta el 80 % en los costos de mantenimiento futuro.

Asimismo, en el Perú, la impermeabilización de reservorios constituye un elemento clave para una adecuada gestión del recurso hídrico. El silano hidrolizado ofrece ventajas adicionales



frente a los métodos tradicionales de estabilización de suelos, al proporcionar propiedades hidrófobas permanentes que reducen la permeabilidad del suelo. De acuerdo con información del SENAMHI y el MINAGRI, se ha registrado un preocupante déficit en la capacidad de almacenamiento de diversos reservorios a nivel nacional. En el norte del país, reservorios como Poechos, Tinajones y Gallito Ciego presentan capacidades útiles de almacenamiento del 20 %, 12 % y 40 %, respectivamente. En el sur, reservorios como Condorama, Aguada Blanca, El Pañe, Pillones y El Frayle registran capacidades del 25 %, 50 %, 1 %, 50 % y 56 %, respectivamente. En la zona central, el sistema del río Rímac alcanza apenas el 37 % de su capacidad útil. Como consecuencia de las sequías, se estima que aproximadamente 37 valles, 350 mil hectáreas agrícolas y 120 mil personas se encuentran afectadas por esta situación, (RPP, 2017).

En el Perú, la producción agropecuaria se desarrolla durante todo el año; sin embargo, en épocas de sequía, la limitada infraestructura de riego y el uso de prácticas tradicionales poco eficientes restringen la disponibilidad de agua, generando impactos negativos en el medio ambiente, la economía y la sociedad. Un ejemplo de ello es el sistema de irrigación del canal “Peña Blanca”, ubicado en la región Moquegua, el cual forma parte de un sistema hidráulico preincaico y presenta deficiencias que limitan el abastecimiento hídrico, afectando la productividad agrícola y obligando a muchas familias a recurrir al autoconsumo o incluso a la migración en busca de ingresos adicionales. La mejora en la gestión del agua de riego permitiría incrementar la productividad agrícola, diversificar cultivos y generar excedentes económicos para las familias rurales, (FAO, s/f).

A nivel local, el distrito de Haqira, ubicado en la provincia de Cotabambas, departamento de Apurímac, se sitúa a una altitud promedio de 4 000 m s. n. m., presenta un clima frío y seco, y posee una economía basada principalmente en la agricultura, la ganadería y la minería. Cuenta con una población aproximada de 6 000 habitantes y una diversidad de recursos naturales aprovechados para actividades agropecuarias, (Municipalidad Provincial de Cotabambas, 2024).

El distrito de Haqira cuenta con tres tipos de reservorios: de geomembrana, de concreto y de tierra. No obstante, varios de estos presentan deficiencias en su impermeabilización, lo que genera filtraciones que comprometen tanto la calidad del agua almacenada como la disponibilidad del recurso para la población y la agricultura local (Sika, 2023). Asimismo, la presencia constante de agua debido a fugas puede ocasionar la degradación de la estructura del



reservorio, incrementando el riesgo de fallas estructurales y colapsos, (Geosoluciones de Ingeniería, 2023).

Por lo expuesto, la presente investigación tuvo como propósito determinar la influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira, provincia de Cotabambas, durante el año 2024.

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es la influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira, durante el año 2024?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la influencia de silano hidrolizado en la permeabilidad del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024?
- ¿Cuál es la influencia de silano hidrolizado en el grado de compactación natural del suelo de fondo y talud de un reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024?
- ¿Cuál es la influencia de silano hidrolizado en las características físicas del suelo del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024?

1.3 Justificación de la investigación

1.3.1 Justificación teórica

La impermeabilización de fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural constituye un tema relevante en la ingeniería civil, debido a que una inadecuada impermeabilización puede generar filtraciones que afectan la durabilidad de las estructuras y la calidad del agua almacenada. El silano hidrolizado es un material impermeabilizante que ha demostrado eficacia en diversas aplicaciones, por lo que estudiar su influencia en reservorios ubicados en el distrito de Haqira permitirá ampliar



el conocimiento científico sobre su comportamiento en suelos naturales. En este sentido, la presente investigación se justifica teóricamente, ya que contribuirá al análisis y comprensión de las variables estudiadas silano hidrolizado e impermeabilización del fondo y taludes de reservorios, tanto de manera individual como en su relación directa.

1.3.2 Justificación metodológica

Para el desarrollo de la investigación, se ejecutó, la ejecución de ensayos de impermeabilización en el fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural, mediante la aplicación de silano hidrolizado. Se emplearán metodologías estandarizadas de ensayo de permeabilidad, considerando dos dosificaciones distintas del aditivo, así como el análisis de las propiedades físicas iniciales del suelo extraído en campo, con el fin de evaluar la efectividad del silano hidrolizado en la reducción de la infiltración.

1.3.3 Justificación práctica

La presente investigación posee una alta relevancia práctica, ya que propone el uso del silano hidrolizado como aditivo impermeabilizante en suelos naturales, específicamente en el fondo y los taludes de reservorios de almacenamiento de agua. En contextos rurales como el distrito de Haqira, donde la construcción de reservorios es fundamental para el abastecimiento hídrico durante las épocas de sequía, la pérdida de agua por infiltración representa un problema constante que afecta directamente la eficiencia del almacenamiento.

La aplicación de esta tecnología busca ofrecer una alternativa de bajo costo y de fácil implementación frente a métodos tradicionales, como el uso de geomembranas o concreto, los cuales suelen ser costosos o de difícil acceso para las comunidades alto andinas. La validación del uso del silano en campo permitirá mejorar la eficiencia hídrica, optimizar el aprovechamiento de los recursos naturales, reducir las pérdidas por infiltración y aumentar la vida útil de las estructuras hidráulicas construidas sobre suelo natural.

Asimismo, los resultados obtenidos podrán servir como referencia técnica para gobiernos locales, ingenieros civiles y entidades públicas o privadas vinculadas a la gestión del recurso hídrico, contribuyendo a la toma de decisiones en futuros proyectos de reservorios rurales en zonas con características similares.



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Determinar la influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua construido sobre suelo natural en el distrito de Haqira, durante el año 2024.

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar la influencia de silano hidrolizado en la permeabilidad del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024.
- Determinar la influencia de silano hidrolizado en el grado de compactación natural del suelo del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024.
- Determinar la influencia de silano hidrolizado en las características físicas del suelo del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024.

2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

El silano hidrolizado influye significativamente en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024.

2.2.2 Hipótesis específicas

- El silano hidrolizado influye significativamente en la permeabilidad del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024.



- El silano hidrolizado influye significativamente en el grado de compactación natural del suelo del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024.
- El silano hidrolizado influye significativamente en las características físicas del suelo del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024.



2.2 Operacionalización de variables

Tabla 1 — Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores/ítems	Escala de medición
Variable independiente: Silano hidrolizado	El silano hidrolizado se forma mediante la hidrólisis de un silano, proceso en el cual los grupos alcoxi u orgánicos son reemplazados por grupos hidroxilo. Como resultado, el silano se transforma en silanol, el cual presenta propiedades funcionales que le permiten actuar como agente de acoplamiento, mejorando la adhesión entre materiales orgánicos e inorgánicos, así como modificador de la superficie de los materiales tratados, (Jones, D. R., 2018).	El aditivo silano hidrolizado aplicado al material de suelo natural se evalúa en función de su dosificación.	<ul style="list-style-type: none"> • Dosificación del silano hidrolizado 	<ul style="list-style-type: none"> • 0.00 L/m² de silano hidrolizado (muestra control) • 1.25 L/m² de silano hidrolizado • 1.50 L/m² de silano hidrolizado 	Razón
Variable dependiente: Impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural	Proceso de aplicación de materiales o sistemas destinados a impedir la filtración de agua a través del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua construido sobre suelo natural, con el fin de mantener la cantidad necesaria de agua en el depósito, proteger la estructura frente a posibles daños causados por la humedad y garantizar la eficiencia y durabilidad del reservorio, (Acosta Montedoro, 2024).	La impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural se evalúa a través de las siguientes dimensiones: a) Permeabilidad, b) Compactación natural del suelo, y c) Características físicas del suelo.	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad • Compactación natural del suelo • Características físicas del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Coeficiente de permeabilidad • Grado de compactación • Análisis de la granulometría • Límites de Atterberg • Contenido de humedad 	Escala de razón Razón Razón

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

3.1.1 Antecedentes internacionales

Harshit, Satish y Kant (2022), en su investigación titulada: Investigación de laboratorio de estabilización de suelos utilizando Terrasil y Zycobond, establecieron que los suelos naturales no siempre presentan la capacidad suficiente para soportar obras de infraestructura, por lo que resulta necesario mejorar sus propiedades mediante procesos de estabilización. Dicho proceso modifica las características físicas y mecánicas del suelo, incrementando su capacidad portante y durabilidad. Los autores destacan que las tecnologías basadas en nanotecnología representan una alternativa moderna para la estabilización de suelos. El estudio se desarrolló sobre suelos lateríticos empleados en una carretera diseñada para tránsito pesado (75–85 T), donde la filtración de agua reducía la durabilidad del pavimento. Para la estabilización se utilizaron Terrasil, cemento y Zycobond, evaluándose las propiedades físicas y mecánicas mediante ensayos CBR y UCS, con diferentes dosificaciones (Terrasil 0.075 %, cemento 1.0 % y Zycobond 0.075 %). Los resultados demostraron un incremento significativo de la resistencia del suelo, evidenciando que la adición de nanopartículas mejora notablemente sus propiedades geotécnicas.

Wan (2024) investigó el rendimiento y el mecanismo de impermeabilización de una membrana impermeable a base de silano orgánico aplicada en subrasantes. En su estudio se propuso una membrana capaz de lograr un bloqueo unidireccional del agua, inhibiendo el ascenso capilar y controlando la infiltración descendente. El análisis del mecanismo de migración vertical del agua se realizó desde la perspectiva del potencial de fluido. Los resultados indicaron que, con consumos de silano orgánico entre 0 y 4 g/m², la membrana no inhibe el ascenso capilar; mientras que con 6 g/m² se reduce la altura capilar a 20 cm. A partir de 10 g/m², se logra inhibir tanto el ascenso capilar como la infiltración descendente, recomendándose esta dosificación como óptima para subrasantes.



Hou et al. (2022) realizaron un estudio a escala molecular sobre la relación entre la estructura y la eficiencia de agentes impermeabilizantes a base de silano. Mediante simulaciones moleculares, analizaron el comportamiento inhibitorio de tres alcoxisilanos (APTES, ETES y MPS) frente al transporte de agua e iones agresivos a través de nanoporo de hidratos de silicato de calcio (CSH). Los resultados mostraron que los silanos generan un efecto barrero que reduce la densidad y movilidad del agua y los iones, siendo el orden de eficiencia $APTES < ETES < MPS$. El MPS presentó el mayor efecto inhibitorio debido a su mayor contenido de grupos hidrofóbicos. Este estudio aporta información relevante para el diseño molecular de agentes impermeabilizantes basados en silano.

Liu (2023) desarrolló una investigación orientada a mejorar el rendimiento impermeabilizante de recubrimientos de cemento mediante la preparación de látex híbridos de nitrato de boro hexagonal hidroxilado e isobutiltrietoxisilano. El estudio, de enfoque cuantitativo, evaluó diferentes condiciones de hidroxilación del h-BN, determinándose como óptimas aquellas realizadas a 140 °C durante 18 h con 8 mol/L de NaOH. El h-BN modificado mostró una adecuada dispersión en el silano, permitiendo el relleno de defectos en la matriz cementicia. Los resultados evidenciaron una reducción del coeficiente de absorción de agua y de la energía superficial media, mejorando el comportamiento impermeable del cemento.

Cevallos y Patricio (2020), en su tesis doctoral sobre la relación entre diferentes dimensiones de cilindros y la estimación de la velocidad de infiltración en suelos de la cuenca media del río Mosquito, analizaron la influencia del diámetro de los cilindros del infiltrómetro de doble anillo. Se realizaron 45 ensayos de infiltración en distintos tipos de suelo, empleando cilindros de diferentes tamaños. Los resultados obtenidos mediante la ecuación de Kostiakov-Lewis mostraron velocidades de infiltración promedio que variaron según el tipo de suelo, siendo mayores en suelos francos y franco arenosos. El análisis estadístico indicó que el diámetro del cilindro no tiene un efecto significativo en la estimación de la velocidad de infiltración ($\alpha = 0.05$), aunque sí existen diferencias significativas entre los tipos de suelo evaluados.



3.1.2 Antecedentes nacionales

Quispe (2023), en su tesis titulada: Evaluación de la infiltración en dos sistemas de uso de suelo en el sector Vista Alegre, SUPTE, desarrolló un estudio de enfoque cuantitativo orientado al análisis de la infiltración del agua en suelos bajo diferentes coberturas. Para ello, empleó los modelos de infiltración de Horton, Kostiakov y Green-Ampt, utilizando un infiltómetro de doble cilindro para la recolección de datos. Los resultados del modelo de Horton mostraron que el bosque natural presentó una tasa de decaimiento (k) de 0.026 min^{-1} y una altura máxima de infiltración (h_e) de 8.50 cm, mientras que el cultivo de coco alcanzó un valor de k de 0.031 min^{-1} y un h_e de 6.20 cm. El modelo de Horton fue el que presentó el mejor ajuste debido a su comportamiento asintótico. Asimismo, se identificó una correlación negativa de -0.615 entre la precipitación acumulada diaria y la tasa de infiltración, lo que sugiere un mayor riesgo de escorrentía e inundación ante precipitaciones intensas. A pesar de presentar composiciones granulométricas y densidades aparentes similares (1.87 g/cm^3 en el cultivo de coco y 1.86 g/cm^3 en el bosque natural), la tasa media de infiltración fue significativamente mayor en el bosque natural (4.02 cm/h) en comparación con el cultivo de coco (2.99 cm/h), con un p-valor de 0.024. En conclusión, el bosque natural presentó mejores características de infiltración, destacando la influencia del uso del suelo en el comportamiento hidráulico.

Fuentes (2021), en su tesis: Análisis comparativo del mejoramiento de la subrasante e impermeabilización mediante el uso del aditivo iónico PROES y la cal viva en zonas urbanas no pavimentadas de la Ensenada VIII del distrito de Pimentel, desarrolló un estudio de enfoque cuantitativo con el objetivo de evaluar la mejora en la capacidad de soporte (CBR), permeabilidad y consistencia del suelo. Inicialmente, el suelo natural presentó un CBR de 4.20 %, baja permeabilidad y consistencia blanda. Los resultados evidenciaron mejoras significativas al aplicar los tratamientos, logrando una subrasante de calidad excelente, impermeable y de consistencia firme. Se comprobó que el uso exclusivo del aditivo PROES no incrementó sustancialmente el CBR respecto al suelo natural. Asimismo, al aplicar 70.00 kg/m^3 de cemento Portland tipo MS, la curva esfuerzo-deformación presentó una pérdida momentánea de capacidad portante, condición que no sería admisible en obra. Finalmente, el suelo clasificado como arcilla de baja plasticidad (CL) se volvió prácticamente impermeable y presentó una consistencia firme frente a cargas axiales.



Gálvez y Valderrama (2022), en su tesis: Análisis comparativo del uso de membranas asfálticas y líquidas para la impermeabilización de coberturas, Trujillo, realizaron un estudio de tipo cualitativo basado en análisis documental, cuyo objetivo fue comparar la eficiencia de diferentes sistemas impermeabilizantes. Los resultados mostraron que las membranas asfálticas presentan un mejor comportamiento en cubiertas transitables, mientras que las membranas líquidas ofrecen mayor desempeño en superficies expuestas a radiación ultravioleta, demostrando la importancia de seleccionar el sistema impermeabilizante según las condiciones de uso y exposición.

Rafael (2022), en su tesis: Diseño y reforzamiento estructural del reservorio 11.00 empleando geomembrana como impermeabilizante de agua en el sector Río Santa, distrito de Los Olivos, Lima, tuvo como objetivo diseñar y reforzar un reservorio de agua potable para garantizar el abastecimiento continuo a la población. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado, con diseño experimental y alcance explicativo preexperimental. Los resultados concluyeron que la implementación de geomembranas como sistema impermeabilizante es fundamental para evitar pérdidas por filtración. Asimismo, se destacó la necesidad de considerar cargas sísmicas y realizar análisis estructurales mediante métodos computacionales, cumpliendo con la normativa E.030, especialmente por tratarse de una zona de alta sismicidad.

Viza (2022), en su tesis: Propuesta de diseño de un reservorio de tierra apoyado revestido con geomembrana en Querapi, región Moquegua, tuvo como objetivo proponer el diseño de un reservorio con capacidad de 10,000.00 m³ para riego agrícola. La metodología empleada fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicado y diseño no experimental. Los resultados del estudio topográfico indicaron que se deben conservar las cotas de la base del fondo del reservorio debido a la existencia de tuberías de conducción y aducción. Se determinó que el suelo de la corona y taludes es arenoso, por lo que se recomendó una mezcla de arena y agregado grueso para la construcción de los terraplenes. El análisis de estabilidad del talud arrojó un factor de seguridad de 5.00, evidenciando estabilidad estructural. Asimismo, se concluyó que el uso de aditivos impermeabilizantes y cristalinos reduce significativamente la penetración del agua bajo presión, presentando mejores resultados que el concreto estándar, lo que resalta la importancia de evaluar tecnologías impermeabilizantes en la construcción de reservorios.



No se identificaron antecedentes locales que aborden la aplicación de silano hidrolizado como agente impermeabilizante en reservorios de almacenamiento de agua en suelo natural, particularmente en zonas altoandinas, lo que evidencia un vacío de investigación a nivel local y refuerza la pertinencia del presente estudio.

3.2 Marco teórico

3.2.1 Bases teóricas de la variable independiente: Silano hidrolizado (SiOH)

- **Silano hidrolizado (SiOH)**

El silano hidrolizado (SiOH) es un compuesto químico ampliamente utilizado en la industria de la construcción debido a sus propiedades hidrofóbicas. Al aplicarse sobre superficies porosas, como el concreto, ladrillo o suelos naturales, este compuesto penetra en la matriz del material y forma una capa protectora que reduce significativamente la permeabilidad al agua, contribuyendo a mejorar la durabilidad del material tratado.

El silano está compuesto por moléculas que, al entrar en contacto con el agua, se hidrolizan, formando grupos silanol (SiOH). Estos grupos reaccionan químicamente con los materiales porosos, generando enlaces estables que confieren propiedades hidrofóbicas a la superficie, incrementando su resistencia frente a la acción del agua y la humedad, (Smith, 2018).

- **Estabilizador de suelos**

Un estabilizador de suelos es un producto químico, natural o sintético, que mejora una o más propiedades del suelo mediante su acción directa o en combinación con este. Existe una amplia variedad de estabilizantes químicos, entre los que se incluyen sales, productos enzimáticos, polímeros y subproductos del petróleo.

El tipo de suelo tratado, las características específicas del estabilizador químico y las condiciones de aplicación determinan las propiedades del suelo que se ven modificadas. Asimismo, el etiquetado y la documentación técnica de los estabilizantes deben cumplir con los requisitos normativos correspondientes para garantizar su correcta aplicación y desempeño, (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2004).



- **Terrasil (silano hidrolizado (SiOH))**

Terrasil, producido por Zydex Industries (Gujarat, India), es un estabilizador químico a base de silano hidrolizado, cuyos componentes incluyen hidroxialquil–alcoxi–alquilsililo (65.00–70.00%), alcohol bencílico (25.00–27.00%) y etilenglicol (3.00–5.00%). Se trata de un modificador de suelo reactivo y estable, compuesto al 100.00% por organosilanos, soluble en agua y diseñado para impermeabilizar la subrasante del suelo.

Terrasil reacciona con los grupos silanol presentes en el suelo, absorbiendo el agua contenida en partículas de arena, limo y residuos, transformándola en enlaces de alquilsiloxano altamente estables y repelentes al agua. Este proceso da lugar a la formación de una capa impermeable pero respirable in situ.

El proceso de retención se inicia aproximadamente tres horas después de la aplicación y se completa en un periodo de hasta 72.00 horas. Durante este tiempo, el silano hidrolizado se integra de forma permanente a cada partícula del suelo, sin separarse ni lixiviar hacia las aguas subterráneas, (Lekha et al., 2011).

De acuerdo con la convención técnica de Zydex Industries (Vadodara), la dosis recomendada de silano hidrolizado (SiOH) es de 0.041% respecto al peso del agregado seco utilizado en la prueba de suelo.

Las estructuras del suelo en condiciones tratadas y no tratadas se muestran en la Figura 1, donde se evidencian los cambios microestructurales producidos por la aplicación del silano hidrolizado.



FUENTE: Química calderón, 2011

Figura 1 — Modo de acción del silano hidrolizado (SiOH)

Silano hidrolizado (SiOH) es un compuesto químico basado en nanotecnología que ha surgido como un material alternativo para la modificación e impermeabilización de suelos. Se trata de un modificador de suelo compuesto al 100 % por organosilanos, soluble en agua y estable frente a la radiación ultravioleta y al calor, diseñado para mejorar la impermeabilidad de la subrasante del suelo.

El silano hidrolizado actúa formando acumulaciones de grupos silanol (Si–OH), los cuales reaccionan con las superficies minerales de arenas, limos, arcillas y agregados, transformándose en enlaces de alquilsiloxano altamente hidrófobos. Este proceso da lugar a la formación de una capa impermeable in situ, pero transpirable, que reduce significativamente la infiltración de agua sin impedir el intercambio gaseoso del suelo.

Asimismo, el uso de silano hidrolizado permite abordar problemas básicos del subsuelo, ya que posibilita la utilización de suelos in situ, minimizando la necesidad de transportar materiales de mejor calidad desde largas distancias, lo que contribuye a la reducción del consumo de combustible y de los costos asociados.

El silano hidrolizado (SiOH) utilizado en el presente estudio fue adquirido a la empresa Zydex Industries Pvt. Ltd. La tabla 1 presenta la composición química típica del silano hidrolizado, de acuerdo con lo reportado por diversos autores.

Tabla 2 — Composición del silano hidrolizado (SiOH)

Compuesto químico	Valor en rango, %
Silano alcoxi	40.00 – 60.00
Disolvente (como etanol o isopropanol)	30.00 – 50.00
Agua	5.00 – 10.00
Aditivos y catalizadores	<5.00

FUENTE: Smith, A. (2018)



- **Ventajas del uso del silano hidrolizado (SiOH)**

- a) **Durabilidad**

- A diferencia de otros métodos de impermeabilización superficial, el silano hidrolizado penetra profundamente en el material tratado, proporcionando una protección de mayor duración frente a la acción del agua, (Jones & Lee, 2019).

- b) **Costo-efectividad**

- Aunque la inversión inicial puede ser superior, la reducción de los costos de mantenimiento y reparación a largo plazo convierte al silano hidrolizado en una alternativa económicamente viable, (Williams, 2020).

- c) **Compatibilidad ambiental**

- En comparación con materiales sintéticos convencionales, el silano hidrolizado presenta un menor impacto ambiental, ya que no requiere procesos de extracción intensiva ni genera residuos no biodegradables, (Brown, 2017).

- **Estudios de caso y resultados**

- **Reservorios agrícolas:**

- Un estudio realizado en reservorios agrícolas en España evidenció una reducción aproximada del 30.00 % en la pérdida de agua por filtración tras la aplicación de silano hidrolizado, (González et al., 2021).

- **Infraestructura urbana:**

- En aplicaciones urbanas, el uso de silano hidrolizado en puentes y túneles ha permitido disminuir significativamente los daños ocasionados por la humedad, prolongando la vida útil de estas estructuras, (Nguyen & Tran, 2020).

- **Factores que afectan la eficiencia del silano hidrolizado (SiOH)**

- La eficacia del silano hidrolizado como agente impermeabilizante depende de diversos factores:



a) Concentración del silano

Concentraciones más elevadas suelen proporcionar una mayor protección y durabilidad, aunque implican un incremento en los costos, (Lee & Kim, 2018).

b) Condiciones ambientales

La temperatura, la humedad y la exposición a agentes químicos influyen en el desempeño del tratamiento impermeabilizante, (Miller, 2019).

c) Preparación del sustrato

Una adecuada preparación del sustrato antes de la aplicación es fundamental para garantizar una correcta adherencia y maximizar la efectividad del tratamiento, (García & Rodríguez, 2021).

El silano hidrolizado se mezcla fácilmente con agua y puede aplicarse mediante un rociador de baja presión, sin requerir equipos especiales ni procedimientos complejos de limpieza. Una vez aplicado, se integra de forma permanente al suelo o agregado tratado, proporcionando una repelencia duradera al agua.

A diferencia de las tecnologías basadas en polímeros convencionales, que actúan como recubrimientos superficiales susceptibles a la degradación por radiación ultravioleta, el silano hidrolizado presenta alta resistencia a los rayos UV, manteniendo su estabilidad durante largos periodos y reduciendo significativamente los costos de mantenimiento.

Entre sus principales beneficios adicionales se incluyen la reducción del agrietamiento superficial causado por la expansión y contracción del suelo, la mejora de la compactación, el incremento de la durabilidad de suelos y agregados de baja calidad, y la formación de una barrera permanente contra el agua. Por estas razones, el silano hidrolizado resulta especialmente útil en la construcción de reservorios, diques y presas, así como en el control de la erosión, estabilización de laderas, caminos no pavimentados y excavaciones.



3.2.2 Bases teóricas de la variable dependiente impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural

- **Impermeabilización**

La impermeabilización es un proceso cuyo objetivo es prevenir la filtración o el paso del agua y otros líquidos a través de una superficie determinada, mediante la aplicación de materiales o tratamientos que reduzcan o eliminen la permeabilidad del medio, (Powers & Whitney, 1950). Este procedimiento puede implicar el uso de productos químicos, recubrimientos, membranas y otros sistemas diseñados para bloquear o repeler el ingreso de agua.

En el caso de reservorios de almacenamiento de agua construidos en suelo natural, la impermeabilización constituye un aspecto fundamental, ya que permite minimizar las pérdidas por infiltración y asegurar la eficiencia hidráulica de la estructura.

- **Importancia de la impermeabilización**

La impermeabilización resulta esencial por diversas razones, entre las cuales destacan:

- a) **Protección estructural**

Evita que el agua cause deterioro en los materiales constitutivos de la estructura, previniendo fenómenos como la corrosión del acero, la degradación del concreto y la proliferación de microorganismos.

- b) **Durabilidad**

Contribuye a prolongar la vida útil de las estructuras al reducir los efectos negativos de la humedad y de otros agentes ambientales.

- c) **Eficiencia funcional**

En reservorios de tierra, la impermeabilización permite conservar el volumen de agua almacenada, mejorando la eficiencia en la gestión de los recursos hídricos y garantizando la disponibilidad del agua para usos agrícolas o poblacionales.

- **Principios fundamentales de la impermeabilización**

Los principios que rigen los sistemas de impermeabilización se basan en los siguientes mecanismos:



a) Repelencia al agua

Consiste en la aplicación de materiales o tratamientos que reducen la afinidad del sustrato con el agua, impidiendo su penetración.

b) Barreras físicas

Se refiere al empleo de recubrimientos o láminas impermeables que actúan como un obstáculo físico frente al paso del agua.

c) Reacciones químicas

Involucra la aplicación de productos químicos que reaccionan con el sustrato, modificando su estructura interna y formando barreras impermeables de carácter permanente.

• **Métodos de impermeabilización**

Existen diversos métodos de impermeabilización, cuya selección depende del tipo de estructura, las condiciones del suelo y el entorno ambiental. Entre los más utilizados se encuentran:

a) Membranas asfálticas

Comúnmente empleadas en cubiertas y estructuras subterráneas, estas láminas ofrecen una protección eficaz contra la humedad, (Medeiros & Helene, 2009).

b) Recubrimientos cementosos

Son materiales a base de cemento que se aplican sobre superficies de concreto, formando una capa impermeable que protege contra la penetración de agua.

c) Membranas líquidas

Se aplican en estado líquido y, tras su curado, forman una barrera continua e impermeable sobre la superficie tratada, (Medeiros & Helene, 2009).

d) Impermeabilización con silanos y siloxanos

Estos compuestos químicos penetran en los poros del sustrato y generan una superficie hidrofóbica que repele el agua, siendo especialmente eficaces en suelos y materiales porosos, (González et al., 2021).



- **Impermeabilización de reservorios**

La impermeabilización de reservorios de almacenamiento de agua es un proceso fundamental para prevenir pérdidas por filtración y garantizar la estabilidad estructural de la obra. Desde el punto de vista teórico, este proceso se sustenta en los siguientes aspectos:

a) Selección de materiales

La selección de los materiales impermeabilizantes debe considerar criterios como durabilidad, resistencia química, flexibilidad y capacidad de sellado. Entre los materiales más utilizados se encuentran las geomembranas de HDPE, LDPE y PVC, así como morteros cementicios impermeabilizantes (Universidad de El Salvador, s/f; Sika, 2023).

b) Diseño estructural

El diseño del reservorio debe contemplar la geometría del vaso, la capacidad portante del suelo, las condiciones hidrológicas y las características topográficas del sitio, con el fin de asegurar una impermeabilización efectiva y de larga duración, (López et al., 2021; Universidad de El Salvador, s/f).

c) Aplicación de técnicas de impermeabilización

Las técnicas de impermeabilización pueden incluir el uso de aditivos para suelos, como el silano hidrolizado (SiOH), que reduce la absorción de agua mediante la generación de superficies hidrofóbicas, así como la colocación de geomembranas con sistemas de soldadura adecuados que garanticen la continuidad de la barrera impermeable, (López et al., 2021; Sika, 2023; Optimasoil, s/f).

e) Control de calidad

El control de calidad debe realizarse durante todas las etapas del proceso, desde la selección de materiales hasta la ejecución en obra, a fin de asegurar la efectividad y durabilidad del sistema de impermeabilización implementado, (Ignacio, 2018).



- **Dimensiones de la impermeabilización**

- **Reducción del índice de plasticidad**

Esta dimensión se sustenta en investigaciones realizadas por Molina (2019) y Brioso (2021), relacionadas con el uso del aditivo silano hidrolizado (SiOH) mezclado con materiales de cantera. El índice de plasticidad (IP) se define como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) del suelo, y constituye un parámetro fundamental para la clasificación de suelos según los sistemas SUCS y AASHTO.

El IP permite identificar suelos con comportamiento plástico elevado, los cuales suelen presentar mayor susceptibilidad a la deformación y a la infiltración de agua. Cuando el límite plástico es mayor o igual al límite líquido, o cuando estos no pueden ser determinados, el suelo se clasifica como no plástico (NP), (Brioso, 2021).

- **Mejora de la resistencia del afirmado**

Esta dimensión también se basa en los estudios desarrollados por Molina (2019) y Brioso (2021), quienes evaluaron el efecto del silano hidrolizado (SiOH) en la mejora de las propiedades mecánicas de materiales de afirmado. La resistencia del suelo se evalúa mediante el ensayo CBR (California Bearing Ratio), el cual mide la capacidad portante del suelo a través de la resistencia al punzonamiento de una probeta, comparando los valores obtenidos con un valor patrón previamente establecido. Un incremento del CBR indica una mejora en la capacidad estructural del suelo, lo cual contribuye indirectamente a la impermeabilización al reducir la deformación y la generación de fisuras.

Tabla 3 — Requisitos para el afirmado según normativa vigente

Desgaste Los Ángeles	≤ 50.00%	MTC E 207
Límite líquido	≤ 35.00%	MTC E 110
Índice de plasticidad	4.00-9.00%	MTC E 111
CBR (1)	≥ 40.00%	MTC E 132

FUENTE: Brioso, (2021, p. 19)



- **Reducción del porcentaje de expansión**

Esta dimensión se sustenta en las investigaciones científicas realizadas por Molina (2019) y Brioso (2021), quienes evaluaron el comportamiento de suelos y materiales de cantera estabilizados mediante la adición de silano hidrolizado (SiOH).

El porcentaje de expansión es un parámetro que permite evaluar la susceptibilidad del suelo a experimentar incrementos volumétricos como consecuencia de la absorción de agua. Este comportamiento resulta crítico en estructuras de almacenamiento de agua, ya que la expansión excesiva del suelo puede generar fisuras, pérdida de estabilidad y aumento de la permeabilidad.

El porcentaje de expansión se calcula a partir de la diferencia entre la lectura final y la lectura inicial, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Expansion} = \frac{L2 - L1}{127} \times 100$$

Donde:

- L1=Lectura inicial (mm)
- L2=Lectura final (mm)

La reducción del porcentaje de expansión mediante la incorporación de silano hidrolizado (SiOH) contribuye a mejorar la estabilidad volumétrica del suelo, disminuyendo la formación de grietas y favoreciendo el desempeño del sistema de impermeabilización del reservorio.

- **Impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural**

La impermeabilización del fondo y los taludes de un reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural constituye un proceso fundamental para prevenir las pérdidas por infiltración y garantizar la eficiencia hidráulica del sistema. Una impermeabilización adecuada permite mantener el volumen de agua almacenada y protege la estructura frente a los efectos adversos de la humedad.



- **Impermeabilización del fondo**

La impermeabilización del fondo del reservorio es esencial para reducir la filtración hacia el subsuelo y asegurar la eficiencia del almacenamiento. En estructuras hidráulicas como presas de enrocado con cara de concreto (CFRD) y presas de concreto compactado con rodillo (CCR), la impermeabilización se realiza comúnmente mediante losas de concreto armado, las cuales actúan como una barrera impermeable efectiva (Pérez Zerceda, 2018). Asimismo, diversos estudios destacan la importancia de la impermeabilización del fondo para evitar pérdidas significativas de agua en reservorios excavados en suelo natural, (Gornitzky, 2011).

- **Impermeabilización del talud**

La impermeabilización de los taludes del reservorio cumple un rol clave en la prevención de la erosión superficial y la pérdida de agua por infiltración. Un adecuado tratamiento impermeabilizante en los taludes contribuye a la estabilidad del talud y a la durabilidad de la estructura hidráulica (Pérez Zerceda, 2018). Este proceso puede realizarse mediante la aplicación de geomembranas, geotextiles u otros sistemas impermeables, seleccionados de acuerdo con las condiciones del suelo y el diseño del reservorio, (Gornitzky, 2011).

- **Materiales utilizados para la impermeabilización**

Entre los materiales más empleados para la impermeabilización del fondo y taludes de reservorios se encuentran las geomembranas, los geotextiles y el concreto compactado con rodillo. Las geomembranas, en particular, son ampliamente utilizadas debido a su alta resistencia hidráulica, durabilidad y facilidad de instalación, lo que las convierte en una solución eficiente para la impermeabilización de reservorios de almacenamiento de agua, (Pérez Zerceda, 2018; Gornitzky, 2011).

- **Beneficios de la impermeabilización**

La impermeabilización del fondo y los taludes del reservorio mejora significativamente la eficiencia del sistema de almacenamiento de agua, reduce las pérdidas por filtración y previene procesos erosivos. Adicionalmente, contribuye a mejorar la calidad del agua almacenada, al disminuir la



contaminación proveniente del subsuelo y reducir la formación de sedimentos, (Pérez Zerceda, 2018; Gornitzky, 2011).

Este proceso resulta especialmente relevante en reservorios de agua, ya que permite conservar el volumen almacenado y garantiza la durabilidad y funcionalidad de la estructura. La selección del método y material impermeabilizante dependerá de las características del suelo, las condiciones del sitio y los requerimientos específicos del proyecto, (Acosta Montedoro, 2024).

3.2.3 Dimensiones de la variable dependiente: Impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural

Las dimensiones de la variable dependiente impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural son siguientes: (a) permeabilidad y (b) características físicas del suelo.

- **Dimensión 1. Permeabilidad**

En esta dimensión se analiza la capacidad del silano hidrolizado (SiOH) para reducir la filtración de agua en el fondo y los taludes de un reservorio de almacenamiento de agua construido en suelo natural, ubicado en el distrito de Haqaira. La permeabilidad del suelo constituye un parámetro fundamental para evaluar la eficiencia del sistema de impermeabilización, ya que controla el flujo de agua a través del medio poroso.

- a) Permeabilidad del suelo**

La permeabilidad del suelo se define como la capacidad que posee un material para permitir el paso del agua a través de su estructura porosa bajo la acción de un gradiente hidráulico. Esta propiedad se cuantifica generalmente en función de la velocidad de flujo del agua a través del suelo durante un intervalo de tiempo determinado.

La permeabilidad puede expresarse como una tasa de infiltración en unidades de centímetros por hora (cm/h), milímetros por hora (mm/h) o centímetros por día (cm/d), o bien mediante el coeficiente de permeabilidad (k), el cual se expresa comúnmente en metros por segundo (m/s) o centímetros por segundo (cm/s).



b) Movimiento del fluido en el suelo

El movimiento del agua en el suelo se produce a través de una red de poros interconectados, los cuales son generalmente estrechos, irregulares y de geometría compleja. Debido a esta complejidad, el análisis del flujo a través de cada poro individual resulta impracticable.

En los problemas de ingeniería geotécnica, el interés se centra en el flujo global del agua a través de un volumen representativo de suelo, el cual debe ser lo suficientemente grande para reflejar el comportamiento hidráulico de la masa de suelo en su conjunto. Este enfoque permite analizar fenómenos como la filtración, la infiltración y la permeabilidad de manera práctica y representativa, (Angelone, Garibay & Casaux, 2006).

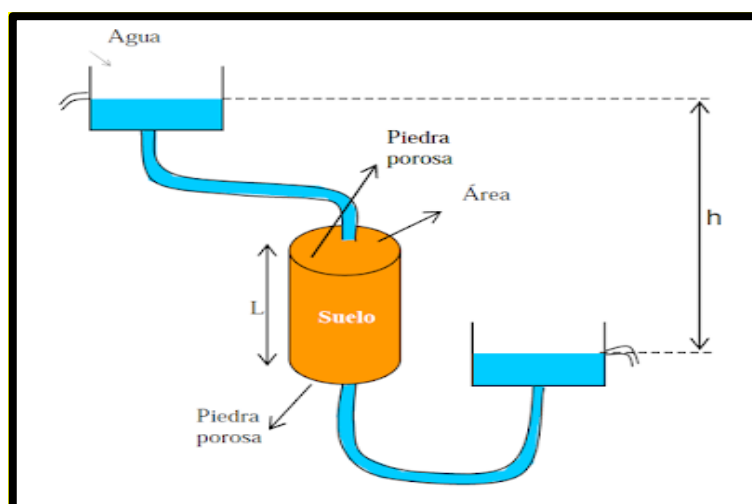
c) Ensayo de permeabilidad con permeámetro de carga constante

El ensayo de permeabilidad con permeámetro de carga constante se utiliza principalmente en suelos gruesos, como gravas y arenas, que presentan coeficientes de permeabilidad relativamente altos, generalmente comprendidos entre 10^{-2} y 10^{-3} cm/s.

En este ensayo, el suministro de agua se regula de tal manera que la diferencia de carga hidráulica entre la entrada y la salida de la muestra se mantiene constante durante todo el período de prueba. Una vez alcanzado un régimen de flujo estable, el volumen de agua que atraviesa la muestra se recolecta en una probeta graduada durante un intervalo de tiempo conocido, lo que permite determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo.

Este tipo de ensayo resulta adecuado para evaluar la efectividad del silano hidrolizado (SiOH) en la reducción de la permeabilidad del suelo, ya que permite comparar el comportamiento hidráulico del material antes y después del tratamiento impermeabilizante.





FUENTE: Librería del ingeniero 2024

Figura 2 — Permeámetro de carga constante

d) Ley de Darcy

El flujo de agua a través de medios porosos está regido por la Ley de Darcy, formulada experimentalmente por Henry Darcy en 1856, a partir de sus investigaciones sobre el comportamiento del flujo de agua a través de filtros de material térreo. Esta ley constituye uno de los principios fundamentales de la mecánica de suelos y la hidráulica subterránea.

Darcy demostró que, para velocidades de flujo suficientemente pequeñas y bajo condiciones de flujo laminar, el caudal de agua (Q) que atraviesa un medio poroso es directamente proporcional al área transversal del flujo y a la diferencia de carga hidráulica, e inversamente proporcional a la longitud del recorrido del flujo. Matemáticamente, la Ley de Darcy se expresa de la siguiente manera:

$$Q = K \times i \times A$$

Donde:

- Q = Caudal de flujo (m^3/s)
- A = Área transversal perpendicular del suelo (m^2)
- K = Coeficiente de permeabilidad del suelo (m/s)
- i = Gradiente hidráulico (adimensional)

El gradiente hidráulico (i) se define como la relación entre la pérdida de carga hidráulica y la longitud del recorrido del flujo, es decir:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

La Ley de Darcy es aplicable principalmente a suelos granulares, como arenas y gravas, donde el flujo se mantiene en régimen laminar. En suelos finos o altamente compactados, así como en materiales tratados con aditivos impermeabilizantes como el silano hidrolizado (SiOH), el coeficiente de permeabilidad disminuye significativamente, reduciendo el caudal de flujo a través del suelo.

En el contexto de la impermeabilización del fondo y los taludes de reservorios de almacenamiento de agua en suelo natural, la Ley de Darcy permite evaluar cuantitativamente la efectividad del tratamiento impermeabilizante, al comparar los valores del coeficiente de permeabilidad antes y después de la aplicación del silano hidrolizado.

e) **Determinación de la permeabilidad del suelo**

La permeabilidad del suelo se determina mediante ensayos de laboratorio que permiten evaluar el coeficiente de permeabilidad en función del tipo de suelo. Los métodos más empleados son los siguientes:

- **Permeámetro de carga constante (ASTM D2434)**, utilizado para suelos granulares como arenas y gravas, que presentan coeficientes de permeabilidad elevados.
- **Permeámetro de carga variable (ASTM D5084)**, aplicado a suelos finos como limos y arcillas, caracterizados por una baja permeabilidad.

Estos ensayos permiten cuantificar la capacidad del suelo para transmitir agua y evaluar la efectividad de tratamientos impermeabilizantes, como el uso de silano hidrolizado (SiOH).



Tabla 4 — Clases de permeabilidad de los suelos para obras de ingeniería

Clases de permeabilidad del suelo	Coeficiente de permeabilidad, K (m/s)	
	Límite inferior	Límite superior
Permeable	2.00×10^{-7}	2.00×10^{-1}
Semipermeable	1.00×10^{-11}	1.00×10^{-5}
Impermeable	1.00×10^{-11}	5.00×10^{-7}

FUENTE: ASTM D2434

f) Infiltrómetro de doble anillo

El método del infiltrómetro de doble anillo consiste en hincar dos cilindros concéntricos abiertos, uno dentro del otro, en la superficie del suelo. Posteriormente, ambos anillos se llenan parcialmente con agua u otro líquido, manteniendo el nivel del fluido constante durante el ensayo.

El volumen de agua agregado al anillo interno, necesario para mantener constante el nivel del líquido, representa el volumen de agua que infiltra el suelo. Los volúmenes infiltrados registrados en intervalos de tiempo previamente establecidos se convierten en una velocidad de infiltración incremental, la cual generalmente se expresa en centímetros por hora (cm/h) o milímetros por hora (mm/h) y se representa en función del tiempo transcurrido.

La velocidad de infiltración en estado estacionario o la velocidad de infiltración promedio, según el objetivo del ensayo, se considera equivalente a la tasa de infiltración del suelo. Este procedimiento se encuentra normalizado en la ASTM D3385.

g) Tasa de infiltración (f)

La tasa de infiltración es la velocidad a la cual el agua penetra en el suelo desde la superficie, bajo una carga hidráulica natural o aplicada. Se expresa en unidades de longitud por tiempo, tales como cm/h o mm/h, y depende de factores como las características físicas del suelo, el contenido inicial de humedad, la cobertura superficial y el grado de compactación.



Desde el punto de vista matemático, la tasa instantánea de infiltración se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$f = \Delta V / A \cdot \Delta t$$

Donde:

- f = Tasa de infiltración (cm/h)
- ΔV = Volumen de agua infiltrado en el intervalo de tiempo (cm³)
- A = Área superficial de infiltración (cm²)
- Δt = Intervalo de tiempo considerado (h)

Tabla 5 — Tasas de infiltración de los suelos para obras de ingeniería civil

Clase de suelo	Tasa de infiltración (cm/h)	Descripción
Muy baja	< 0.13	Suelos muy impermeables (arcillas duras, compactadas).
Baja	0.13 – 0.50	Arcillas y limos de baja permeabilidad.
Moderada	0.50 – 2.00	Suelos franco-arcillosos o limosos con cierta permeabilidad.
Alta	2.00 – 5.00	Arenas finas, suelos granulares con buena infiltración.
Muy alta	> 5.00	Arenas gruesas, gravas limpias, extremadamente permeables.

FUENTE: ASTM D3385

• **Dimensión 2. Compactación natural del suelo**

a) **Compactación del suelo**

La compactación del suelo es el proceso mediante el cual se reduce el volumen de vacíos mediante la aplicación de energía mecánica, con el objetivo de mejorar la resistencia, estabilidad y durabilidad del suelo. Un suelo adecuadamente compactado presenta menor deformabilidad, mayor capacidad portante y menor permeabilidad, aspectos fundamentales para el desempeño del fondo y los taludes de un reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural.



La compactación del suelo se relaciona directamente con la densidad de campo, la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo, parámetros que permiten evaluar la calidad del proceso de compactación.

b) Densidad de campo

La densidad seca (γ_d) es el peso del suelo sin agua por unidad de volumen.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

Donde:

- W_s = Peso seco del suelo
- V = Volumen total del suelo

c) Densidad seca máxima y humedad óptima

La densidad seca máxima (γ_{dmax}) corresponde al mayor valor de densidad seca que puede alcanzar un suelo bajo una energía de compactación determinada. La humedad óptima (W_{opt}) es el contenido de agua en el cual se obtiene dicha densidad máxima.

Estos parámetros se determinan mediante el ensayo Proctor, ya sea en su modalidad estándar o modificada, de acuerdo con las normas ASTM D698 y ASTM D1557, respectivamente. La correcta identificación de estos valores permite establecer las condiciones óptimas de compactación del suelo empleado en el fondo y taludes del reservorio.

• Dimensión 3. Características físicas del suelo

Las características físicas del suelo son fundamentales para comprender su comportamiento frente a diferentes condiciones de carga, humedad y compactación. Estas propiedades influyen directamente en la permeabilidad, estabilidad y respuesta del suelo frente a tratamientos impermeabilizantes, como la aplicación de silano hidrolizado (SiOH), especialmente en reservorios de tierra.



a) Granulometría

La granulometría corresponde a la distribución del tamaño de las partículas que conforman el suelo y permite clasificarlo según sus fracciones constituyentes. De acuerdo con el tamaño de partícula, los suelos se clasifican en:

- Grava: partículas mayores a 4.75 mm
- Arena: partículas entre 0.075 y 4.75 mm
- Limo: partículas entre 0.002 y 0.075 mm
- Arcilla: partículas menores a 0.002 mm

La determinación granulométrica se realiza mediante los siguientes métodos:

- Ensayo de tamizado, aplicado a suelos gruesos (ASTM D6913)
- Ensayo de hidrómetro, aplicado a suelos finos (ASTM D7928)

Los resultados se representan mediante la curva granulométrica, la cual muestra gráficamente la distribución de tamaños de las partículas del suelo.

b) Contenido de humedad (w)

El contenido de humedad es la relación entre la cantidad de agua presente en el suelo y su peso seco, expresado en porcentaje. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Donde:

- W_w = Peso del agua.
- W_s = Peso seco del suelo

La determinación del contenido de humedad se realiza en laboratorio mediante el secado de la muestra a una temperatura de 105.00 °C hasta alcanzar peso constante, conforme a la norma **ASTM D2216**.

c) Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son parámetros que definen el comportamiento de los suelos finos en función de su contenido de humedad y permiten evaluar su plasticidad. Estos límites son:

- **Límite líquido (LL):** contenido de humedad a partir del cual el suelo pasa del estado plástico al estado líquido.
- **Límite plástico (LP):** contenido de humedad mínimo en el que el suelo puede ser moldeado sin agrietarse.
- **Índice de plasticidad (IP):** diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, calculado como:

$$IP = LL - LP$$

La determinación de los límites de Atterberg se realiza conforme a la norma ASTM D4318.

3.3 Marco conceptual

3.3.1 Hidrofobicidad. – La hidrofobicidad es la propiedad de un material que le permite repeler el agua. En el ámbito de la impermeabilización, los materiales hidrofóbicos son fundamentales para evitar la absorción de agua y minimizar los procesos de filtración, (Brown, 2017).

3.3.2 Impermeabilización. – La impermeabilización es el proceso de aplicar materiales o sistemas destinados a impedir la filtración de agua a través de una superficie, con el fin de mantener la cantidad necesaria de agua en el depósito, proteger la estructura frente a daños ocasionados por la humedad y garantizar la eficiencia y durabilidad del reservorio, (Acosta Montedoro, 2024).

3.3.3 Permeabilidad. – La permeabilidad es la capacidad que posee un suelo o roca para permitir el paso de un fluido a través de su estructura porosa. La estimación de su coeficiente puede obtenerse mediante ensayos realizados tanto in situ como en laboratorio, (Camacho, Alarcón, Carpio y Flores, 2020).



3.3.4 Reservorios de tierra. – Los reservorios de tierra son estructuras de almacenamiento de agua construidas principalmente con suelo compactado. Se emplean en la agricultura y en la gestión de recursos hídricos para almacenar agua durante períodos de escasez de precipitaciones, (Nguyen y Tran, 2020).

3.3.5 Silano hidrolizado. – El silano hidrolizado es un compuesto químico derivado del silano que, al someterse a un proceso de hidrólisis, genera grupos silanol (Si–OH). Estos grupos interactúan químicamente con las superficies porosas del suelo, formando una capa hidrofóbica que reduce la permeabilidad al agua, (Smith, 2018).

3.3.6 El infiltrómetro. – El infiltrómetro es un dispositivo utilizado para medir la capacidad de infiltración del agua en los suelos. Existen diversos tipos, entre los que destacan el infiltrómetro de cilindro o de inundación, que puede ser de cilindro simple, doble cilindro o portátil, (Martínez Coronado, Guerrero Márquez y López Mir, 2024).

3.3.7 Reservorio. – Un reservorio es una estructura diseñada para almacenar agua, generalmente utilizada en entornos agrícolas para riego o en zonas donde se requiere un suministro temporal de agua. Estos pueden ser excavados en el suelo o construidos con materiales como geomembranas que actúan como barrera impermeable para evitar pérdidas por infiltración. Su función principal es conservar el recurso hídrico para su uso posterior en actividades agrícolas, ganaderas o de abastecimiento humano, siendo fundamentales para una gestión eficiente del agua, especialmente en áreas con disponibilidad limitada o distribución irregular, (Fundación CEMEX, 2017; RBK Builts, 2023).

3.3.8 Fondo. – El fondo del reservorio es la superficie inferior o base que se encuentra en contacto permanente con el agua almacenada. Su estabilidad y grado de permeabilidad influyen directamente en la eficiencia hidráulica del sistema y en su capacidad de almacenamiento, (Bravo y Velásquez, 2016).

3.3.9 Talud. – El talud es la pendiente de los bordes laterales del reservorio que delimitan el cuerpo de agua. Su geometría influye en la estabilidad estructural del reservorio, así como en el control de procesos de infiltración y erosión, (Velásquez Marea y Romero, 2016).



3.3.10 Suelo natural. – Se denomina suelo natural al material terroso que se encuentra en su estado original de deposición o formación, sin haber sido modificado por actividades humanas. Sus propiedades geotécnicas dependen de factores como su origen, mineralogía, contenido de humedad y estructura interna, (Esteban y Hernández, 2021).

3.3.11 Densidad de campo. – La densidad de campo es la masa seca del suelo por unidad de volumen natural en sitio, incluyendo los vacíos y poros. Se determina mediante ensayos in situ, como el método del cono de arena o el densímetro nuclear, y se utiliza como parámetro de control de la compactación del suelo en obras civiles, (Holtz y Kovacs, 2011).



CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

Esta investigación presenta un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y nivel explicativo.

El enfoque de investigación constituye la ruta metodológica mediante la cual se desarrolla una investigación científica. El enfoque cuantitativo se basa en el uso de datos numéricos y métodos matemáticos y estadísticos, y se emplea principalmente para contrastar hipótesis o dar respuesta a preguntas de investigación de tipo exploratorio, descriptivo o explicativo, (Hernández y Mendoza, 2023).

El tipo de investigación hace referencia al modelo o finalidad del estudio. La investigación es de tipo aplicado cuando los resultados obtenidos poseen utilidad práctica, permitiendo la solución de un problema concreto o la mejora de una situación real específica, (Hernández et al., 2014; Hernández y Mendoza, 2023; Supo, 2020; Acosta Montedoro, 2023).

Respecto al nivel o alcance explicativo, este tipo de investigaciones tiene como propósito identificar y analizar las causas de los fenómenos, sucesos o problemas objeto de estudio, estableciendo relaciones de causa y efecto entre las variables analizadas, (Hernández y Mendoza, 2023).

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación fue experimental, dado que cada enfoque de investigación se desarrolla a través de diseños específicos. El diseño de investigación constituye la delineación o plan mediante el cual se ejecuta el proceso de investigación científica, (Hernández et al., 2014; Hernández y Mendoza, 2023; Supo, 2020; Acosta Montedoro, 2023).

El diseño de investigación puede definirse como un plan o estrategia orientada a la obtención de información relevante, con la finalidad de responder al planteamiento del problema. De acuerdo con su estructura, los diseños de investigación se clasifican en experimentales y no experimentales, (Hernández y Mendoza, 2023).



El diseño experimental se caracteriza por la manipulación deliberada de la variable independiente, con el propósito de analizar su efecto sobre la variable dependiente, la cual es medida para evaluar los resultados del experimento. Este tipo de diseño permite establecer relaciones de causa–efecto entre las variables estudiadas, (Hernández, Fernández y Baptista, 2014; Hernández y Mendoza, 2023; Acosta Montedoro, 2022).

En el presente estudio, se empleó un diseño experimental unifactorial, completamente al azar, considerando como único factor de estudio la dosificación de silano hidrolizado, con tres niveles de tratamiento: T0: 0.00 l/m² (muestra control), T1: 1.25 l/m² de silano hidrolizado y T2: 1.50 l/m² de silano hidrolizado cada tratamiento fue evaluado mediante cinco repeticiones independientes, tanto en el fondo como en el talud del reservorio de almacenamiento de agua, con la finalidad de garantizar la confiabilidad, consistencia y validez de los resultados obtenidos.

Las unidades experimentales estuvieron conformadas por áreas delimitadas del suelo natural correspondientes al fondo y a los taludes del reservorio, sobre las cuales se aplicó la dosificación respectiva de silano hidrolizado y se realizaron los ensayos de permeabilidad, compactación natural del suelo y características físicas, conforme a los procedimientos técnicos establecidos.

Asimismo, la investigación fue de corte transversal, entendido como el periodo temporal en el que se recolecta la información. Cuando la obtención de los datos se realiza en un solo momento o periodo específico, se considera que la investigación presenta un corte transversal, (Hernández et al., 2014; Hernández y Mendoza, 2023; Supo, 2020; Acosta Montedoro, 2023).

Este diseño experimental permitió comparar el comportamiento del suelo tratado y no tratado, así como evaluar estadísticamente la influencia de la dosificación del silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y los taludes del reservorio.

a) **Hipótesis de la investigación**

- **Hipótesis general**

Hipótesis nula (H₀):

La adición de silano hidrolizado produce un grado despreciable de impermeabilización, por lo que no influye significativamente en la



impermeabilización del fondo y los taludes del reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural del distrito de Haquira, provincia de Cotabambas.

Hipótesis alternativa (H_1):

La adición de silano hidrolizado influye significativamente en la impermeabilización del fondo y los taludes del reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural del distrito de Haquira, provincia de Cotabambas.

- **Hipótesis específicas**
- **Hipótesis específica 1 (Permeabilidad)**

Hipótesis nula (H_0):

La adición de silano hidrolizado no produce una reducción significativa de la permeabilidad del suelo natural en el fondo y taludes del reservorio.

Hipótesis alternativa (H_1):

La adición de silano hidrolizado reduce significativamente la permeabilidad del suelo natural en el fondo y taludes del reservorio.

- **Hipótesis específica 2 (Compactación)**

Hipótesis nula (H_0):

La adición de silano hidrolizado no influye significativamente en el grado de compactación natural del suelo del fondo y taludes del reservorio.

Hipótesis alternativa (H_1):

La adición de silano hidrolizado influye significativamente en el grado de compactación natural del suelo del fondo y taludes del reservorio.

- **Hipótesis específica 3 (Características físicas)**

Hipótesis nula (H_0):

La adición de silano hidrolizado no influye significativamente en las características físicas del suelo del fondo y taludes del reservorio.

Hipótesis alternativa (H_1):

La adición de silano hidrolizado influye significativamente en las características físicas del suelo del fondo y taludes del reservorio.



4.3 Descripción ética de la investigación

a) Consentimiento informado:

Se obtuvo el consentimiento informado de los participantes de la investigación, a quienes se les explicó de manera clara y comprensible los objetivos del estudio, así como los posibles beneficios y riesgos derivados de su participación.

b) Confidencialidad de los datos:

Se garantizó la confidencialidad de la información proporcionada por los participantes, asegurando que los datos personales no serían divulgados sin su consentimiento y que serían utilizados exclusivamente con fines académicos y de investigación.

c) Imparcialidad y objetividad:

La recolección y el análisis de los datos se realizaron con imparcialidad y objetividad, evitando cualquier tipo de sesgo que pudiera influir en los resultados o conclusiones de la investigación.

d) Respeto a la autonomía y dignidad de los participantes:

Se respetó la autonomía y dignidad de los participantes, garantizando su participación voluntaria y el respeto a sus opiniones, decisiones y puntos de vista durante todo el proceso de investigación.

e) Beneficencia y no maleficencia:

La investigación se desarrolló procurando generar beneficios para la administración tributaria de Panamá y para la sociedad en general, asegurando que no se causara daño alguno a los participantes ni a terceros.

f) Transparencia y rendición de cuentas:

El proceso de investigación se llevó a cabo con transparencia, proporcionando información clara y precisa sobre los métodos empleados, los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas.

g) Protección de los derechos humanos:

Se garantizó el cumplimiento de los principios éticos y legales vigentes en materia de derechos humanos, evitando cualquier forma de discriminación y asegurando la protección integral de los derechos de los participantes.



4.4 Población y muestra

La población de la presente investigación estuvo constituida por el suelo natural del fondo y de los taludes del reservorio de almacenamiento de agua, ubicado en el distrito de Haquira, provincia de Cotabambas, región Apurímac. Esta población comprende la totalidad del material edáfico que conforma la base y las paredes del reservorio, el cual se encuentra en contacto directo con el agua almacenada y es susceptible a pérdidas por infiltración.

La muestra estuvo conformada por unidades experimentales de suelo natural evaluadas tanto en el fondo como en el talud del reservorio. Cada unidad experimental correspondió a un área delimitada del suelo, sobre la cual se aplicaron las distintas dosificaciones de silano hidrolizado y se realizaron los ensayos experimentales correspondientes.

Para cada estructura (fondo y talud), se consideraron tres tratamientos: grupo control (0.00 L/m²), dosificación de 1.25 L/m² y dosificación de 1.50 L/m².

Cada tratamiento fue evaluado mediante cinco (5) repeticiones independientes, lo que dio lugar a un total de quince (15) unidades experimentales por estructura y treinta (30) unidades experimentales en todo el estudio.

Cada unidad experimental estuvo conformada por un área aproximada de 1.00 m², seleccionada mediante excavación y delimitación controlada, asegurando condiciones homogéneas del suelo natural previo a la aplicación del silano hidrolizado. Las unidades experimentales fueron sometidas a ensayos de permeabilidad en campo, así como a pruebas de compactación natural y caracterización física del suelo, antes y después de la aplicación del tratamiento.

El proceso de selección de la muestra se enmarcó en un muestreo no probabilístico por conveniencia, dado que los puntos de evaluación fueron definidos estratégicamente en zonas representativas y críticas del reservorio, principalmente en sectores con mayor contacto con el agua y mayor probabilidad de infiltración. Este tipo de muestreo es adecuado en investigaciones experimentales de campo, donde las condiciones físicas del terreno condicionan la selección de las unidades experimentales, (Etikan, Musa y Alkassim, 2016; Casteel y Bridier, 2021).

En consecuencia, las unidades experimentales seleccionadas permiten extrapolar los resultados obtenidos al comportamiento general del suelo del fondo y los taludes del



reservorio, garantizando la validez técnica, estadística y operativa de los resultados obtenidos en la presente investigación.

4.5 Procedimiento

La investigación se desarrolló siguiendo una secuencia sistemática de etapas, orientadas a evaluar el efecto del silano hidrolizado sobre la permeabilidad del suelo natural del reservorio de Haquira.

a) Reconocimiento y preparación del área de estudio

- Se identificó y delimitó el terreno donde se excavó el reservorio, ubicándolo en el distrito de Haquira, provincia de Cotabambas
- Se realizó una caracterización preliminar del suelo natural del fondo y los taludes, describiendo su textura, contenido de humedad y estado inicial

b) Excavación y acondicionamiento del reservorio

- Se llevó a cabo la excavación del reservorio en suelo natural, definiendo fondo y taludes de acuerdo con las dimensiones proyectadas
- Se nivelaron las superficies y se tomaron registros fotográficos y métricos de las condiciones iniciales

c) Ensayos preliminares de campo

- En el reservorio excavado se realizaron pruebas de permeabilidad del suelo natural antes de aplicar el silano hidrolizado, mediante pruebas de infiltración directa y llenado parcial de agua
- Se registraron los tiempos de infiltración y el comportamiento de las filtraciones en el fondo y los taludes

d) Aplicación del silano hidrolizado

- Se preparó la solución de silano hidrolizado según las recomendaciones técnicas del fabricante
- El producto se aplicó directamente sobre el suelo del fondo y los taludes mediante aspersion y/o impregnación
- Se dejó actuar durante el tiempo necesario para permitir su adecuada penetración en el material



e) Ensayos posteriores de campo

- Tras la aplicación del silano, el reservorio se llenó con agua en condiciones controladas
- Se monitoreó el nivel de agua durante un periodo definido, registrando las pérdidas por infiltración en el fondo y los taludes
- Los resultados obtenidos fueron comparados con los datos previos al tratamiento

f) Ensayos de laboratorio complementarios

- Paralelamente, se analizaron muestras extraídas del fondo y taludes del reservorio para determinar propiedades físicas y de permeabilidad en condiciones controladas
- Estos ensayos permitieron contrastar y validar los resultados observados en campo

g) Análisis y sistematización de resultados

- Los datos obtenidos en campo y laboratorio fueron organizados en cuadros y gráficos comparativos
- Se evaluó la variación en los coeficientes de permeabilidad antes y después de la aplicación del silano hidrolizado
- Finalmente, se estableció la influencia del tratamiento sobre la impermeabilización del reservorio de Haquira

4.5.1 Ubicación del estudio de permeabilidad

El ensayo in situ sobre el fondo y los taludes del reservorio de suelo natural se desarrolló en el distrito de Haquira, provincia de Cotabambas, departamento de Apurímac. La ubicación geográfica exacta se encuentra en coordenadas UTM: 14°13'12"S, 72°11'07"W, con una elevación de 3,672.48 msnm.

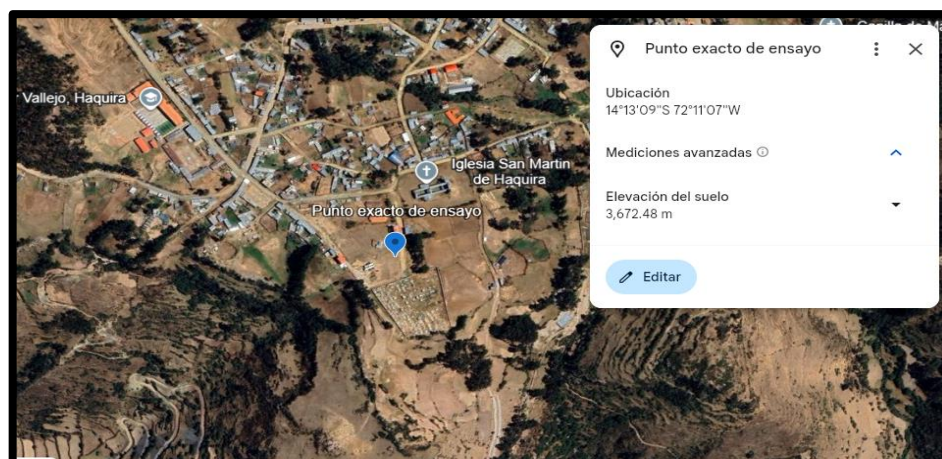


Figura 3 — Distrito de Haquira, lugar exacto donde llevar a cabo la investigación

4.5.2 Extracción de la muestra del suelo natural

Se extrajeron muestras representativas del fondo y los taludes del reservorio con el propósito de realizar los ensayos de laboratorio correspondientes. Las propiedades analizadas incluyeron:

- Granulometría del suelo, para determinar la distribución de tamaños de partículas (ASTM C 136)
- Límites de Atterberg, que permiten evaluar la plasticidad del suelo (ASTM D 4318)
- Contenido de humedad, para determinar la cantidad de agua presente en el suelo
- Permeabilidad, con el fin de evaluar la capacidad del suelo para permitir el paso del agua

Todos los ensayos se realizaron siguiendo estrictamente las normas técnicas correspondientes y los procedimientos establecidos para cada tipo de análisis.

4.5.3 Caracterización del suelo

- **Ensayo de granulometría**

El ensayo de granulometría se realiza con el fin de caracterizar la distribución de tamaños de partículas del suelo, lo cual es fundamental para evaluar su capacidad de compactación, drenaje y resistencia mecánica. Los resultados obtenidos permiten determinar parámetros esenciales para el diseño y la ejecución de obras sobre el suelo, siguiendo los procedimientos establecidos en las normas técnicas correspondientes. Los datos se presentan posteriormente en cuadros comparativos, según lo estipulado por las normas aplicables.

Tabla 6 — Límites de la clasificación del agregado fino

ESPECIFICACIÓN DE TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA (%)
9.50 mm	100.00
4.75 mm (N° 4)	95.00 a 100.00
2.36 mm (N° 8)	80.00 a 100.00
1.18 mm (N° 16)	50.00 a 85.00
600.00 um (N° 30)	25.00 a 60.00
300.00 um (N° 50)	5.00 a 30.00
150.00 um (N° 100)	0.00 a 10.00

Tabla 7 — Parámetros de la clasificación del agregado grueso

HUSO	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	PORCENTAJE QUE PASA POR LOS TAMICES NORMALIZADOS													
		100.00 mm (4 in.)	90.00 mm (3 ½ in.)	75.00 mm (3 in.)	63.00 mm (2 ½ in.)	50.00 mm (2 in.)	37.50 mm (1 ½ in.)	25.00 mm (1 in.)	19.00 mm (¾ in.)	12.50 mm (1/2 in.)	9.50 mm (3/8 in.)	4.75 mm (N° 4)	2.36 mm (N° 8)	1.18 mm (N° 16)	300.00 um (N° 50)
1.00	90.00 mm a 37.50 mm (3 ½ a 1 ½ in.)	100.00	90.00a 100.00	-	25.00 a 60.00	-	0.00 a 15.00	-	0.00 a 5.00	-	-	-	-	-	-
2.00	63.00 mm a 37.50 mm (2 ½ a 1 ½ in.)	-	-	100.00	90.00 a 100.00	35.00 a 70.00	0.00 a 15.00	-	0.00 a 5.00	-	-	-	-	-	-
3.00	50.00 mm a 25.00 mm (2 a 1 in.)	-	-	-	100.00	90.00 a 100.00	35.00 a 70.00	0.00 a 15.00	-	0.00 a 5.00	-	-	-	-	-
357.00	50.00 mm a 4.75 mm (2 in. a N° 4)	-	-	-	100.00	95.00 a 100.00	-	35.00 a 70.00	-	10.00 a 30.00	-	0.00 a 5.00	-	-	-
4.00	37.50 mm a 9.00 mm (1 1/2 in. a ¾ in.)	-	-	-	-	100.00	95.00 a 100.00	20.00 a 55.00	0.00 a 15.00	-	0.00 a 5.00	-	-	-	-
467.00	37.50 mm a 4.75 mm (1 1/2 in. a N° 4)	-	-	-	-	100.00	95.00 a 100.00	-	35.00 a 70.00	-	10.00 a 30.00	0.00 a 5.00	-	-	-
5.00	25.00 mm a 12.50 mm (1 a ½ in.)	-	-	-	-	-	100.00	90.00 a 100.00	20.00 a 55.00	0.00 a 10.00	0.00 a 5.00	-	-	-	-
56.00	25.00 mm a 9.50 mm (1 a 3/8 in.)	-	-	-	-	-	100.00	90.00 a 100.00	40.00 a 85.00	10.00 a 40.00	0.00 a 15.00	0.00 a 5.00	-	-	-
57.00	25.00 mm a 4.75 mm (1 in. a N° 4)	-	-	-	-	-	100.00	90.00 a 100.00	-	25.00 a 60.00	-	0.00 a 10.00	0.00 a 5.00	-	-
6.00	19.00 mm a 9.50 mm (3/4 a 3/8 in.)	-	-	-	-	-	-	100.00	90.00 a 100.00	20.00 a 55.00	0.00 a 15.00	0.00 a 5.00	-	-	-
67.00	19.00 mm a 4.75 mm (3/4 in. a N° 4)	-	-	-	-	-	-	100.00	90.00 a 100.00	-	20.00 a 55.00	0.00 a 10.00	0.00 a 5.00	-	-
7.00	12.50 mm a 4.75 mm (1/2 in. a N° 4)	-	-	-	-	-	-	-	100.00	90.00 a 100.00	40.00 a 70.00	0.00 a 15.00	0.00 a 5.00	-	-
8.00	9.50 mm a 2.56 mm (3/8 in. a N° 8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100.00	85.00 a 100.00	10.00 a 30.00	0.00 a 10.00	0.00 a 5.00	-
89.00	9.50 mm a 1.18 mm (3/8 in. a N° 16)	-	-	-	-	-	-	-	-	100.00	90.00 a 100.00	20.00 a 55.00	5.00 a 30.00	0.00 a 10.00	0.00 a 5.00
9.00	4.75 mm a 1.18 mm (N° 4 a N° 16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100.00	85.00 a 100.00	10.00 a 40.00	0.00 a 10.00	0.00 a 5.00

FUENTE: ASTM C 33-03

- **Procedimiento por método del tamizado**

- Secado de la muestra de suelo en un horno a $110.00\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante
- Se pesa la muestra seca y se coloca en una serie de tamices con aberturas decrecientes
- Se agita la muestra mecánicamente o manualmente durante 10.00 a 15.00 minutos
- Se pasa el material retenido en cada tamiz y se calcula el porcentaje de partículas que pasa a través de cada uno
- Se grafica la curva granulométrica en función del tamaño de las partículas

- **Ensayo de contenido de humedad del suelo**

El contenido de humedad de un suelo es la cantidad de agua presente en una muestra en relación con su peso seco, se expresa como un porcentaje y es un parámetro clave para determinar su comportamiento en su propiedad mecánica, compactación y estabilidad.

- **Normas técnicas aplicadas**

Para la determinación del contenido de humedad del suelo, se empleó la norma ASTM D 2216 – Método estándar para la determinación del contenido de humedad en laboratorio. Esta norma establece el procedimiento para obtener el porcentaje de humedad presente en una muestra de suelo, mediante secado en horno hasta peso constante.

- **Materiales y equipos**

- **Para la ejecución del ensayo se utilizaron los siguientes materiales y equipos:**
 - Balanza de precisión, para medir la masa de las muestras
 - Horno de secado, calibrado a $105 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, para eliminar el contenido de agua de la muestra
 - Recipientes metálicos con tapa, para contener las muestras durante el secado
 - Espátula o cuchara, para manipular el suelo sin contaminar la muestra
 - Guantes y elementos de seguridad, para proteger al operador durante la manipulación del material y el uso del horno



- **Procedimiento del ensayo de contenido de humedad**
 - **Paso 1: toma de la muestra**
 - Se extrae una muestra representativa del suelo
 - Si el suelo es granular (arena o grava), se requiere un mínimo de 500.00 g
 - Si el suelo es cohesivo (arcilla, limo), se usa entre 30.00 g y 100.00 g
 - Se deposita en un recipiente metálico con una tapa para evitar pérdida de humedad
 - **Paso 2: pesaje inicial (peso húmedo)**
 - Se pesa el recipiente vacío y se registra como Pr
 - Se pesa el recipiente con la muestra húmeda y se registra como Prh
 - Se calcula el peso de la muestra húmeda

$$Ph = Prh - Pr$$

- **Paso 3: secado en horno**
 - Se introduce el recipiente con la muestra en el horno a $105.00 \pm 5.00^{\circ}\text{C}$ por 24 horas
- **Paso 4: peaje final**
 - Se retira la muestra del horno y se deja enfriar en desecador para evitar la absorción de humedad
 - Se pesa nuevamente el recipiente con la muestra Prs
 - Se calcula el peso seco de la muestra

$$Ps = Prs - Pr$$

- **Cálculo del contenido de humedad (w)**

$$w = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100$$

Donde:

- Ph= peso de la muestra húmeda (g)
- Ps= peso de la muestra seca (g)
- W= contenido de humedad (%)



Tabla 8 — Rango de contenido de humedad según el tipo del suelo

Tipo de suelo	Rango de contenido de humedad (%)
Arena	5.00-15.00 %
Limos	15.00-40.00 %
Arcillas	20.00-80.00 %
Suelos orgánicos	>80.00 %

FUENTE: FAO y Fertilab

- **Ensayo de límites de Atterberg**
 - **Normas técnicas aplicadas**
 - ASTM D4318 – Método estándar para límites de Atterberg
 - NTP 339.129: Suelos. Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos
- **Procedimiento del ensayo de límites de Atterberg**
 - **Ensayo de limite líquido (LL)**
 - **Objetivo:** Determinar la humedad en la cual el suelo pasa del estado plástico al estado líquido.
 - **Materiales y equipos**
 - Dispositivo de copa de Casagrande con base de caucho
 - Espátula metálica
 - Cuchilla ranurada o herramienta de corte
 - Balanza con precisión de 0.01 g
 - Horno desecado a $105.00 \pm 5.00^{\circ}\text{C}$
 - Recipiente para secado
- **Procedimiento**
 - a) **Preparación de la muestra:**
 - Secar la muestra de suelo al aire y tamizarla con el tamiz N° 40
 - Agregar agua lentamente hasta formar una pasta homogénea



b) Ensayo con la Copa de Casagrande:

- Colocar la pasta desuelo con la copa nivelarla
- Dividir la muestra con la cuchilla formando una ranura de 2 mm de ancho en el fondo
- Girar la manivela de la copa a 2.00 golpes por segundo hasta que la ranura se cierre en 12.00 mm de longitud
- Registrar el número de golpes requeridos

c) Medición de humedad:

- Tomar una muestra de suelo en un recipiente, pesarla y secarla en horno
- Determinar la humedad con la fórmula:

$$W = \frac{(P_{\text{humedo}} - P_{\text{seco}})}{P_{\text{seco}}} \times 100$$

- Repetir el proceso para obtener 4 puntos de datos con golpes entre 15 y 35

d) Calculo del límite liquido:

- Graficar contenido de humedad (%) vs número de golpes en escala logarítmica
- Interpretar la humedad correspondiente a 25.00 golpes (límite líquido)

- **Ensayo de límite plástico (LP)**

- **Objetivo:** Determinar la humedad en la cual el suelo pasa de estado semisólido a plástico.
- **Materiales y equipos**
 - Superficie de vidrio o metal para modelado
 - Regla graduada de 3.00 mm de precisión
 - Recipiente pasa secado
 - Balanza y horno desecado

- **Procedimiento**

a) Preparación de la muestra:

- Tomar una porción de suelo con agua suficiente para que sea moldeable



b) Moldeo del hilo desuelo:

- Amasar la muestra y formar un hilo cilíndrico de 3.00 mm de diámetro sobre una superficie
- Si el hilo se rompe antes de llegar a 3.00 mm de diámetro, el suelo está demasiado seco (añadir agua y repetir)
- Si el hilo se forma sin romperse, tomar una muestra para secado

c) Medición de humedad:

- Secar la muestra en el horno y calcular la humedad con la fórmula contenido de humedad
- Este valor es el límite plástico (LP)

d) Cálculo del índice de plástico (IP):

$$IP = LL - LP$$

Donde:

- LL= limite líquido.
- LP= limite pastico.
- IP=índice de plasticidad.

Tabla 9 — Clasificación de índice de plasticidad según el SUCS

Índice de plasticidad	Clasificación del suelo
$IP > 17.00\%$	Arcillas de alta plasticidad
$7.00\% \leq IP \leq 17.00\%$	Arcillas de baja a media plasticidad
$IP < 7.00\%$	Limos de baja plasticidad
LP no existe (NP)	Suelo no plástico

FUENTE: ASTM D2487



4.5.4 Evaluación de permeabilidad

- **Proporciones de dosis de silano hidrolizado**

Para la evaluación de la permeabilidad del suelo del fondo y taludes del reservorio, se aplicaron distintas dosis de silano hidrolizado. La dosis utilizada en cada prueba de infiltración se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 10 — Proporciones de dosis de silano hidrolizado

Dosificación de silano	Dosis de silano hidrolizado
0.00 L/m ²	Control
1.25 L/m ²	8.23 ml/ m ²
1.50 L/m ²	9.88 ml/ m ²

- **Proporciones para el ensayo de infiltración**

El silano hidrolizado se preparó a partir del prosil, en una proporción de 1:5 ml, según las recomendaciones del fabricante. De esta manera, para una dosificación de 1.25 L/m² se obtuvo una dosis efectiva de 8.23 ml/m², mientras que para la dosificación de 1.50 L/m² la dosis equivalente fue de 9.88 ml/m².

La aplicación se realizó sobre el área determinada por el método del doble anillo, con un diámetro de 30 cm, conforme a la norma ASTM D3385. Esto permitió garantizar la uniformidad del tratamiento y evaluar de manera precisa la influencia del silano hidrolizado sobre la tasa de infiltración y permeabilidad del suelo.

- **Procedimiento del ensayo de método de doble anillo**

- **Sitio de prueba:**

- Se establecieron los estratos del suelo a analizar a partir del perfil del suelo determinado mediante la clasificación de muestras obtenidas de un agujero de barrena adyacente. Es importante que el suelo directamente debajo de la zona de prueba presente tasas de flujo iguales o mayores que la zona de prueba, para que los resultados sean representativos de los estratos subyacentes.

- La prueba requiere un área mínima de 3.00×3.00 m, accesible para la movilización de equipo y, de ser necesario, de un camión de apoyo.
- El sitio de prueba debe encontrarse nivelado, o bien, debe prepararse una superficie nivelada para garantizar condiciones adecuadas de medición.
- Cuando se desea conocer la tasa de infiltración en profundidad y no solo en la superficie, el ensayo puede ejecutarse dentro de un pozo, asegurando que las condiciones representen los estratos subsuperficiales del suelo.

Para garantizar la confiabilidad y representatividad de los resultados, cada tratamiento de silano hidrolizado se aplicó con cinco réplicas tanto en el fondo como en los taludes del reservorio. La asignación de las réplicas se realizó de manera aleatoria, con el fin de minimizar posibles sesgos y asegurar que los resultados obtenidos fueran representativos del comportamiento general del suelo en cada zona del reservorio. De esta manera, cada combinación de dosis y ubicación del ensayo permitió obtener múltiples mediciones independientes, facilitando un análisis estadístico robusto de la permeabilidad del suelo antes y después de la aplicación del silano hidrolizado.

- **Norma aplicable**

Para la determinación de la tasa de infiltración del suelo en campo, se empleó la norma ASTM D3385 – Método de prueba estándar para la tasa de infiltración de suelos utilizando un infiltrómetro de doble anillo. Esta norma establece el procedimiento para medir la capacidad de infiltración del agua en el suelo mediante un infiltrómetro de doble anillo, proporcionando información clave sobre la permeabilidad y el comportamiento hidráulico del suelo en condiciones naturales.

- **Materiales y equipos**

- Reloj o cronómetro.
- Nivel de mano.
- Termómetro.
- Martillo de goma (mazo).
- Materiales de grabación.
- Taladro de mano.
- Válvulas de flotador.



4.6 Técnica e instrumentos

Para esta investigación se empleó la técnica de observación, utilizada tanto durante la ejecución de los ensayos de laboratorio como en la recolección de datos en campo. Esta técnica permitió monitorear de manera directa el comportamiento del suelo en el fondo y taludes del reservorio, asegurando un registro sistemático de los resultados obtenidos. La observación puede realizarse de manera continua o en periodos determinados, y puede clasificarse en estructurada, no estructurada o semiestructurada, dependiendo del grado de control sobre los elementos observados, (Softwaretestinghelp, 2022).

Los datos se registraron mediante formularios técnicos específicos, que constituyen instrumentos científicos diseñados para recopilar información técnica detallada y organizada. Estos formularios permiten registrar mediciones, especificaciones, procedimientos y otros datos relevantes de manera sistemática, asegurando la precisión necesaria para análisis posteriores, (Acosta Montedoro, 2023).

- **Instrumento para la variable dependiente: Impermeabilización del fondo y talud de reservorio**
- **Ficha técnica del instrumento:**
 - Nombre: Matriz resumen de los datos obtenidos de los formularios técnicos específicos
 - Autor: Dr. Marcos Walter Acosta Montedoro, ingeniero CIP, científico y experto en diseño de instrumentos de recolección de información técnica, catedrático y expositor
 - Año: 2023
 - Procedencia: Elaboración propia
 - Número de ítems: 20 ítems (5 x 4)
 - Tiempo de aplicación: No estimado
 - Tipo de escala: Numérica
 - Dimensiones: 3 dimensiones
 - Validación: Criterio de juicio de expertos
 - Población objetivo: Reservorios de almacenamiento de agua en suelo natural del distrito de Haqaira, provincia de Cotabambas, departamento de Apurímac, año 2024
 - Objetivo: Medir la variable dependiente impermeabilización
 - Calificación: No se asigna



Este instrumento permitió documentar y sistematizar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y en campo, asegurando que la información recopilada fuera precisa y organizada, para su posterior análisis en relación con la impermeabilización del reservorio.

4.7 Análisis estadístico

Para esta investigación se emplearon técnicas estadísticas que permiten evaluar y comparar la permeabilidad del suelo en el fondo y taludes del reservorio antes y después de la aplicación de silano hidrolizado. Se realizó un análisis unifactorial considerando como factor las distintas dosificaciones de silano y la variable dependiente tasa de infiltración del suelo. A continuación, se describen los procedimientos estadísticos aplicados y su justificación.

Para el análisis estadístico de los datos se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 0.05, previa verificación de los supuestos estadísticos. La normalidad de los datos y la homogeneidad de varianzas entre los tratamientos fueron evaluadas, esta última mediante la prueba de Levene. El cumplimiento de estos supuestos permitió validar la aplicación del ANOVA para comparar los efectos de las diferentes dosificaciones de silano hidrolizado.

4.7.1 Media aritmética (\bar{x})

La media aritmética se utilizó para representar el valor promedio de infiltración de cada tratamiento de silano aplicado. Este indicador resume los datos y permite comparaciones directas entre tratamientos. Se calcula mediante la fórmula:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

donde x_i es cada observación y n el número de réplicas.

4.7.2 Varianza (S^2) y desviación estándar (s)

La varianza y la desviación estándar se emplearon para evaluar la dispersión de los datos en cada tratamiento. Estos indicadores permiten determinar la consistencia de los resultados y son necesarios para la aplicación de pruebas paramétricas como ANOVA:

$$S^2 = \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad s = \sqrt{S^2}$$



Donde:

- S^2 : Varianza muestral
- \bar{x} : Media aritmética
- n : Tamaño de la muestra

4.7.3 Prueba de normalidad

Se requiere que los datos sigan una distribución normal. Por ello, se realiza la prueba de Shapiro – Wilk usando IBM SPSS Statistics Base 26.

a) Hipótesis:

- H_0 : Los datos se distribuyen normalmente
- H_1 : Los datos no se distribuyen normalmente

b) Nivel de significancia: $\alpha=0.05$

c) Criterio de decisión:

- Si $p \geq 0.05$, se acepta H_0 y se considera que los datos son normales
- Si $p < 0.05$, se rechaza H_0 y se recomienda usar pruebas no paramétricas

4.7.4 Homogeneidad de varianzas (Homocedasticidad)

Para que las varianzas entre tratamientos sean homogéneas. Para comprobarlo se utiliza la prueba de Levene, con las hipótesis:

a) H_0 : Las varianzas son iguales entre grupos

b) H_1 : Las varianzas no son iguales

c) Nivel de significancia: $\alpha=0.05$

d) Criterio de decisión:

- Si $p \geq 0.05$, se acepta H_0 y se cumple homocedasticidad
- Si $p < 0.05$, se rechaza H_0 y se debe considerar un análisis no paramétrico o transformación de datos

4.7.5 ANOVA unifactorial

ANOVA unifactorial para comparar las medias de infiltración entre las tres dosificaciones de silano (control, 1.25 L/m² y 1.50 L/m²).

a) Hipótesis:

- H_0 : Las medias de los tratamientos son iguales ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$)
- H_a : Al menos dos medias difieren entre sí



b) Supuestos para ANOVA:

- Normalidad de las distribuciones
- Independencia de las observaciones
- Homocedasticidad (varianzas iguales)

4.7.6 Prueba post hoc (Tukey)

La prueba de Tukey para determinar qué tratamientos difieren entre sí en cuanto a la infiltración. Esto permitió identificar la dosis de silano que produjo un efecto significativo sobre la impermeabilización.

1. Validez

Es posible garantizar la validez de un instrumento de investigación científica verificando que esté diseñado para evaluar adecuadamente las variables previstas. Por ejemplo, los expertos o jueces suelen evaluar la validez de contenido de un instrumento revisando cuidadosamente cada uno de sus ítems.

Los especialistas que participan en esta validación deben contar con habilidades específicas, como experiencia en investigación científica, conocimiento en validación de instrumentos y comprensión profunda de la materia objeto de estudio; generalmente poseen grado de maestría o doctorado.

La construcción del instrumento depende del tipo de investigación (descriptiva, correlacional o explicativa) y del criterio técnico del investigador. Aunque no es recomendable que el investigador apruebe su propio instrumento, es posible que sea a la vez creador y validador, siempre que se mantenga objetividad. Asimismo, el validador puede rechazar el instrumento o sugerir ajustes para garantizar su adecuación, (Acosta Montedoro, 2023).



Tabla 11 — Validez de contenido del instrumento para medir la variable dependiente

Validador	Porcentaje	Resultado
Dr. Marcos Walter Acosta Montedoro	100.00%	Aplicables
Dr. Jenry Salazar Garcés	100.00%	Aplicables
Dra. Martha Rocío Gonzales Loli	100.00%	Aplicables

NOTA: La fuente se obtuvo de los certificados de validez del instrumento

2. Confiabilidad

A modo de una lista de verificación (lista de chequeo o check list), un formulario técnico específico adquiere confiabilidad cuando tiene validez, por lo que la validez por juicio de expertos puede ser considerada como la medida de su confiabilidad, (DEC-CONEAU, 2017, pp. 41-43).



CAPÍTULO V RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

- a) **Objetivo 1.** Determinar la influencia de silano hidrolizado en la permeabilidad del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira – 2024

Para cumplir este objetivo, se evaluó la capacidad de impermeabilización del suelo natural mediante el ensayo de infiltración con doble anillo, siguiendo los procedimientos establecidos por la norma ASTM D3385. Este ensayo permitió medir la velocidad de infiltración del agua y clasificar el grado de impermeabilización del suelo en el fondo y los taludes del reservorio, antes y después de la aplicación del silano hidrolizado. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas siguientes, las cuales reflejan el comportamiento del suelo frente a las distintas dosis aplicadas.

Tabla 12 — Datos de infiltración sin tratamiento en fondo de reservorio

Ensayo	Estructura	Dosificación silano (L/m ²)	Δh total (cm)	Tiempo (h)	Infiltración promedio (cm/h)	Clasificación según ASTM D3385
1	Fondo de reservorio	0.00	7.67	3.00	2.56	Alta infiltración
2			7.57	3.00	2.52	Alta infiltración
3			8.53	3.00	2.84	Alta infiltración
4			6.66	3.00	2.22	Alta infiltración
5			7.98	3.00	2.66	Alta infiltración
La infiltración promedio (cm/h)					2.56 cm/h	



Tabla 13 — Datos de infiltración sin tratamiento en talud de reservorio

Ensayo	Estructura	Dosificación silano (L/m ²)	Δh total (cm)	Tiempo (h)	Infiltración promedio (cm/h)	Clasificación según ASTM D3385
1	Talud de reservorio	0.00	6.81	3.00	2.27	Infiltración moderada-alta
2			8.00	3.00	2.67	Infiltración alta
3			7.13	3.00	2.38	Infiltración moderada-alta
4			6.11	3.00	2.04	Infiltración moderada-alta
5			7.24	3.00	2.41	Infiltración moderada-alta
La infiltración promedio (cm/h)					2.35 cm/h	

Los resultados de infiltración sin tratamiento muestran que el suelo natural del fondo del reservorio tiene una infiltración promedio de 2.56 cm/h, mientras que el talud presenta un promedio ligeramente menor de 2.35 cm/h, ambos indicando alta permeabilidad según la norma ASTM D3385. Esto evidencia que, en su estado natural, el suelo permite un rápido paso del agua, siendo el fondo ligeramente más permeable que el talud, probablemente por su mayor densidad y uniformidad. La variación entre los ensayos individuales refleja la heterogeneidad del suelo y la influencia de la pendiente en la capacidad de retención del talud. En conjunto, estos datos establecen una línea base que confirma que el reservorio requiere un tratamiento con aditivos impermeabilizantes, como el silano hidrolizado, para reducir la infiltración y mejorar la capacidad de almacenamiento de agua.

Tabla 14 — Datos de infiltración con tratamiento de 1.25 L/m² en fondo

Ensayo	Estructura	Dosificación silano (L/m ²)	Δh total (cm)	Tiempo (h)	Infiltración promedio (cm/h)	Clasificación según ASTM D3385
1	Fondo de reservorio	1.25	2.62	3.00	0.87	Baja infiltración
2			3.16	3.00	1.05	Baja infiltración
3			2.81	3.00	0.94	Baja infiltración
4			2.26	3.00	0.75	Baja infiltración
5			2.23	3.00	0.74	Baja infiltración
La infiltración promedio (cm/h)					0.87 cm/h	

Tabla 15 — Datos de infiltración con tratamiento de 1.25 L/m² en talud

Ensayo	Estructura	Dosificación silano (L/m ²)	Δh total (cm)	Tiempo (h)	Infiltración promedio (cm/h)	Clasificación según ASTM D3385
1	Talud de reservorio	1.25	4.21	3.00	1.40	Infiltración moderada
2			3.54	3.00	1.18	Infiltración moderada
3			4.10	3.00	1.37	Infiltración moderada
4			3.49	3.00	1.16	Infiltración moderada
5			3.42	3.00	1.14	Infiltración moderada
La infiltración promedio (cm/h)					1.25 cm/h	

Con la aplicación de 1.25 L/m² de silano hidrolizado, se observa una reducción significativa de la infiltración en comparación con el suelo natural, alcanzando un promedio de 0.87 cm/h en el fondo y 1.25 cm/h en el talud del reservorio, lo que indica baja a moderada permeabilidad según ASTM D3385. Estos resultados muestran que el aditivo mejora la capacidad de impermeabilización, siendo más efectivo en el fondo debido a la mayor densidad y uniformidad del suelo, mientras que en el talud la pendiente y la heterogeneidad del material limitan ligeramente la reducción de infiltración. La consistencia de los datos entre los ensayos refleja que la impregnación uniforme del silano logra un efecto estable sobre la retención de agua, estableciendo que esta dosis proporciona un control notable de la infiltración sin alterar drásticamente las condiciones físicas del suelo.

Tabla 16 — Datos de infiltración con tratamiento de 1.50 L/m² en fondo

Ensayo	Estructura	Dosificación silano (L/m ²)	Δh total (cm)	Tiempo (h)	Infiltración promedio (cm/h)	Clasificación según ASTM D3385
1	Fondo de reservorio	1.50	0.15	3.00	0.05	Muy baja infiltración
2			0.10	3.00	0.03	Muy baja infiltración
3			0.06	3.00	0.02	Muy baja infiltración
4			0.06	3.00	0.02	Muy baja infiltración
5			0.05	3.00	0.017	Muy baja infiltración
La infiltración promedio (cm/h)					0.03 cm/h	

Tabla 17 — Datos de infiltración con tratamiento de 1.50 L/m² en talud

Ensayo	Estructura	Dosificación silano (L/m ²)	Δh total (cm)	Tiempo (h)	Infiltración promedio (cm/h)	Clasificación según ASTM D3385
1	Talud de reservorio	1.50	0.15	3.00	0.05	Muy baja infiltración
2			0.06	3.00	0.02	Muy baja infiltración
3			0.14	3.00	0.047	Muy baja infiltración
4			0.06	3.00	0.02	Muy baja infiltración
5			0.05	3.00	0.017	Muy baja infiltración
La infiltración promedio (cm/h)					0.03 cm/h	

Con la aplicación de 1.50 L/m² de silano hidrolizado, la infiltración en el reservorio se reduce de manera drástica, alcanzando un promedio de 0.03 cm/h tanto en el fondo como en el talud, lo que se clasifica como muy baja infiltración según ASTM D3385.

Esto evidencia que esta dosis logra prácticamente eliminar el flujo de agua a través del suelo tratado, mostrando una eficacia superior a la observada con 1.25 L/m², y proporciona un control óptimo de la permeabilidad en ambas estructuras.

Los resultados consistentes entre los ensayos indican que la impregnación fue uniforme y estable, logrando una impermeabilización efectiva y sostenida, independiente de la topografía del reservorio.

Tabla 18 — Resumen de resultados de la infiltración con el fondo de reservorio

FONDO DE RESERVORIO	
Dosificación silano (L/m ²)	Infiltración promedio (cm/h)
0.00	2.56
1.25	0.87
1.50	0.03

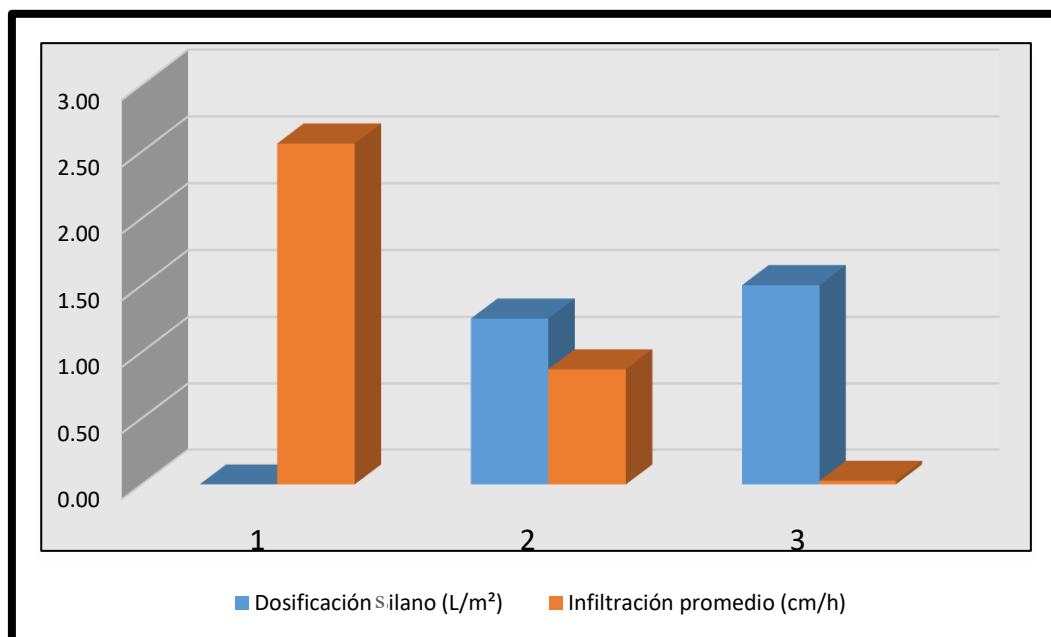


Figura 4 — Gráfico de comparación dosificación vs infiltración

Tabla 19 — Resumen de resultados de la infiltración con el talud de reservorio

TALUD DE RESERVORIO	
Dosificación silano (L/m²)	Infiltración promedio (cm/h)
0.00	2.35
1.25	1.25
1.50	0.03

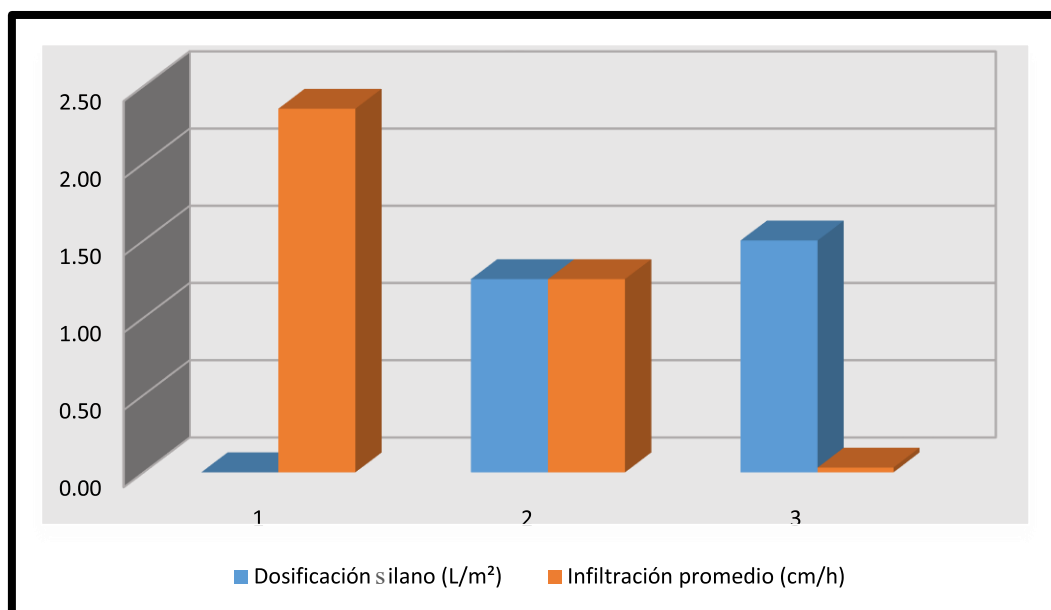


Figura 5 — Gráfico de comparación dosificación vs infiltración

El análisis de los resultados de infiltración en el fondo y talud del reservorio muestra claramente que el incremento de la dosificación de silano hidrolizado reduce significativamente la permeabilidad del suelo. En el fondo, la infiltración promedio disminuye de 2.56 cm/h sin tratamiento a 0.87 cm/h con 1.25 L/m² y alcanza un mínimo de 0.03 cm/h con 1.50 L/m², mientras que, en el talud, los valores descienden de 2.35 cm/h a 1.25 cm/h y finalmente 0.03 cm/h para las mismas dosificaciones.

Los gráficos comparativos reflejan de manera visual esta tendencia, evidenciando que el tratamiento con silano hidrolizado logra una impermeabilización progresiva y efectiva, siendo la dosis de 1.50 L/m² la más eficiente para controlar la infiltración en ambas estructuras del reservorio.

- b) Objetivo 2.** Determinar la influencia de silano hidrolizado en el grado de compactación natural del suelo en el fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira -2024

La tabla evidencia que el suelo natural sin tratamiento presenta el mayor grado de compactación promedio (83.08%), alcanzado con una humedad natural de 7.4% y una densidad de campo de 1.77 g/cm³, lo que indica una condición favorable de compactación natural en el fondo y taludes del reservorio.

Con la aplicación de silano hidrolizado a dosificaciones de 1.25 y 1.50 L/m², se observa un incremento del contenido de humedad hasta 10.0% y 10.5%, respectivamente, acompañado de una disminución de la densidad de campo a 1.72 g/cm³ y del grado de compactación a valores cercanos al 81%.

Esta tendencia muestra que el silano hidrolizado no mejora la compactación natural del suelo, sino que tiende a reducir la eficiencia de densificación, efecto asociado principalmente al aumento de humedad generado por el aditivo, por lo que su influencia en la compactación resulta desfavorable, aun cuando sea efectivo en la reducción de la infiltración.



Tabla 20 — Resumen de resultados de grado compactado del suelo natural en el fondo del reservorio

Condición	Densidad húmeda (g/cm ³)	Humedad (%)	Densidad de campo (g/cm ³)	% Compactación promedio
Fondo sin tratamiento	1.90	7.40	1.77	83.08%
Fondo con 1.25 L/m ²	1.90	10.00	1.72	80.98%
Fondo con 1.50 L/m ²	1.90	10.50	1.72	80.86%

El resumen muestra una comparación clara: el suelo sin tratamiento tiene la mayor compactación (83.08%), mientras que los tratamientos reducen el grado a alrededor de 81.00%. Esto evidencia que, en condiciones de fondo, los aditivos líquidos disminuyen la densificación natural del suelo en lugar de mejorarla.

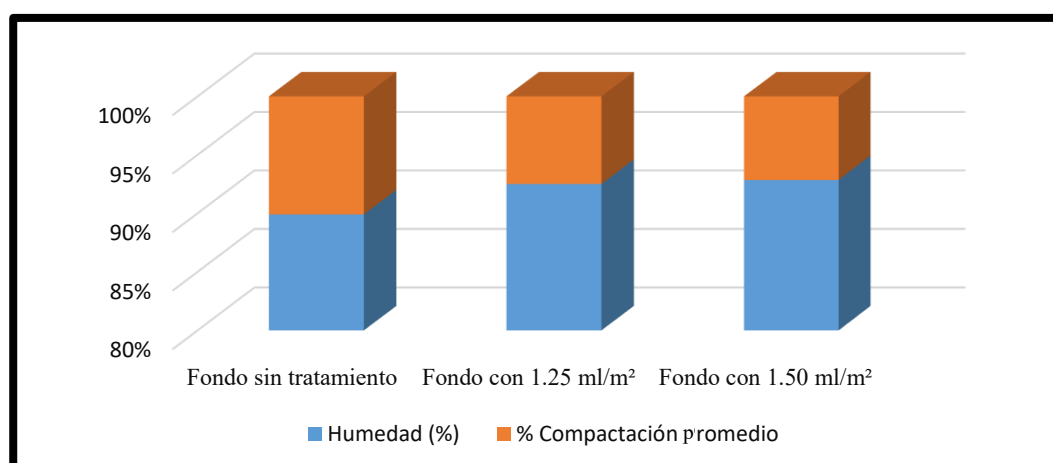


Figura 6 — Gráfico de comparación dosificación vs grado de compactado en el fondo

La tabla muestra que el talud del reservorio presenta, en condición natural sin tratamiento, una densidad seca promedio de 1.42 g/cm³ y un grado de compactación de 66.72%, alcanzados con una humedad de 7.40%, lo que refleja una compactación significativamente menor en comparación con el fondo del reservorio, debido a la geometría y condiciones propias del talud. Con la aplicación de silano hidrolizado a dosificaciones de 1.25 y 1.50 L/m², el contenido de humedad se incrementa hasta 10.00% y 10.50%, respectivamente, generando una disminución progresiva de la densidad seca a 1.39 g/cm³ y 1.38 g/cm³, y del grado de compactación a 65.27% y 64.96%.



Estos resultados evidencian que, al igual que en el fondo, la incorporación del silano hidrolizado en el talud no mejora el grado de compactación natural del suelo, sino que produce una leve pero constante reducción, asociada principalmente al aumento del contenido de humedad y a la menor capacidad de densificación propia de esta zona del reservorio.

Tabla 21 — Resumen de resultados de grado compactado del suelo natural en el talud de reservorio

Condición	Densidad húmeda (g/cm ³)	Humedad (%)	Densidad de campo (seca) (g/cm ³)	Compactación (%)
Talud sin tratamiento	1.53	7.40	1.42	66.72%
Talud con 1.25 L/m ²	1.53	10.00	1.39	65.27%
Talud con 1.50 L/m ²	1.53	10.50	1.38	64.96%

El resumen confirma que la mayor compactación se da sin tratamiento (66.72%), mientras que los tratamientos reducen progresivamente hasta 64.96%. A diferencia del fondo, en el talud el impacto del aditivo es más marcado, mostrando una tendencia clara de disminución en la compactación.

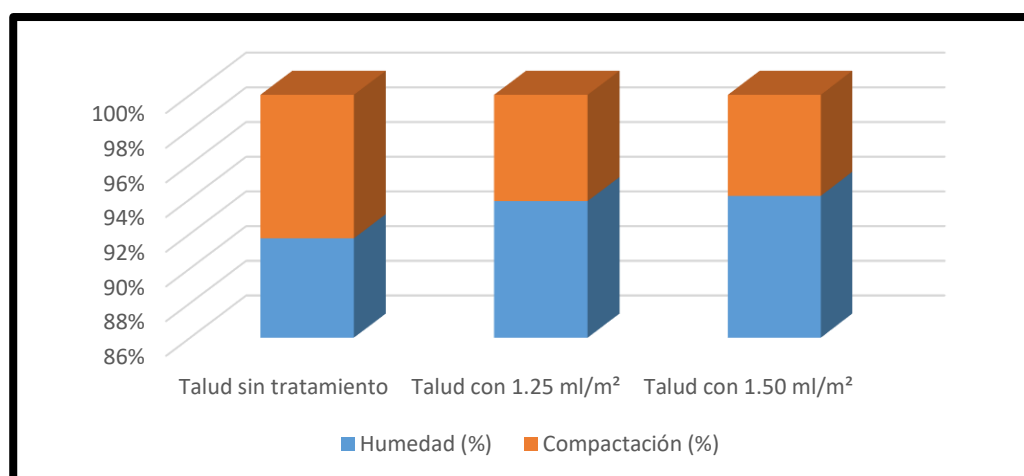


Figura 7 — Gráfico de comparación dosificación vs grado de compactado en talud



- c) **Objetivo 3.** Determinar la influencia de silano hidrolizado en las características físicas del suelo del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira -2024

Para la caracterización de las propiedades físicas iniciales del suelo natural del fondo y talud de reservorio, se realizaron ensayos de laboratorio que incluyeron análisis granulométrico, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y contenido de humedad, con la finalidad de identificar la clasificación y comportamiento del suelo antes de la aplicación de silano hidrolizado. Estos resultados constituyen la línea base para evaluar las variaciones en las características físicas del suelo y determinar la influencia del aditivo en su estructura y comportamiento geotécnico.

Tabla 22 — Propiedades físicas y clasificación del suelo natural

Límite líquido (LL): 41.98	Límite plástico (LP): 15.92		Índice plástico (IP): 26.10	
Clasificación (SUCS): GC	% Grava: 53.70	Contenido de humedad (%)	Pot. de expansión:	Estable
Clasificación (AASHTO): A-2-7 (0)	% Arena: 32.70	7.43	CBR 0.1" (100%):	
Max. dens. seca:	% Fino: 13.60			
Opt. cont. humedad:	Cu:-----	Índice de consistencia	CBR 0.1" (95%):46.80	

El suelo presenta un tamaño máximo de partícula de 3", con predominio de grava (53.70%), arena en 32.70% y fracción fina en 13.60%.

Según la clasificación SUCS, corresponde a un GC (grava arcillosa con arena), mientras que con AASHTO se clasifica como A-2-7 (0), típico de suelos granulares con finos de plasticidad media-alta.



Tabla 23 — Resumen del contenido de humedad según dosificación de silano hidrolizado

Dosificación de silano (L/m ²)	Contenido de humedad promedio (%)	Observación
0.00	7.43	Humedad natural baja
1.25	10.00	Incremento moderado de humedad
1.5	10.50	Mayor retención de humedad

La tabla evidencia que el contenido de humedad del suelo se incrementa progresivamente con el aumento de la dosificación de silano hidrolizado. En condición natural, sin tratamiento, el suelo presenta una humedad promedio de 7.43%, característica de un estado relativamente seco, favorable para una mayor compactación. Con la aplicación de 1.25 L/m² de silano, la humedad se eleva a 10.00%, lo que indica una mayor capacidad de retención de agua en la estructura del suelo.

Al incrementar la dosificación a 1.50 L/m², el contenido de humedad alcanza 10.50%, confirmando que dosis mayores intensifican este efecto. Estos resultados demuestran que el silano hidrolizado modifica las condiciones hídricas del suelo, aumentando su humedad, lo cual explica la reducción observada en el grado de compactación y evidencia que el principal efecto del aditivo se manifiesta en la impermeabilización más que en la mejora de la densificación del suelo.

Tabla 24 — Resumen de los límites de consistencia del suelo según dosificación de silano hidrolizado

Dosificación de silano (L/m ²)	Límite líquido, LL (%)	Límite plástico, LP (%)	Índice de plasticidad, IP (%)	Clasificación de plasticidad
0.00	42	15.9	26.1	Plasticidad media-alta
1.25	40.9	16.3	24.6	Plasticidad media
1.5	40.1	16.5	23.6	Plasticidad media



La tabla muestra que la dosificación de silano hidrolizado influye de manera moderada en los límites de consistencia del suelo. En condición natural, sin tratamiento, el suelo presenta un límite líquido de 42.0%, un límite plástico de 15.9% y un índice de plasticidad de 26.1%, lo que corresponde a una plasticidad media-alta, asociada a la presencia de finos arcillosos. Con la aplicación de 1.25 L/m² de silano, el límite líquido disminuye a 40.9%, mientras que el límite plástico se incrementa ligeramente a 16.3%, generando una reducción del índice de plasticidad a 24.6%.

Esta tendencia se acentúa con la dosificación de 1.50 L/m², donde el índice de plasticidad desciende a 23.6%, manteniéndose dentro del rango de plasticidad media. En conjunto, los resultados evidencian que el silano hidrolizado reduce ligeramente la plasticidad del suelo, lo que sugiere una menor sensibilidad a los cambios de humedad, sin modificar de manera significativa la naturaleza del material, comportamiento coherente con un tratamiento orientado principalmente a la impermeabilización y no a la alteración de la estructura granulométrica del suelo.

- **Análisis**

Como se observa en los resultados obtenidos, a medida que aumenta la dosificación de silano hidrolizado, el coeficiente de permeabilidad (k) disminuye, lo que indica que el suelo se vuelve progresivamente menos permeable. Este comportamiento es coherente con la hipótesis planteada, según la cual el silano hidrolizado contribuye a reducir la permeabilidad del suelo, propiedad altamente beneficiosa para aplicaciones como la impermeabilización de reservorios de almacenamiento de agua.

El coeficiente de permeabilidad constituye un parámetro fundamental para evaluar la efectividad del tratamiento, ya que valores menores de k representan una mayor capacidad de control de la infiltración. En este sentido, las dosificaciones de silano hidrolizado que presentan los valores más bajos de permeabilidad evidencian un mejor desempeño como agente impermeabilizante.

Los resultados muestran que, para el reservorio evaluado, la dosificación óptima de silano hidrolizado es de 1.50 L/m², tanto en el fondo como en los taludes, al proporcionar la mayor reducción del coeficiente de permeabilidad y, por tanto, una menor pérdida de agua por infiltración.



La determinación de la infiltración se realizó mediante el método del doble anillo, el cual permite evaluar la tasa de infiltración tanto en suelos superficiales como a determinadas profundidades, en superficies desnudas o con cobertura vegetal, dependiendo de las condiciones de evaluación. No obstante, este método presenta limitaciones, ya que no es aplicable en zonas donde el nivel freático se encuentra cercano a la superficie o existe una capa freática colgada, debido a la alteración del flujo vertical del agua.

Desde el punto de vista geotécnico, el suelo estudiado presenta una granulometría predominantemente gruesa, compuesta por 53.70% de grava y 32.70% de arena, con un contenido de finos de 13.60%. Según el sistema SUCS, se clasifica como GC (grava arcillosa con finos de plasticidad media) y, de acuerdo con AASHTO, como A-2-7 (0), lo que corresponde a un material granular con fracción fina plástica, común en suelos con sensibilidad a la humedad y potencial de expansión moderado, lo cual justifica la necesidad de un tratamiento de estabilización.

Respecto al contenido de humedad, el suelo en estado natural presenta un valor promedio de 7.43%, el cual se incrementa a 10.00% con la dosificación de 1.25 L/m² y a 10.50% con 1.50 L/m² de silano hidrolizado. Este aumento moderado indica que el aditivo modifica la interacción agua-suelo, no para retener agua en exceso, sino para regular su distribución, reducir la movilidad del agua libre y favorecer un mejor comportamiento estructural del material.

Los límites de consistencia refuerzan este comportamiento. El límite líquido disminuye de 42.00% en estado natural a 40.10% con la mayor dosificación de silano, lo que indica una menor cantidad de agua necesaria para alcanzar el estado líquido. El límite plástico se incrementa ligeramente de 15.90% a 16.50%, ampliando el rango de trabajabilidad del suelo, mientras que el índice de plasticidad se reduce progresivamente de 26.10% a 23.60%, evidenciando un suelo menos plástico, menos expansivo y menos susceptible a variaciones de humedad.

En conjunto, los resultados demuestran que la aplicación de silano hidrolizado mejora las propiedades hidráulicas y mecánicas del suelo, al reducir su permeabilidad, controlar la plasticidad y limitar el comportamiento expansivo de los finos. En consecuencia, el suelo tratado presenta mayor estabilidad, mejor respuesta frente a cargas y menor riesgo de deformaciones, características deseables para infraestructura hidráulica, especialmente en



reservorios de almacenamiento de agua, donde se requiere durabilidad y eficiencia en el control de infiltraciones.

5.2 Contratación de hipótesis

OE1: Determinar la influencia de silano hidrolizado en la permeabilidad del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural, en el distrito de Haquira - 2024.

En primer lugar, se evaluó la capacidad de impermeabilización del suelo natural en el fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en estudio, obteniéndose lo siguiente:

Tabla 25 — Evaluación de la capacidad de impermeabilización del suelo natural en el fondo y talud de reservorio según dosificación de silano hidrolizado

Estructura	Dosificación de silano	Promedio de infiltración (cm/h)	Desviación estándar	Desv. error	Límite inferior	Límite superior
Fondo de reservorio	0.00 L/m ²	2.56	0.23	0.10	2.28	2.84
	1.25 L/m ²	0.87	0.13	0.06	0.71	1.03
	1.50 L/m ²	0.03	0.01	0.01	0.01	0.04
Talud de reservorio	0.00 L/m ²	2.35	0.23	0.10	2.07	2.64
	1.25 L/m ²	1.25	0.12	0.06	1.10	1.41
	1.50 L/m ²	0.03	0.02	0.01	0.01	0.05

El suelo en el fondo del reservorio tiene una infiltración promedio alta de 2.56 cm/h, lo cual indica que, el suelo natural tiene una permeabilidad considerable, lo que resultaría una pérdida significativa de agua. No obstante, cuando se da la dosificación de 1.25 L/m² el promedio de infiltración disminuye a 0.87 cm/h, esto demuestra que la dosificación más baja de silano hidrolizado aparentemente muestra efectividad para reducir la permeabilidad del suelo.

Incluso, el límite superior del intervalo de confianza de 1.03 cm/h evidencia que está muy por debajo del promedio del grupo de control, lo que demuestra una diferencia. En cuanto a la dosificación de 1.50 L/m² el promedio de infiltración cae a un valor casi nulo de 0.03 cm/h. La variabilidad promedio (desviación estándar) es bajo lo que representa que el efecto de la impermeabilización es consistente entre grupos; esto refleja que la dosis de 1.50 L/m² es considerablemente más afectiva.

El suelo en el talud del reservorio presenta una infiltración promedio alta de 2.35 cm/h, lo cual confirma que el suelo natural en el talud también presenta permeabilidad. Sin embargo,

cuando se aplica la dosificación de 1.25 L/m² el promedio de infiltración disminuye 1.25 cm/h, lo que evidencia que la dosificación más baja de silano hidrolizado muestra descriptivamente efectividad para reducir la permeabilidad del suelo. En cuanto a la dosificación de 1.50 L/m² la infiltración disminuye a 0.03 cm/h, un valor mínimo al igual que, en el fondo del reservorio, lo que representa que a dosis más altas se logra una mejor impermeabilización.

En segundo lugar, se analizó el efecto de silano hidrolizado con una dosificación de 1.25 L/m² sobre la permeabilidad del suelo natural en el fondo y talud del reservorio. Para garantizar la validez del análisis paramétrico, se verificó el supuesto de normalidad de la distribución de los datos de permeabilidad para una dosificación al 1.25 L/m². De acuerdo a la cantidad de datos por ensayo, se aplicó la prueba de Shapiro-Will, pues es una prueba robusta para muestras pequeñas, a fin de determinar si el grupo control y la dosificación de 1.25 L/m² siguen una distribución normal.

Tabla 26 — Resultados del test de Shapiro-Wilk para la normalidad de la infiltración del suelo en el fondo y talud tras dosificación de 1.25 L/m²

Estructura / Dosificación de silano		Shapiro-Wilk			Normalidad
		Estadístico	gl	Sig.	
Fondo	Grupo control	0.97	5.00	0.86	Sí
	Dosificación al 1.25 L/m ²	0.93	5.00	0.56	Sí
Talud	Grupo control	0.98	5.00	0.93	Sí
	Dosificación al 1.25 L/m ²	0.81	5.00	0.09	Sí

Según los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk, tanto en la dosificación del grupo control, así como en la dosificación de 1.25 L/m² son mayores de 0.05, esto significa que los grupos analizados siguen una distribución normal o gaussiana. Para el contraste de hipótesis relacionados a este objetivo se aplicó la prueba paramétrica de ANOVA.

Para garantizar la validez del análisis de varianza (ANOVA), es clave verificar el supuesto de homogeneidad de varianzas. Esta condición considera la igualdad de la variabilidad de los datos en todos los grupos experimentales. Se aplicó el estadístico de Levene:



Tabla 27 — Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la infiltración del suelo con una dosificación al 1.25 L/m²

Residuos	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.	Homogeneidad
Fondo	0.50	1.00	8.00	0.50	Sí
Talud	0.61	1.00	8.00	0.46	Sí

Según los resultados, el valor de significancia para la infiltración en el fondo fue de 0.50 y en el talud de 0.46. Considerando que ambos valores son superiores al valor crítico de 0.05, se verifica el supuesto de homogeneidad de varianzas tanto en el fondo como en el talud del reservorio.

Para determinar si la dosificación de silano hidrolizado al 1.25 L/m² tiene una influencia significativa en la permeabilidad del suelo se aplicó un ANOVA, este análisis permitió comparar las medias de permeabilidad de los grupos de tratamiento de control y de 1.25 L/m².

Tabla 28 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio

ANOVA - Fondo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	7.14	1.00	7.14	208.32	0.00
Dentro de grupos	0.27	8.00	0.03		
Total	7.41	9.00			

Según los resultados, $F=208.32$ con una significancia $>0,00$; siendo este menor del 0.05, se concluye que existe diferencia estadística significativa entre la media de permeabilidad del grupo de control y la dosificación de 1.25 L/m². Por lo que se confirma que el silano hidrolizado tiene una influencia significativa en la impermeabilización del fondo del reservorio.

Tabla 29 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el talud de reservorio

ANOVA - talud	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3.05	1.00	3.05	89.84	0.00
Dentro de grupos	0.27	8.00	0.03		
Total	3.32	9.00			

Según los resultados, $F=89.84$ con una significancia >0.00 ; siendo este menor del 0.05, se concluye que existe diferencia estadística significativa entre la media de permeabilidad del grupo de control y la dosificación de 1.25 L/m². Por lo que se confirma que el silano hidrolizado tiene una influencia significativa en la impermeabilización del talud del reservorio.

En tercer lugar, se analizó el efecto del silano hidrolizado con una dosificación de 1.50 L/m² sobre la permeabilidad del suelo natural en el fondo y talud del reservorio. Con la finalidad de garantizar la validez del análisis paramétrico, se verificó el supuesto de normalidad de la distribución de los datos de permeabilidad para una dosificación al 1.50 L/m². De acuerdo a la cantidad de datos por ensayo, se aplicó la prueba de Shapiro-Will, pues es una prueba robusta para muestras pequeñas, a fin de determinar si el grupo control y la dosificación de 1.50 L/m² siguen una distribución normal.

Tabla 30 — Resultados del test de Shapiro-Wilk para la normalidad de la infiltración del suelo en el fondo y talud tras dosificación de 1.50 L/m²

Dosificación de silano		Shapiro-Wilk			Normalidad
		Estadístico	gl	Sig.	
Fondo	Grupo control	0.97	5.00	0.86	Sí
	Dosificación al 1.50 L/m ²	0.81	5.00	0.09	Sí
Talud	Grupo control	0.98	5.00	0.93	Sí
	Dosificación al 1.50 L/m ²	0.77	5.00	0.04	No

La tabla anterior presenta los resultados de la prueba de normalidad para cada uno de los grupos analizados. Como se puede observar, los valores de significancia (Sig.) para el grupo de control y la dosificación de 1.50 L/m² en el fondo de reservorio, así como para el grupo de control en el talud, son todos superiores a 0.05. Esto refleja que la distribución de los datos en estos grupos es normal, cumpliendo con el supuesto de la prueba. Sin embargo, el valor de significancia para la dosificación de 1.50 L/m² en el talud fue de 0.04. Aunque este valor es ligeramente inferior al umbral de 0.05, se considera un incumplimiento del supuesto básico.

Dado que el ANOVA es una prueba robusta a este tipo de desviaciones, especialmente cuando, como en el presente caso, el tamaño de las muestras es iguales en todos los grupos, se decidió proceder con la aplicación de esta prueba paramétrica. Adicionalmente, se verificó el supuesto de homogeneidad de varianzas. Esta condición considera la igualdad de la variabilidad de los datos en todos los grupos experimentales. Se aplicó el estadístico de Levene:

Tabla 31 — Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la infiltración del suelo con una dosificación al 1.50 L/m²

Residuos	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.	Homogeneidad
Fondo	4.46	1.00	8.00	0.07	Sí
Talud	5.09	1.00	8.00	0.05	Sí

Según los resultados, el valor de significancia para la infiltración en el fondo fue de 0.07 y en el talud de 0.05. Considerando que ambos valores son superiores al valor crítico de 0.05, se verifica el supuesto de homogeneidad de varianzas tanto en el fondo como en el talud del reservorio.

Para determinar si la dosificación del silano hidrolizado al 1.50 L/m² tiene una influencia significativa en la permeabilidad del suelo se aplicó un ANOVA, este análisis permitió comparar las medias de permeabilidad de los grupos de tratamiento de control y de 1.50 L/m².



Tabla 32 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio

ANOVA - fondo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	16.04	1.00	16.04	621.71	0.00
Dentro de grupos	0.21	8.00	0.03		
Total	16.24	9.00			

Según los resultados, $F=621.71$ con una significancia >0.00 ; siendo este menor del 0.05, se concluye que existe diferencia estadística significativa entre la media de permeabilidad del grupo de control y la dosificación de 1.50 L/m². Por lo que se confirma que el silano hidrolizado tiene una influencia significativa en la impermeabilización del fondo del reservorio.

Tabla 33 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el talud de reservorio

ANOVA - talud	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	13.49	1.00	13.49	513.11	0.00
Dentro de grupos	0.21	8.00	0.03		
Total	13.70	9.00			

Según los resultados, $F=513.11$ con una significancia >0.00 ; siendo este menor del 0.05, se concluye que existe diferencia estadística significativa entre la media de permeabilidad del grupo de control y la dosificación de 1.50 L/m². Por lo que se confirma que el silano hidrolizado tiene una influencia significativa en la impermeabilización del talud del reservorio.

En función de los resultados del análisis de varianza (ANOVA), donde se obtuvo un valor de significancia $p < 0.05$ tanto para el fondo como para el talud del reservorio, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

En consecuencia, se concluye que la dosificación de silano hidrolizado influye de manera estadísticamente significativa en la permeabilidad del suelo natural del fondo y talud del reservorio de almacenamiento de agua, cumpliéndose el objetivo específico 1.

OE2: Determinar la influencia de silano hidrolizado en el grado de compactación natural del suelo en el fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural, en el distrito de Haquira -2024

Con la finalidad de aplicar la prueba de análisis de varianza (ANOVA), se verificó los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de varianzas (homocedasticidad), de cumplirse estos supuestos, se permitirá asegurar la validez de los resultados del ANOVA y la confiabilidad de las inferencias estadísticas.

Tabla 34 — Resultados del test de Shapiro-Wilk para la normalidad de la compactación de campo en el fondo y talud tras dosificación de silano hidrolizado

Residuos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.
Compactación de campo (Fondo)	0.96	15.00	0.73
Compactación de campo (Talud)	0.95	15.00	0.46

Dado que el valor significancia de 0.73 para el fondo y 0.46 para el talud son mayores que el valor crítico de 0.05, se evidencia que se cumple el supuesto de normalidad en los residuos, para ambos.

Tabla 35 — Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la compactación de campo

Estructura	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.	Homogeneidad
Fondo	0.69	2.00	12.00	0.52	Sí
Talud	1.73	2.00	12.00	0.22	Sí

Se realizó la prueba de Levene para evaluar el supuesto de homocedasticidad. Los resultados indican que la significancia para el fondo es de 0.52 y para el talud de 0.22. En ambos casos, el valor de p es mayor que 0.05, lo que demuestra que las varianzas de los grupos son homogéneas. Con esto se validó el uso del ANOVA para comparar las medias de los diferentes grupos de tratamiento. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:



Tabla 36 — ANOVA para la compactación del suelo en el fondo de reservorio

ANOVA (Fondo)	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0.002	2.00	0.001	7241.62	0.00
Dentro de grupos	0.00	12.00	0.00		
Total	0.002	14.00			

Según los resultados, $F=7241.62$ con una significancia >0.00 ; siendo este menor del 0.05, se concluye que existe diferencia estadística significativa entre la media de la compactación del grupo de control y la dosificación de silano hidrolizado. Por lo que se confirma que el silano hidrolizado con dosificaciones de 1.25 L/m² y 1.50 L/m² tienen una influencia significativa en la compactación del fondo del reservorio.

Tabla 37 — ANOVA para la compactación del suelo en el talud de reservorio

ANOVA (Talud)	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0.001	2.00	0.00	5099.78	0.00
Dentro de grupos	0.00	12.00	0.00		
Total	0.001	14.00			

Según los resultados, $F=5099.78$ con una significancia >0.00 ; siendo este menor del 0.05, se concluye que existe diferencia estadística significativa entre la media de la compactación del grupo de control y la dosificación de silano hidrolizado. Por lo que se confirma que el silano hidrolizado con dosificaciones de 1.25 L/m² y 1.50 L/m² tienen una influencia significativa en la compactación del talud del reservorio.

Tabla 38 — Comparaciones múltiples con Tukey de la compactación del suelo en el fondo de reservorio

(I) Dosificación de silano		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.
Grupo de control	Dosificación al 1.25 L/m ²	.0210600*	0.00	0.00
	Dosificación al 1.50 L/m ²	.0222800*	0.00	0.00
Dosificación al 1.25 L/m ²	Dosificación al 1.50 L/m ²	.0012200*	0.000208	0.00

Los resultados del análisis post hoc de Tukey para la compactación del fondo del reservorio confirman que existen diferencias estadísticamente significativas entre todos los pares de grupos evaluados (Sig. < 0.05). Esto indica que la compactación del suelo en el grupo de control es significativamente diferente tras la dosificación de 1.25 L/m² y tras la dosificación de 1.50 L/m². Asimismo, la prueba reveló que la compactación alcanzada con la dosificación de 1.50 L/m² es significativamente diferente y mayor que la obtenida con la dosificación de 1.25 L/m².

Tabla 39 — Comparaciones múltiples con Tukey de la compactación del suelo en el talud de reservorio

(I) Dosificación de silano		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.
Grupo de control	Dosificación al 1.25 L/m ²	.0144800*	0.0001858	0.00
	Dosificación al 1.50 L/m ²	.0175800*	0.0001858	0.00
Dosificación al 1.25 L/m ²	Dosificación al 1.50 L/m ²	.0031000*	0.0001858	0.00

En el análisis post hoc de Tukey para el talud del reservorio se evidencia las diferencias estadísticamente significativas presente entre todos los pares de grupos (Sig. < 0.05). La compactación del grupo de control es significativamente diferente a la de los grupos tratados. Asimismo, se encontró una diferencia significativa entre la dosificación de 1.25 L/m² y la de 1.50 L/m², con esto se evidencia que una mayor dosificación de silano hidrolizado se asocia con un cambio significativo en la compactación del suelo.

Tabla 40 — Subconjuntos homogéneos para la compactación del suelo en el fondo de reservorio

Dosificación de silano	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Dosificación al 1.50 L/m ²	5.00	0.80858		
Dosificación al 1.25 L/m ²	5.00		0.80980	
Grupo de control	5.00			0.83086
Sig.		1.00	1.00	1.00



Los subconjuntos homogéneos para la compactación del fondo del reservorio, confirma los hallazgos de la prueba de Tukey. Se observa que cada nivel de dosificación de silano hidrolizado y el grupo de control se encuentran en un subconjunto separado. Esto evidencia que no hay dos grupos cuyas medias de compactación sean estadísticamente similares. Cada tratamiento (incluyendo el no tratamiento) produce un efecto significativamente diferente en la compactación del suelo. En este caso la dosificación de 1.50 L/m² resulta en la menor compactación, seguida por la de 1.25 L/m², mientras que el grupo de control presenta la mayor compactación.

Tabla 41 — Subconjuntos homogéneos para la compactación del suelo en el talud de reservorio

Dosificación de silano	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Dosificación al 1.50 L/m ²	5.00	0.649620		
Dosificación al 1.25 L/m ²	5.00		0.65272	
Grupo de control	5.00			0.66720
Sig.		1.00	1.00	1.00

Estos resultados también refuerzan las conclusiones del análisis de Tukey. Al igual que en el fondo, la prueba de subconjuntos homogéneos separa a los tres grupos en subconjuntos distintos. Esto significa que las medias de compactación del grupo de control, la dosificación de 1.25 L/m² y la de 1.50 L/m² son significativamente diferentes entre sí. La compactación del talud presenta un patrón donde el grupo de control tiene la mayor compactación, seguido por las dosificaciones de 1.25 L/m² y 1.50 L/m², respectivamente.

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza (ANOVA), donde se obtuvo una significancia $p < 0.05$ en el fondo y en el talud del reservorio, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

Por lo tanto, se concluye que la dosificación de silano hidrolizado influye significativamente en el grado de compactación natural del suelo del fondo y talud del reservorio, validándose el objetivo específico 2.



OE3: Determinar la influencia de silano hidrolizado en las características físicas del suelo del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural, en el distrito de Haquira -2024.

Tabla 42 — Características físicas del suelo en función de la dosificación de silano hidrolizado

Características físicas	Detalle	Dosificación		
		Suelo natural	1.25 L/m ²	1.50 L/m ²
Granulometría	Tamiz N° 10	40.91	40.91	40.91
	Tamiz N° 40	28.91	28.91	28.91
	Tamiz N° 200	13.60	13.60	13.60
Límites de Atterberg	Límite líquido	41.98	40.85	40.05
	Límite plástico	15.92	16.27	16.48
	Índice plástico	26.10	24.60	23.60
Humedad	Contenido de humedad	7.43	10.00	10.46

En esta tabla se compara las características físicas del suelo natural con las del suelo tratado con dos dosificaciones diferentes de silano hidrolizado: 1.25 L/m² y 1.50 L/m². En el caso de la granulometría, se observa que, la adición de silano hidrolizado no mostró un efecto en la distribución del tamaño de las partículas, ya que el porcentaje de material que pasa por los tamices N° 10, N° 40 y N° 200 se mantuvo constante en los tres casos. Esto se evidencia en los valores idénticos de 40.91%, 28.91% y 13.60%, respectivamente.

Para el caso de los límites de Atterberg, se observa que, en el límite líquido (LL), la adición de silano hidrolizado causa una ligera disminución del límite líquido. Para la dosificación de 1.25 L/m², el LL baja de 41.98% a 40.85% y, con la dosificación de 1.50 L/m², baja aún más a 40.05%. En el límite plástico (LP), se observa un ligero aumento de este con la adición de silano hidrolizado. El LP del suelo natural es de 15.92%, mientras que el del suelo tratado con 1.25 L/m² es de 16.27% y con 1.50 L/m² es de 16.48%. Se calculó el índice de plasticidad (IP), se observa que el índice de plasticidad disminuye a medida que aumenta la dosificación de silano hidrolizado. El IP del suelo natural es de 26.10%, mientras que el del suelo tratado con 1.25 L/m² es de 24.60% y con 1.50 L/m² es de 23.60%. La disminución del IP indica que el silano hidrolizado reduce la plasticidad del suelo.

Por último, en caso de la humedad, el contenido de este en el suelo aumenta con la adición de silano hidrolizado. El suelo natural tiene un contenido de humedad de 7.43%, mientras que el suelo tratado con silano hidrolizado con 1.25 L/m² tiene un contenido de humedad de 10.00% y con 1.50 L/m² es de 10.46%. Esto evidencia que el silano hidrolizado aumenta la capacidad del suelo para retener humedad.

En función del análisis comparativo de las características físicas del suelo, se rechaza la hipótesis nula (H₀) y se acepta la hipótesis alternativa (H₁), concluyéndose que el silano hidrolizado influye significativamente en las propiedades físicas del suelo, particularmente en los límites de Atterberg y el contenido de humedad, cumpliéndose el objetivo específico 3.

OG: Determinar la influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira – 2024

Para garantizar la validez del análisis de varianza (ANOVA), es clave verificar el supuesto de homogeneidad de varianzas. Esta condición considera la igualdad de la variabilidad de los datos en todos los grupos experimentales. Se aplicó el estadístico de Levene:

Tabla 43 — Test de Levene para la homogeneidad de varianzas de la infiltración del suelo

Residuos	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.	Homogeneidad
Fondo	2.84	2.00	12.00	0.10	Sí
Talud	3.76	2.00	12.00	0.05	Sí

Según los resultados, el valor de significancia para la infiltración en el fondo fue de 0.10 y en el talud de 0.05. Considerando que ambos valores son superiores al valor crítico de 0.05, se verifica el supuesto de homogeneidad de varianzas tanto en el fondo como en el talud del reservorio. Con estos resultados se validó el uso de la prueba de Tukey para la comparación de grupos según las dosificaciones de silano según estructura.



Para determinar si la dosificación de silano hidrolizado tiene una influencia significativa en la permeabilidad del suelo se aplicó un ANOVA, este análisis permitió comparar las medias de permeabilidad de los grupos de tratamiento y de control.

Tabla 44 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio

ANOVA - Fondo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	16.63	2.00	8.32	363.00	0.00
Dentro de grupos	0.28	12.00	0.02		
Total	16.91	14.00			

Según los resultados, $F=363.00$ con una significancia >0.00 ; siendo este menor del 0.05, se concluye que existe diferencia estadística significativa entre la media de permeabilidad del grupo de control y la dosificación de silano hidrolizado. Por lo que se confirma que el silano hidrolizado tiene una influencia significativa en la impermeabilización del fondo del reservorio.

Tabla 45 — ANOVA para la permeabilidad del suelo en el talud de reservorio

ANOVA - Talud	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	13.50	2.00	6.75	297.48	0.00
Dentro de grupos	0.27	12.00	0.02		
Total	13.78	14.00			

Según los resultados, $F=297.48$ con una significancia >0.00 ; siendo este menor del 0.05, se concluye que existe diferencia estadística significativa entre la media de permeabilidad del grupo de control y la dosificación de silano hidrolizado. Por lo que se confirma que el silano hidrolizado tiene una influencia significativa en la impermeabilización del talud del reservorio.

Tras el análisis ANOVA se confirmó la existencia de una diferencia significativa entre las medias de los grupos, por lo cual se realizó la prueba post-hoc de Tukey, encontrando lo siguiente:



Tabla 46 — Comparaciones múltiples con Tukey de la infiltración promedio del suelo en el fondo de reservorio

(I) Dosificación de Silano		Diferencia de medias (I-J)	Desv. error	Sig.
Grupo control	Dosificación al 1.25 L/m ²	1.690000*	0.095731	0.00
	Dosificación al 1.50 L/m ²	2.532600*	0.095731	0.00
Dosificación al 1.25 L/m ²	Dosificación al 1.50 L/m ²	0.842600*	0.095731	0.00

De acuerdo a estos resultados, se evidencia que existe diferencia de medias entre el grupo control y la dosificación 1.25 L/m² con una significancia de 0.00, por lo que se confirma que la dosificación de 1.25 L/m² tiene un efecto significativo en la reducción de la permeabilidad del suelo en comparación con el grupo control. Así también, la diferencia entre medias fue de 1.69 cm/h.

La dosificación de 1.50 L/m² también muestra una reducción significativa de la permeabilidad del suelo en comparación con el grupo de control, la diferencia entre medias fue de 2.35 cm/h.

En cuanto a la comparación de dosificaciones, la diferencia de medias es de 0.84 cm/h con una significancia de 0.00 lo que significa que la dosificación de 1.50 L/m² es significativamente más efectiva que la dosificación de 1.25 L/m² para reducir la permeabilidad.

Tabla 47 — Subconjuntos homogéneos para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio

Dosificación de silano	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Dosificación al 1.50 L/m ²	5.00	0.02740		
Dosificación al 1.25 L/m ²	5.00		0.87000	
Grupo control	5.00			2.5600
Sig.		1.00	1.00	1.00



Cada grupo (1.50 L/m², 1.25 L/m² y grupo de control) se encuentran en subgrupos distintos, lo que significa que las tres dosificaciones tienen efectos estadísticamente distintos entre sí sobre la permeabilidad del suelo en el fondo del reservorio.

Tabla 48 — Comparaciones múltiples con Tukey de la infiltración promedio del suelo en el talud de reservorio

(I) Dosificación de silano		Diferencia de medias (I-J)	Desv. error	Sig.
Grupo control	Dosificación al 1.25 L/m ²	1.104000*	0.095285	0.00
	Dosificación al 1.50 L/m ²	2.323200*	0.095285	0.00
Dosificación al 1.25 L/m ²	Dosificación al 1.50 L/m ²	1.219200*	0.095285	0.00

De acuerdo a estos resultados, se evidencia que existe diferencia de medias entre el grupo control y la dosificación 1.25 L/m² con una significancia de 0.00, por lo que se confirma que la dosificación de 1.25 L/m² tiene un efecto significativo en la reducción de la permeabilidad del suelo en comparación con el grupo control. Así también, la diferencia entre medias fue de 1.104 cm/h.

La dosificación de 1.50 L/m² también muestra una reducción significativa de la permeabilidad del suelo en comparación con el grupo de control, la diferencia entre medias fue de 2.32 cm/h.

En cuanto a la comparación de dosificaciones, la diferencia de medias es de 1.22 cm/h con una significancia de 0.00, lo que significa que la dosificación de 1.50 L/m² es significativamente más efectiva que la dosificación de 1.25 L/m² para reducir la permeabilidad.



Tabla 49 — Subconjuntos homogéneos para la permeabilidad del suelo en el fondo de reservorio

Dosificación de silano	N	Subconjunto para alfa = 0.05		
		1	2	3
Dosificación al 1.50 L/m ²	5.00	0.03080		
Dosificación al 1.25 L/m ²	5.00		1.25000	
Grupo control	5.00			2.35400
Sig.		1.00	1.00	1.00

Cada grupo (1.50 L/m², 1.25 L/m² y grupo de control) se encuentran en subgrupos distintos, lo que significa que las tres dosificaciones tienen efectos estadísticamente distintos entre sí sobre la permeabilidad del suelo en el talud del reservorio.

En función de los resultados globales del análisis de varianza (ANOVA), donde se obtuvo un valor de significancia $p < 0.05$ tanto en el fondo como en el talud del reservorio, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

En consecuencia, se concluye que la dosificación de silano hidrolizado influye de manera estadísticamente significativa en la impermeabilización del fondo y talud del reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural, cumpliéndose el objetivo general de la investigación.

5.3 Discusión

Los resultados de este estudio evidencian que la aplicación de silano hidrolizado en una dosificación de 1.50 L/m² reduce de manera significativa la permeabilidad del suelo natural, alcanzando valores del orden de 0.03 cm/h tanto en el talud como en el fondo del reservorio, en contraste con las elevadas tasas registradas en el suelo sin tratamiento, que alcanzan 2.35 cm/h en el talud y 2.56 cm/h en el fondo. Esta disminución sustancial demuestra la alta eficiencia de silano hidrolizado como agente impermeabilizante, capaz de modificar las propiedades hidráulicas del suelo mediante la formación de una capa hidrofóbica que limita el flujo de agua a través de su estructura porosa.

De acuerdo con la Tabla 5 — Tasas de infiltración de los suelos para obras de ingeniería civil (ASTM D3385), el suelo sin tratamiento se clasifica dentro de la categoría de alta infiltración,



propia de suelos granulares con buena permeabilidad. En cambio, tras la aplicación de silano hidrolizado, el suelo tratado presenta tasas de infiltración muy bajas (< 0.13 cm/h), lo que lo ubica en la categoría de suelos muy impermeables, condición altamente favorable para aplicaciones como la impermeabilización de reservorios y el control de pérdidas por filtración.

Asimismo, al relacionar los resultados con la Tabla 4 — Clases de permeabilidad de los suelos para obras de ingeniería civil (ASTM D2434), se evidencia que el suelo natural se comporta como un material permeable a semipermeable, mientras que el suelo tratado con silano hidrolizado alcanza valores correspondientes a la categoría de impermeable, confirmando que el tratamiento induce un cambio significativo en la clase hidráulica del suelo.

Estos hallazgos son coherentes con estudios internacionales revisados. Wan (2024) reportó que el uso de silanos orgánicos en sistemas impermeables inhibe tanto el ascenso capilar como la infiltración descendente, generando un bloqueo unidireccional del flujo de agua en subrasantes, comportamiento que concuerda con la marcada reducción de infiltración observada en el presente estudio. De manera complementaria, Hou et al. (2022), mediante simulaciones moleculares, demostraron que los alcoxisilanos generan un efecto barrera que reduce el transporte de agua e iones agresivos en matrices minerales, explicando el desempeño hidráulico observado en el suelo tratado, atribuible a la formación de enlaces covalentes entre el silano y los minerales del suelo.

En la misma línea, Liu (2023) evidenció que la incorporación de silano en recubrimientos cementicios reduce significativamente el coeficiente de absorción de agua, reforzando la hipótesis de que los compuestos silánicos, al integrarse con matrices minerales, disminuyen la movilidad del agua, mecanismo consistente con los resultados obtenidos en esta investigación.

Por otro lado, estudios orientados a la estabilización de suelos, como el de Harshit, Satish y Kant (2022), indican que el uso de estabilizantes innovadores incrementa la durabilidad del suelo frente a la acción del agua. De manera similar, aunque empleando un aditivo distinto, el presente estudio confirma que el silano hidrolizado modifica favorablemente el comportamiento hidráulico del suelo, reduciendo su vulnerabilidad a la infiltración y mejorando su estabilidad para fines de ingeniería.



A nivel nacional, investigaciones como las de Quispe (2023) y Fuentes (2021) destacan la importancia del control de la infiltración para reducir riesgos hidráulicos y mejorar la capacidad de soporte del suelo. En concordancia con estos antecedentes, los resultados obtenidos demuestran que el silano hidrolizado actúa como un aditivo altamente eficaz para reducir la permeabilidad del suelo, contribuyendo a una mayor seguridad estructural y durabilidad en proyectos de ingeniería civil.

Asimismo, estudios peruanos orientados a la impermeabilización de reservorios y coberturas (Gálvez y Valderrama, 2022; Rafael, 2022; Viza, 2022) resaltan la necesidad de emplear tecnologías avanzadas para minimizar pérdidas por filtración. En este contexto, la aplicación directa de silano hidrolizado sobre el suelo se presenta como una alternativa técnica viable, eficiente y económicamente favorable, especialmente en proyectos donde el uso de geomembranas u otros recubrimientos resulta poco práctico.

En síntesis, al relacionar los resultados experimentales con las clasificaciones normativas de permeabilidad e infiltración (Tablas 4 y 5), se confirma que el tratamiento con silano hidrolizado transforma un suelo originalmente permeable en un material funcionalmente impermeable, validando su aplicabilidad en la impermeabilización de reservorios, estabilización de taludes y mejoramiento de subrasantes. No obstante, se recomienda complementar estos resultados con estudios de desempeño a largo plazo bajo condiciones ambientales variables para garantizar su efectividad en campo.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se concluyó que el silano hidrolizado reduce de manera significativa la permeabilidad del suelo natural tanto en el fondo como en los taludes del reservorio, demostrando su eficacia como agente impermeabilizante en suelos naturales. La aplicación del producto permitió transformar un suelo inicialmente permeable en una superficie con comportamiento hidráulico altamente restrictivo, cumpliendo el objetivo general de la investigación.

La dosificación de 1.50 L/m² presentó el mejor desempeño hidráulico, alcanzando valores de infiltración cercanos a 0.03 cm/h, lo que evidencia un comportamiento prácticamente impermeable. Desde el punto de vista técnico, esta dosificación se identifica como la óptima, al lograr una reducción sustancial de las pérdidas de agua por infiltración, superando ampliamente a la dosificación de 1.25 L/m² y al suelo no tratado.

El análisis estadístico mediante ANOVA ($p < 0.05$) confirmó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, validando que la dosificación de silano hidrolizado influye de forma directa y positiva en la impermeabilización del suelo. En consecuencia, los resultados obtenidos cuentan con respaldo estadístico suficiente para su aplicación en condiciones reales de obra.

En relación con el comportamiento mecánico del suelo, el silano hidrolizado modifica ligeramente el grado de compactación, generando una reducción moderada atribuida a la formación de una capa hidrofóbica en las partículas del suelo. Sin embargo, esta variación no compromete la estabilidad estructural, sino que contribuye a una menor porosidad efectiva y a una mejora del comportamiento hidráulico del suelo tratado.

El tratamiento con silano hidrolizado no altera la granulometría del suelo, preservando su estructura básica, pero sí mejora sus propiedades físicas, evidenciándose una reducción del límite líquido y del índice de plasticidad. Esta disminución del potencial plástico y expansivo



favorece la estabilidad del suelo, especialmente en reservorios de tierra expuestos a ciclos de humedad y secado.

Desde una perspectiva técnica y operativa, se concluye que la dosificación de 1.50 L/m² es técnicamente viable y aplicable para la impermeabilización de reservorios rurales de suelo natural en zonas altoandinas, ya que mejora la eficiencia hidráulica, reduce las pérdidas de agua y contribuye a la prolongación de la vida útil de la infraestructura.

Finalmente, los resultados globales confirman que el uso de silano hidrolizado constituye una alternativa eficaz, sostenible y de bajo impacto constructivo frente a métodos tradicionales de impermeabilización, representando un aporte relevante para la ingeniería civil en proyectos de almacenamiento de agua destinados a riego y abastecimiento en zonas rurales.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda implementar el uso de silano hidrolizado en una dosificación de 1.50 L/m² para la impermeabilización de reservorios de tierra en el distrito de Haqira y en zonas con suelos de características granulométricas y plásticas similares, ya que esta concentración demostró la mayor reducción de infiltración, alcanzando valores cercanos a 0.03 cm/h, lo que corresponde a suelos clasificados como muy impermeables según la normativa ASTM.

Durante la etapa constructiva, se recomienda que la aplicación de silano se realice de manera controlada y uniforme sobre el fondo y los taludes del reservorio, utilizando sistemas de aspersión o pulverización de baja presión, a fin de evitar zonas con tratamiento desigual que puedan generar filtraciones localizadas, tal como se evidenció en la sensibilidad del suelo a variaciones de dosificación.

Asimismo, se recomienda controlar el grado de compactación del suelo tratado, manteniéndolo dentro de un rango óptimo de 90 % a 95 % del Proctor estándar, considerando que los resultados del estudio mostraron una ligera disminución del grado de compactación con el incremento de la dosificación de silano, sin afectar la estabilidad estructural. Este control permitirá asegurar un equilibrio adecuado entre impermeabilidad y resistencia mecánica del reservorio.

Se recomienda también considerar el uso de silano hidrolizado como alternativa técnica a las geomembranas en proyectos rurales o de bajo presupuesto, especialmente en zonas donde la



instalación de revestimientos sintéticos resulta económicamente inviable o técnicamente compleja.

Se recomienda desarrollar investigaciones complementarias que evalúen el comportamiento de silano hidrolizado en diferentes tipos de suelo, especialmente en suelos finos, altamente plásticos o con mayor contenido de arcillas, a fin de ampliar la aplicabilidad de los resultados obtenidos en el presente estudio.

Asimismo, se sugiere analizar otras dosificaciones de silano hidrolizado, tanto inferiores como superiores a 1.50 L/m², con el objetivo de determinar rangos óptimos de aplicación y establecer relaciones costo–eficiencias más precisas.

Se recomienda realizar estudios orientados a evaluar la vida útil del tratamiento impermeabilizante bajo condiciones reales de servicio, considerando la influencia de factores climáticos, cargas hidráulicas, ciclos de humedad–secado y procesos de erosión superficial.

Finalmente, se sugiere desarrollar estudios comparativos de costo–beneficio entre el uso de silano hidrolizado y sistemas tradicionales de impermeabilización, como geomembranas o revestimientos de concreto, a fin de proporcionar criterios técnicos y económicos que faciliten la toma de decisiones en proyectos de infraestructura hidráulica rural.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, J. D.; ALI, N.; MOHAMED, R. N.; ABDULLAHI, M. M. A. The effect of quarry dust with cement by-products on properties of concrete. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 2018, vol. 30, no. 3, pp. 415–428. <https://doi.org/10.11113/mjce.v30n3.517>

ACOSTA MONTEODORO, Marcos. *Capacitación, asistencia técnica y asesoría externa en investigación científica*. Lima: Editorial Red-Mundo, 2023.

ACOSTA MONTEODORO, R. La población son unidades independientes a las cuales se orienta la investigación. *Revista de Métodos de Investigación*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 45–60.

AMADI, A. A. Enhancing durability of quarry fines modified black cotton soil subgrade with cement kiln dust stabilization. *Transportation Geotechnics*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.02.002>

AYCAYA, Edson; CHOQUE, David. *Efecto del uso de aditivos en el diseño de reservorio*. 2022. Tesis de título profesional – Universidad César Vallejo, Cajamarca. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/108872/Aycaya_REJ-Choque_SDJ-SD.pdf (consulta: 26 marzo 2024).

AZIZ, M.; KHAN, R.; ALI, S. Recent advances in silane coupling agents and their emerging applications. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, no. 12, pp. 7890–7905. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05678-9>

BRIOSO SÁNCHEZ, Olinda Milita. *Mejoramiento de material granular de cantera para afirmado con aditivo Terrasil en la carretera Pipus–Chontapampa*. 2021. Tesis de título profesional – Universidad César Vallejo, Chachapoyas. Disponible en:



https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/84956/Brioso_SOM-SD.pdf
(consulta: 26 marzo 2024).

CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN. *Manual de impermeabilización en edificaciones.* Santiago de Chile: Gerencia de Suministros, 2023. Disponible en: <https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Manual-de-Impermeabilización-en-Edificaciones.pdf> (consulta: 26 marzo 2024).

CASTEEL, J.; BRIDIER, A. La población es el grupo específico de beneficiados para uso agrícola y consumo humano. *Journal of Agricultural Research*, 2021, vol. 45, no. 3, pp. 123–130.

CHITRAGAR, S. F.; HUGAR, V.; RODRIGUES, R. J.; ADARSH, H. S. Performance evaluation on durability of stabilized black cotton soil for pavement subgrade using chemical additive and lime. En: *Two-day online international conference on green highway construction: a sustainable approach.* Surathkal: National Institute of Technology Karnataka; The Institution of Engineers (India), 2020, vol. I, pp. 117–125. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/375088300> (consulta: 26 marzo 2024).

CONGRESO DE LA REPÚBLICA. *Ley N.º 28221, Ley que regula el derecho por extracción de materiales de los álveos o cauces de los ríos.* Lima: Congreso de la República, 2010. Disponible en: <https://www2.congreso.gob.pe/Sicr/RelatAgenda/proapro.nsf/ProyectosAprobadosPortal/5CC420A9D823C95A052576FF000FC29F> (consulta: 26 marzo 2024).

DEC-CONEAU. *Elaboración y validación de instrumentos de evaluación de competencias profesionales.* Lima: SINEACE, 2017. Disponible en: <https://www.sineace.gob.pe/wp-content/uploads/2017/03/03-Guia-elaboracion-Instrumentos-evaluacion.pdf> (consulta: 26 marzo 2024).

DEPERU.COM. *Vista aérea del centro poblado Patan (Haqira, Cotabambas, Apurímac).* 2023. Disponible en: <https://mapas.deperu.com/Apurímac/cotabambas/haqira/patan/> (consulta: 26 marzo 2024).



DIRECCIÓN GENERAL DE ASUNTOS AMBIENTALES. *Informe técnico N.º 035-2021-MTC/16.02.SODN.DFA.SLLU.* Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2021.

Disponible en:

https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2050487/035518_2021_DIA_N_035-2021.SODN.DFA.SLLU.pdf (consulta: 26 marzo 2024).

EL PERUANO. *Constitución Política del Perú.* Lima: Diario Oficial El Peruano, 1993.

Disponible en: <https://diariooficial.elperuano.pe/pdf/0001/1-constitucion-politica-del-peru-1.pdf> (consulta: 26 marzo 2024).

ETIKAN, I.; MUSA, S. A.; ALKASSIM, R. S. Muestreo intencional: selección intencional de un participante debido a las características y cualidades que posee. *International Journal of Economics and Financial Issues*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 30–35.

EZE-UZOMAKA, O. J.; AGBO, D. Suitability of quarry dust as improvement to cement-stabilized laterite for road bases. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, vol. 15, pp. 1053–1066.

FAO. *Asistencia a los países andinos en la reducción de riesgos y desastres en el sector agropecuario: buenas prácticas de manejo de recursos naturales y fortalecimiento institucional en el contexto del cambio climático. Perú: riego presurizado con microreservorios.* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, s. f. Disponible en: <https://www.fao.org/climatechange/25234-04ee34b31d1fedd1de4b6d27e6594e0b8.pdf> (consulta: 26 marzo 2024).

FUNDACIÓN CEMEX. *El ciclo del agua en la Comunitat Valenciana.* Valencia: Fundación CEMEX, 2007. Disponible en:

https://agroambient.gva.es/estatico/areas/educacion/educacion_ambiental/educ/publicaciones/ciclo_del_agua/cicag/1/1_3_1/index.html (consulta: 25 marzo 2024).

GALETAKIS, M.; SOULTANA, A. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 102, pp. 769–781. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.204>



GÁLVEZ, J.; VALDERRAMA, R. *Análisis comparativo del uso de membranas asfálticas y líquidas para la impermeabilización de coberturas*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2022. Tesis de licenciatura.

GARCÍA, J.; VARGAS, M. El corredor minero Cusco–Arequipa: historia, impacto económico y controversias. *Revista de Minería y Medio Ambiente*, 2024, vol. 15, no. 2, pp. 123–145.

GEOSOLUCIONES DE INGENIERÍA – GEOMEMBRANAS. 3 problemas por la mala impermeabilización de reservorios [video]. 2023. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=EkYZbL7KhrI> (consulta: 26 marzo 2024).

GONZALES ZEVALLOS, Jhonatan Rodrigo. *Estudio comparativo de estabilización química con Terrasil y Permazyme para afirmado del camino vecinal Santiago Pampa–Pampa Yanamayo, Sandia*. 2022. Tesis de título profesional – Universidad César Vallejo. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/> (consulta: 26 marzo 2024).

GONZÁLEZ, J.; PÉREZ, L.; MARTÍNEZ, R. Waterproofing with silanes and siloxanes in cementitious materials. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, no. 10, pp. 1234–1245. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05678-9>

GORNITZKY, A. The importance of reservoir bottom waterproofing to prevent water loss and ensure storage efficiency. *Journal of Water Resources Management*, 2011, vol. 25, no. 7, pp. 1234–1245.

GORNITZKY, A. Waterproofing of reservoir slopes to prevent erosion and water loss. *Journal of Water Resources Management*, 2011, vol. 25, no. 7, pp. 1234–1245.

GURBUZ, A. Marble powder to stabilise clayey soils in sub-bases for road construction. *Road Materials and Pavement Design*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 481–492. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1020845>

GUTIÉRREZ ROSALES, Jessica Milagros; CERON RIVERA, Eduardo Cesar. *Análisis de la optimización del suelo de la base con aditivo químico Terrasil para el diseño de pavimentos industriales del almacén de concentrados mineros Logisminsá*. 2020. Tesis de título profesional – Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.



Disponible en: <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/652276> (consulta: 26 marzo 2024).

HARSHIT, S.; PARIHAR, S.; SRIVASTAVA SHASHI, K. Laboratory investigation of soil stabilization using Terrasil and Zycobond. *AIP Conference Proceedings*, 2022, vol. 2413, art. 030003. <https://doi.org/10.1063/5.0079502>

HERNÁNDEZ, Roberto; MENDOZA, Christian. *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2023.

HERNÁNDEZ, Roberto; FERNÁNDEZ, Carlos; BAPTISTA, Pilar. *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2014.

HIDALGO BRUNA, Mario. *Estabilización de suelos con aditivo Terrasil para el mejoramiento de carretera afirmada Patapampa–Apissi, distrito de Arapa, Azángaro*. 2022. Tesis de título profesional – Universidad César Vallejo. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/107033> (consulta: 26 marzo 2024).

IGNACIO, Juan Andrés. *Bases teóricas para métodos de control de calidad aplicados a los geosintéticos en la plataforma Carachugo 10b para el tratamiento de solución cianurada*. 2018. Tesis de título profesional – Universidad Privada de Trujillo. Disponible en: <http://repositorio.uprit.edu.pe/handle/UPRIT/147> (consulta: 26 marzo 2024).

ILANGOVARA, R.; MAHENDRANA, N.; NAGAMANIB, K. Strength and durability properties of concrete containing quarry rock dust as fine aggregate. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2008, vol. 3, no. 5, pp. 20–26.

INGUNZA, P. y JESSINE, M. Análisis comparativo de la permeabilidad del concreto incorporando aditivos impermeabilizantes cristalizantes frente a aditivos impermeabilizantes hidrofóbicos en reservorios [tesis]. Huánuco: Universidad Nacional de Huánuco, 2021.

INTRANETT. Centro poblado Patan – Haquira. Red de Centros Poblados [en línea]. 2023. Disponible en: <https://www.intranett.info/Apurímac/cotabambas/haquira/patan/>. [Consulta: 12 diciembre 2023].



JONES, R. y LEE, S. Condiciones ambientales: La humedad y la presencia de contaminantes pueden afectar la durabilidad del tratamiento. *Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 45, no. 4, pp. 456–467.

KALCHEFF, I. y MACHEMEHL, C., Jr. Utilization of crushed stone screenings in highway construction. En: *59th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, DC, 1980.

KOGANTI, S. P. y CHAPPIDI, H. R. Effective utilization of quarry dust in flexible pavements as per IRC-37: 2012. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2012, vol. 13, no. 5, pp. 1545–1552.

KUMAR, D. S. y HUDSON, W. Use of quarry fines for engineering and environmental applications. Austin, TX: National Stone Association, Center for Transportation Research, The University of Texas–Austin, 1992.

LEKHA, B. M.; SARANG, G. y SHANKAR, C. A laboratory investigation on black cotton soil stabilized with non traditional stabilizer. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2011, pp. 7–13.

LEKLA, B. M.; GOUTHAM, S. y RAVI SHANKAR, A. V. Laboratory investigation of soil stabilized with nano chemical. En: *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*. Roorkee, India, 22–24 diciembre 2013, pp. 18–25.

LI, B.; ZHOU, M.; FANG, Y.; SONG, P. y KE, G. Self-compacting concrete-filled steel tubes prepared from manufactured sand with a high content of limestone fines. *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 325–328.

LITTLE, D. N. y NAIR, S. Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials. 3rd ed. Texas: Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 2009.

LÓPEZ, M.; PORTILLO, E.; USCA, Á. y VILCA, C. Proyecto de diseño de un reservorio para el abastecimiento con agua potable sector de Nueva Rinconada del distrito San Juan de Miraflores – Lima [tesis de pregrado]. Lima: Universidad San Ignacio de Loyola, 2021.

MANUYAMA SOLSOL, S. J. y NAJAR TANGO, A. M. Estabilización química de suelos arenos limos arcillosos en selva baja: aplicación de aditivo Terrasil para mejoramiento de material



de base en vía de acceso “Villa Milagritos” – San Juan Bautista, Perú [tesis]. Iquitos: Universidad Científica del Perú, 2022. Disponible en: <http://repositorio.ucp.edu.pe/bitstream/handle/UCP/1978/ANDREWN%20MIGUEL%20NAJAR%20TANGOYA%20Y%20SHARON%20JULISSA%20MANUYAMA%20SOLSOL%20-%20TESIS.pdf>

MEDEIROS, M. y HELENE, P. Membranas asfálticas: empleadas comúnmente en cubiertas y espacios subterráneos. *Revista de Construcción*, 2009, vol. 8, no. 2, pp. 45–52.

MEERAVALI, K.; RUBEN, N. y RANGASWAMY, K. Stabilization of soft-clay using nanomaterial: Terrasil. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 27, part 2, pp. 1030–1037. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.384.

MERINO, O. Ley que declara de interés nacional y necesidad pública la creación del distrito de Markansaya, en la provincia de Cotabambas, región Apurímac [en línea]. Congreso de la República, 2021. Disponible en: https://leyes.congreso.gob.pe/Documentos/2016_2021/Proyectos_de_Ley_y_de_Resoluciones_Legislativas/PL07704-20210514.pdf

MERRITT, F. S.; LOFTIN, M. K. y RICKETT, J. T. *Civil engineering handbook*. Florida: University Press of Florida, 1995.

MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (MTC). Estabilización química de suelos: caracterización del estabilizador y evaluación de propiedades de comportamiento del suelo mejorado [en línea]. Lima: MTC, 2004. Disponible en: <https://www.ageecovias.net/files/mtc1109-con-rd-1-Norma-Tecnica-de-Estabilizadores.pdf>

MOLINA CÁRDENAS, José Luis. Optimización del afirmado de la cantera La Campana incorporando TerraSil con propósito de pavimentación en los Jardines de Shangrila – Puente Piedra, Lima 2019 [tesis de título profesional]. Lima: Universidad César Vallejo, 2019. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47987/Molina_CJL-SD.pdf

MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE COTABAMBAS. Haquira [en línea]. 2024. Disponible en: <https://muniprovincialcotabambas.gob.pe/distritos/haquira/> [Consulta: 24 marzo 2024].



NAIK, R.; RUDOLPH, N.; CHUN, Y.; FETHULLAH, C. y BRUCE, W. Use of fly ash and limestone quarry by-products for developing economical self-compacting concrete. En: *Proceedings of the International Congress on Fly Ash Utilisation*. 4–7 diciembre 2015.

NELSON, J.; TYMKOWICZ, S. y CALLAHAN, M. An investigation of emulsion stabilized limestone screenings (Departmental Report No. HR-309). Iowa: Office of Materials, Highway Division, Iowa Department of Transportation, 1994.

NGUYEN, T. y TRAN, P. Cambios de temperatura: las fluctuaciones extremas pueden influir en la estabilidad del silano y en su capacidad de adherirse a la superficie. *Journal of Coatings Technology*, 2020, vol. 92, no. 6, pp. 123–135.

ONYEJEKWE, S. y GHATAORA, G. S. Stabilization of quarry fines using a polymeric additive and portland cement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, vol. 28, no. 1. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001324.

PADMAVATHI, V.; NIRMALA PETER, E. C.; RAO, P. N. y PADMAVATHI, M. Stabilization of soil using Terrasil, Zycobond and cement as admixtures. En: SHEHATA, H. y POULOS, H. (eds.). *Latest Thoughts on Ground Improvement Techniques*. GeoMEast 2019. Cham: Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-01917-4_13.

PÉREZ ZERCEDA, J. La impermeabilización en el talud aguas arriba en presas CFRD y CCR mediante losa de concreto armado. *Revista de Ingeniería Civil*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 45–56.

PRAKASH, K. y SRIDHARAN, A. Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils. *Geotechnical Testing Journal*, 2004, vol. 27, no. 2, pp. 220–225.

PUPPALA, A.; SARIDE, S. y WILLIAMMEE, R. Sustainable reuse of limestone quarry fines and RAP in pavement base/subbase layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, vol. 24, no. 4, pp. 418–429. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000404.

PUPPALA, A.; SARIDE, S.; SIRIGIRIPET, S.; WILLIAMMEE, R. y DRONAMRAJU, V. Evaluation of cemented quarry fines as a pavement base material. En: *GeoCongress 2008: Geotechnics of Waste Management and Remediation*. 2008, pp. 312–319. DOI: 10.1061/40970(309)39.



QAMHIA, I.; TUTUMLUER, E.; OZER, H. y BOLER, H. Durability aspects of stabilized quarry by-product pavement base and subbase applications. *Civil Engineering Studies Illinois Center for Transportation Series*, 2019, No. 19-015. DOI: 10.36501/0197-9191/19-015.

RAFAEL, Heber. Diseño y reforzamiento estructural del reservorio 11 empleando geomembrana como impermeabilizante de agua en el sector Río Santa, distrito de Los Olivos, Lima, 2018 [tesis de título profesional]. Lima: Universidad Privada Telesup, 2022. Disponible en: <https://repositorio.utesup.edu.pe/bitstream/UTELESUP/2137/1/RAFAEL%20BUSTAMANTE%20HEBER%20DANDY.pdf>

RAYMOND, S. *Pulverised fuel ash as an embankment material*. London: Institute of Civil Engineers, 1961.

RBK BUILTS. Construcción de reservorios: 5 beneficios de utilizar geomembranas [en línea]. 2023. Disponible en: <https://rbkbuilt.com/construccion-de-reservorios-la-importancia-de-la-geomembrana/> [Consulta: 25 marzo 2024].

RIDDHI, C.; SUMAN, T.; HEENA, B.; SHIVANI, C. y MISHRA, C. Mitigating the quality of expansive soil utilizing Terrasil as an additive. *International Journal of Research in Science and Innovation (IJRSI)*, 2016, vol. 3, no. 5.

RIVERA, J.; AGUIRRE-GUERRERO, A.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. y OROBIO, A. Estabilización química de suelos: materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador Técnico*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 202–226. DOI: 10.23850/22565035.2530.

ROAD RESEARCH LABORATORY. *The protection of subgrades and granular sub-bases and bases*. London: H.M.S.O., 1968.

RPP. Reservorios de agua del Perú en peligro [en línea]. 2017. Disponible en: <https://rpp.pe/peru/actualidad/reservorios-de-agua-del-peru-en-peligro-noticia-1020888> [Consulta: 24 marzo 2024].

SCHANKOSKI, R. A.; PILAR, R.; PRUDÊNCIO, L. R., Jr. y FERRON, R. D. Evaluation of fresh cement pastes containing quarry by-product powders. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 133, pp. 234–242. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.056.



SHARMA, N. K.; SWAIN, S. K. y SAHOO, U. C. Stabilization of a clayey soil with fly ash and lime: a micro level investigation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2012, vol. 30, no. 5, pp. 1197–1205.

SHERWOOD, P. T. *Soil stabilization with cement and lime: state of the art review*. London: Transport Research Laboratory, HMSO, 1993.

SHEVRIN, A. Nuevos aditivos de silano hidrolíticamente estables para mejorar el rendimiento de los revestimientos acrílicos para cubiertas a base de agua. *Coatings*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 345–359. DOI: 10.3390/coatings11030345.

SIKA PERÚ. Impermeabilización de reservorios con morteros impermeables [en línea]. *Revista Constructivo*, 2024. Disponible en: <https://constructivo.com/actualidad/sika-peru-impermeabilizacion-de-reservorios-con-morteros-impermeables-1643035757>

SIKA. Consideraciones de diseño en la impermeabilización de reservorios con morteros impermeabilizantes [en línea]. LinkedIn, 2023. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/consideraciones-de-dise%C3%B1o-en-la-impermeabilizaci%C3%B3n-reservorios-morteros/> [Consulta: 24 marzo 2024].

SMITH, A. Resistencia a la degradación química: el silano frente a ataques de ácidos y bases. *Journal of Materials Science*, 2018, vol. 53, no. 10, pp. 4321–4330.

SOFTWARETESTINGHELP. 10+ best data collection tools with data gathering strategies [en línea]. 2022. Disponible en: <https://www.softwaretestinghelp.com/data-collection-tools/> [Consulta: 18 diciembre 2023].

STROUP-GARDINER, M. y WATTENBERG-KOMAS, T. Recycled materials and by-products in highway applications. Volume 4: Mineral and quarry by-products. *NCHRP Synthesis of Highway Practice*, Project 20-05, Topic 40-01. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2013.

SUPO, José. *Metodología de la investigación científica: para las ciencias de la salud y las ciencias sociales*. Arequipa: Sociedad Hispana de Investigadores Científicos, 2020.

TORRES, Samuel. Tratamientos superficiales con gravilla [en línea]. s.f. Disponible en: <https://www.ateb.es/pdf/2TRATAMIENTOS.pdf>



TURNITIN. Definiciones de exclusión de bibliografía y citas [en línea]. 2021. Disponible en: <https://help.turnitin.com/es/feedback-studio/instructor/definiciones-de-exclusion-de-bibliografia-y-citas.htm> [Consulta: 21 enero 2022].

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR. Reservorios [en línea]. s.f. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/433764855/Reservorios> [Consulta: 25 marzo 2024].

VAZQUEZ FERNÁNDEZ, Karen Elvit. Aplicación de Terrasil en la estabilización del suelo de subbase en la ampliación de la Av. Ramiro Prialé, Ate Vitarte [tesis de título profesional]. Lima: Universidad César Vallejo, 2022. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/94723/Vazquez_FKE-SD.pdf

VIZA, Yefri. Propuesta de diseño del reservorio de tierra apoyado revestido con geomembrana, Querapi–Moquegua [tesis de título profesional]. Lima: Universidad César Vallejo, 2022. Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/104638/Viza_VYC-SD.pdf

WOOD, S. A. y MAREK, C. R. Recovery and utilization of quarry by-products for use in highway construction. En: *International Center for Aggregates Research (ICAR) 3rd Annual Symposium*. 1995, vol. 10.

WRIGHT-FOX, R.; MACFARLANE, J. G. y BIBBENS, R. F. *Alternate chemical soil stabilizer: minor research report*. 3rd ed. London: CalTrans Publisher, 1993.

HOU, Dongshuai, et al. Perspectivas a escala molecular sobre la relación estructura–eficiencia de los agentes impermeabilizantes a base de silano. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 327, art. 126985.

LIU, Zhijun, et al. Preparación de látex híbridos de nitruro de boro hexagonal hidroxilado/isobutiltrietoxisilano para mejorar la impermeabilización de revestimientos de cemento. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 404, art. 133232.

CEVALLOS ZAMBRANO, Ángel Patricio. Relación de diferentes dimensiones de cilindros en la estimación de la velocidad de infiltración de tipos de suelos en la cuenca media del río Mosquito [tesis doctoral]. Manabí: Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2020.



ANEXOS



Anexo A

Tabla 50 — Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	
<p>Problema general ¿Cuál es la influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024?</p> <p>Problemas específicos 1. ¿Cuál es la influencia de silano hidrolizado en la permeabilidad del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024? 2. ¿Cuál es la influencia de silano hidrolizado en el grado de compactación natural del suelo en el fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024? 3. ¿Cuál es la influencia de silano hidrolizado en las características físicas del suelo del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024?</p>	<p>Objetivo general Determinar la influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024.</p> <p>Objetivos específicos 1. Determinar la influencia de silano hidrolizado en la permeabilidad del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024. 2. Determinar la influencia de silano hidrolizado en el grado de compactación natural del suelo en el fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024. 3. Determinar la influencia de silano hidrolizado en las características físicas del suelo del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira -2024.</p>	<p>Hipótesis general El silano hidrolizado influye significativamente en la impermeabilización del fondo y taludes de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024.</p> <p>Hipótesis específicos 1. Silano hidrolizado influye en la permeabilidad del fondo y taludes de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024. 2. Silano hidrolizado influye en el grado de compactación natural del suelo en el fondo y taludes de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira -2024. 3. Silano hidrolizado influye en las características físicas del suelo del fondo y taludes de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024.</p>	X = Silano hidrolizado	
			Dimensiones	Indicadores/Ítems
			1. Dosificaciones	1.1. Para impermeabilización de fondo 1.2. Para impermeabilización de taludes de reservorio.
			Y = Impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural	
			Dimensiones	Indicadores/Ítems
			1. Permeabilidad	Coeficiente de permeabilidad
2. Compactación natural del suelo	Grado de compactación			
3. Características físicas del suelo	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Análisis de la granulometría ➤ Límites de Atterberg ➤ Contenido de humedad 			

Anexo B

Datos proporcionados por el Senamhi y el Minagri



FUENTE: RPP, 2017

Figura 8 — El agua en peligro por carencia de reservorios adecuados





VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

I. DATOS GENERALES:

1.1. Nombres y Apellidos del experto: **Dr. Jenry SALAZAR GARCES**

1.2. Cargo e Institución donde trabaja: Miembro de Jurado y Docente de Posgrado de la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle; experto validador de instrumentos de recojo de información.

1.3. Instrumento evaluado: **MATRIZ RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LOS FORMULARIOS TÉCNICOS ESPECÍFICOS**

1.4. Autor del Instrumento: **Dr. Marcos Walter Acosta Montedoro**

CRITERIOS	INDICADORES	DEFICIENTE 0-20%	REGULAR 21-40%	BUENO 41-60%	MUY BUENO 61-80%	EXCELENTE 81-100%
Claridad	Está formulado con un lenguaje claro.					X
Objetividad	Está expresado en conductas observables.					X
Actualidad	Responde al avance científico y tecnológico.					X
Organización	Adecuado al alcance de la ciencia y la tecnología.					X
Suficiencia	Comprende los aspectos de cantidad y calidad.					X
Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos del sistema de evaluación y desarrollo de capacidades cognitivas.					X
Consistencia	Basados en aspectos teóricos-científicos de la tecnología educativa.					X
Coherencia	Presenta coherencia entre los índices, indicadores y dimensiones.					X
Metodología	La investigación responde al propósito del diagnóstico.					X
TOTAL						100

II. OPINIÓN SOBRE LA APLICABILIDAD

El instrumento puede ser aplicado

El instrumento debe mejorarse antes de su aplicación

FECHA: 18 de diciembre de 2023

NOMBRE: Ph. Dr. Jenry SALAZAR GARCES

DNI N° 02794821

Figura 10 — Validación de instrumento 02



VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

I. DATOS GENERALES:

- 1.1. Nombres y Apellidos del experto: **Dra. Martha Rocío GONZALES LOLI**
- 1.2. Cargo e Institución donde trabaja: Docente en Pre y Post grado en UNFV, UNMSM y Univ. Norbert Wiener; Doctora en Derecho, Post Doctorado de Didáctica en la Investigación Científica, con publicación de Libros sobre Investigación, Artículos indexados y de Especialidad, con experiencia como Revisora, Asesora y Jurado de Tesis de Postgrado.
- 1.3. Instrumento evaluado: **MATRIZ RESUMEN DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LOS FORMULARIOS TÉCNICOS ESPECÍFICOS**
- 1.4. Autor del Instrumento: **Dr. Marcos Walter Acosta Montedoro**

CRITERIOS	INDICADORES	DEFICIENTE 0-20%	REGULAR 21-40%	BUENO 41-60%	MUY BUENO 61-80%	EXCELENTE 81-100%
Claridad	Está formulado con un lenguaje claro.					X
Objetividad	Está expresado en conductas observables.					X
Actualidad	Responde al avance científico y tecnológico.					X
Organización	Adecuado al alcance de la ciencia y la tecnología.					X
Suficiencia	Comprende los aspectos de cantidad y calidad.					X
Intencionalidad	Adecuado para valorar aspectos del sistema de evaluación y desarrollo de capacidades cognoscitivas.					X
Consistencia	Basados en aspectos teóricos-científicos de la tecnología educativa.					X
Coherencia	Presenta coherencia entre los índices, indicadores y dimensiones.					X
Metodología	La investigación responde al propósito del diagnóstico.					X
TOTAL						100

II. OPINIÓN SOBRE LA APLICABILIDAD

- El instrumento puede ser aplicado
- El instrumento debe mejorarse antes de su aplicación

FECHA: 18 de diciembre de 2023
 NOMBRE: Martha Rocío Gonzales Loli
 DNI N° 08196942

Figura 11 — Validación de instrumento 03



Anexo D

Documentación técnica y de soporte del producto utilizado en el ensayo



D. Fiscal: Av. Emancipación Nro. 343 INT 136 - 137
Lima - Lima - Lima
Sucursal: Av. Tacna Nro. 575
Lima - Lima - Lima
Cel.: 920 809 590 / 986 381 730 / 991 903 742
E-mail: ventas@labortech.com.pe

Desarrollado por FoxSoft.pe

R.U.C.: 20605032771

FACTURA ELECTRÓNICA

N°F001-00007074

RUC : 10737665271	NRO. VOUCHER	VENM086762
RAZON SOCIAL : HUALLPA CCAHUANA MARCO ANTONIO	FECHA DE EMISIÓN	20/01/2025
DIRECCIÓN : HAQUIRA	CONDICION DE PAGO	CONTADO
N° DE O/C :	FECHA DE VENCIMIENTO	20/01/2025
GUÍA DE REMISIÓN :	VENDEDOR	OFICINA .

ITEM	CÓDIGO	CANTIDAD	U.M	DESCRIPCIÓN	LOTE	F. VENC.	P. UNITARIO	TOTAL
01	PRO0011	15	CAJ	PROSIL (SILANO) - FGM	240924	24/09/2026	23.00	345.00

SON: TRESCIENTOS CUARENTA Y CINCO Y 00/100 SOLES (S.E.U.O)



LABORTECH S.A.C
CANCELADO

FECHA :/...../.....

CUENTAS BANCARIAS A NOMBRE DE: LABORTECH S.A.C.

BANCO	MONEDA	N° DE CUENTA	CCI
BCP	S/.	191-814-4279042	00219100814427904254
BBVA	S/.	0011-0101-0100062835	011-101-000100062835-32

*** TODO CAMBIO Y/O DEVOLUCION DURANTE EL DIA ***
*** NO HAY DEVOLUCION DE DINERO ***
!!! GRACIAS POR SU VISITA !!!

Representación impresa de la Factura Electrónica

GRAVADA	S/	292.37
INAFECTA	S/	0.00
I.G.V. (18%)	S/	52.63
ICBPER	S/	0.00
TOTAL VENTA	S/	345.00


Hash : hRqFbwFoMeN8TXWqBwQ8xfBEqa4=

* Para Consultar sus Comprobantes Electrónicos Ingrese a:

Figura 12 — Factura de compra del silano



Figura 13 — La imagen muestra el producto químico de silano

 DentsCare	PROSIL Descripción técnica	
Rev: 00	Página 2 de 2	

Especificaciones técnicas

Propiedad	Especificación
Aspecto	Límpido e incolor
pH	5,0 +- 0,3

Conservación y Almacenaje

- El empaque del producto debe ser cerrado inmediatamente después de su uso.
- Almacene el producto en un local limpio, seco y en su empaque original.
- No exponga el producto a temperaturas elevadas o a la incidencia de la luz solar directa.
- Almacene el producto a temperaturas entre 5-20°C/ 41-68°F.
- No congele el producto.
- No utilice el producto con el plazo de validez vencido.
- Para desechar el producto, siga la legislación de su país.
- No reaproveche el empaque vacío.
- Mantenga fuera del alcance de los niños.
- Proteja el producto de contaminación externa.

Advertencias

No utilizar el producto si éste estuviera fuera del plazo de validez. Para desechar el producto, hágalo siguiendo las normas de su país.
 Mantener fuera del alcance de los niños.
 Producto inflamable.

Presentación


Caja de cartón conteniendo 01 frasco de polietileno de alta densidad con 5ml (4g) de Prosil.

Validad: 2 años

Reg. ANVISA: **801723100310**

Figura 14 — Ficha técnica del producto silano



	<p style="text-align: center;">PROSIL</p> <p style="text-align: center;">Descripción técnica</p>	
<p>Rev: 00</p>		<p style="text-align: right;">Página 1 de 2</p>

Descripción del producto:
 ProSil es una solución etanólica de 3-Metacriloxipropiltrimetoxisilano hidrolizado para uso como agente de unión química en procesos de adhesión y cementación de piezas en cerámica, cerómero, resina laboratorial y pernos de fibra de vidrio.

Principio de funcionamiento/mecanismo de acción
 El silano, principio activo de la formulación, es una molécula bifuncional que contiene hidróxido de silicio y terminaciones metacrílicas. Por esta razón, el silano tiene la capacidad de unirse químicamente a superficies, especialmente aquellas que contienen silicio, y a monómeros metacrílicos. Por lo tanto, cuando se aplica silano a superficies protésicas como cerámica, postes de fibra de vidrio y resinas compuestas, se adhiere a la superficie de la pieza generando una fina capa silanizada. Esta capa silanizada se unirá con el material cementante adhesivo que contiene monómeros metacrílicos en la composición.

Indicación del producto
 Indicado para promover la unión química estable entre resinas o adhesivos conteniendo monómeros metacrílicos y piezas en cerámica, cerómero, resina compuesta (laboratorial) y pernos de fibra de vidrio.

Precauciones y Contraindicaciones
 Utilice Prosil sólo como se indica en estas instrucciones.
 El producto está indicado sólo para uso profesional.
 Evite aplicar Prosil sobre la cara externa de la porcelana. El contacto con la superficie externa causará adhesión del cemento resinoso, dificultando la limpieza o posibilitando la remoción de áreas glaseadas de la restauración durante la eliminación de los excesos de cemento resinoso. El aislamiento de la cara externa de porcelana con cera es un procedimiento altamente recomendado antes de la aplicación del Prosil.
 El producto es inflamable por contener etanol.
 Cierre el envase inmediatamente después del uso para evitar la evaporación del producto. Evite el contacto con la piel y los ojos. Si esto ocurre, lave con abundante agua

Composición

Componente	% P/P
3-Metacriloxipropiltrimetoxisilano	5
Etanol	85
Agua	10

Características y ventajas

- Elevada capacidad de unión entre cemento de resina y postes de fibra de vidrio y restauraciones indirectas.
- Promueve un aumento de hasta el 30% de la capacidad adhesiva.
- Promueve la unión entre estas interfaces debido a la elevada reactividad del silano con monómeros metacrílicos y superficies que contienen elementos inorgánicos.

Figura 15 — Ficha técnica del producto silano





CERTIFICADO DE ANÁLISIS

JOINVILLE(SC), 09 De Octubre 2024.

Página: 1/1

Identificación del Producto:

Nombre del Producto: PROSIL

Fecha de Fabricación: 24-09-2024

Fecha de Validad: 24-09-2026

Presentación: Caja x 01 frasco de con 5ml

Metodo de Análisis: Norma propia

Numero del Lote: 240924

Propiedad	Especificación	Resultados Análisis
Aspecto	Límpido e incolor	CONFORME
pH	5,0 +- 0,3	4,84

Danielle Belegante Joenk
Responsável pela análise.

Observación: * Regulamento interno de Dentscare.

Situación del Lote:

Aprobado

Aprobado con Restriciones

Conclusión:

Producto aprobado para la venta. Las propiedades Físico-Químicas se encuentran dentro de lo especificado para el producto.

"EL INFORME DEL ANÁLISIS FUE EMITIDO ELECTRÓNICAMENTE, ES VÁLIDO SÓLO CON FIRMA, Y QUE ESTO SI PIERDE SU VALOR A CABO CUALQUIER CAMBIO."

Av. Edgar Nelson Meister, 474. Distrito Industrial. 89219-501
Joinville - SC. Tel + 55 47 3441 6100 Fax +55 47 3427 3377 www.fgm.ind.br
Insc Estadual: 254.404.162. CNPJ: 05.106.945/0001-06

Figura 16 — Certificado de análisis de silano



Anexo E

Panel de fotografía de extracción de material y ensayos de laboratorio



Figura 17 — Se observa traslado de la muestra del suelo para ensayo en laboratorio



Figura 18 — Verificación de las mallas de granulometría



Figura 19 — Análisis granulométrico y límites

Anexo F

Panel de fotografía de ensayos en el campo



Figura 20 — Se observa el reservorio para realizar los ensayos



Figura 21 — Prueba de densidad de campo en el fondo de reservorio



Figura 22 — Colocación de anillo para el ensayo en el fondo de reservorio



Figura 23 — Prueba de ensayo en el fondo de reservorio sin tratamiento



Figura 24 — Colocación de anillo para el ensayo sin tratamiento en talud de reservorio



Figura 25 — Medición de infiltración en talud reservorio sin tratamiento



Figura 26 — Preparación de silano hidrolizado para el fondo de reservorio



Figura 27 — Tratamiento del fondo de reservorio con silano hidrolizado



Figura 28 — Suelo tratado con silano hidrolizado del fondo reservorio



Figura 29 — Ensayo con tratamiento en el fondo de reservorio

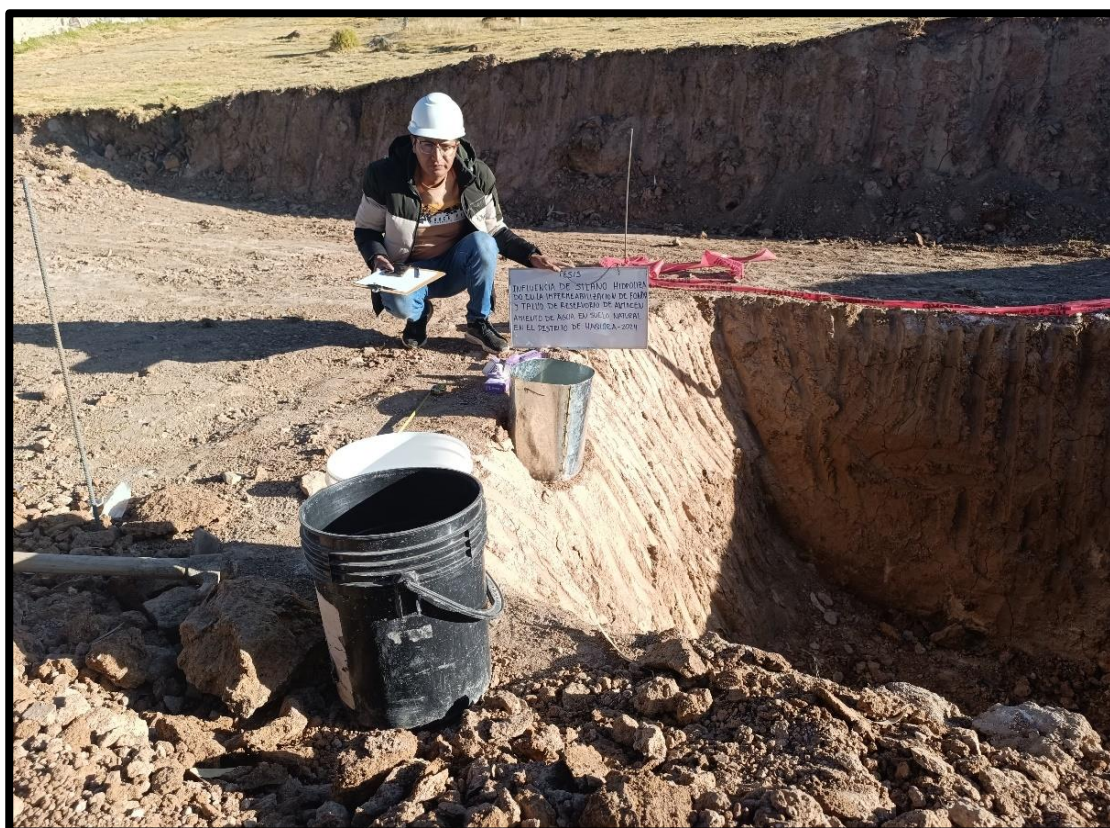


Figura 30 — Ensayo con tratamiento en el talud de reservorio



Figura 31 — Medición de permeabilidad en el talud del reservorio



Figura 32 — Medición de permeabilidad en el fondo del reservorio



Figura 33 — Observación de filtración de agua en fondo de reservorio



Figura 36 — Ensayo con dosificación de tratamiento en fondo de reservorio



Figura 37 — Se observa el reservorio señalado con cinta para sus respectivos ensayos



Figura 38 — Ensayos de densidad de campo



Figura 39 — Preparación de silano para los ensayos de talud y fondo

Anexo G

Panel de fotografía del informe de resultados de ensayo de laboratorio

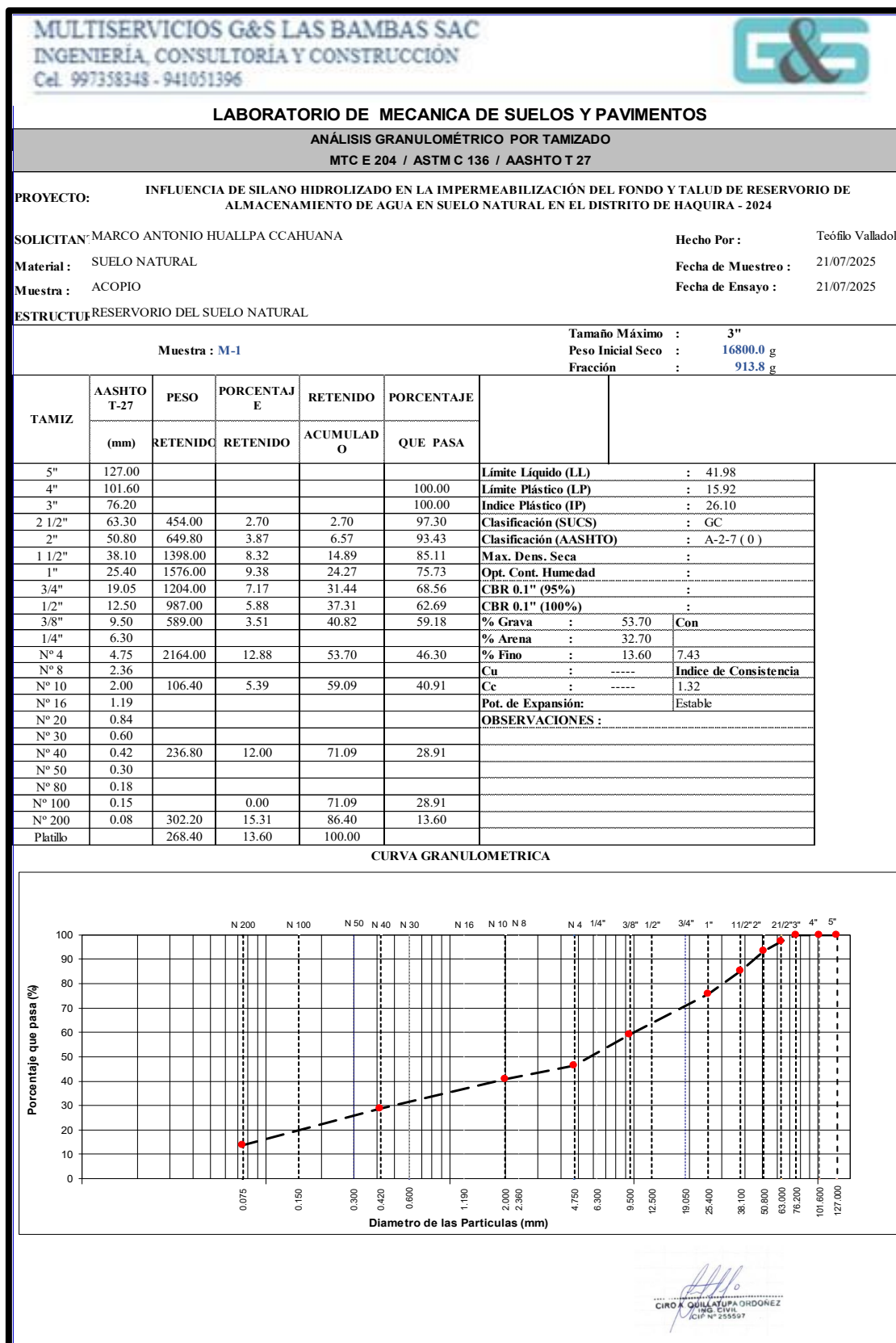


Figura 40 — Resultados de granulometría





MULTISERVICIOS G&S LAS BAMBAS SAC INGENIERÍA, CONSULTORÍA Y CONSTRUCCIÓN Cel. 997358348 - 941051396				
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS				
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELOS				
MTC E 108 / ASTM D 2216				
PROYECTO:	INFLUENCIA DE SILANO HIDROLIZADO EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DEL FONDO Y TALUD DE RESERVORIO DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN SUELO NATURAL EN EL DISTRITO DE HAQUIRA - 2024			
SOLICITANTE:	MARCO ANTONIO HUALLPA CCAHUANA	Hecho Por :	Teófilo Valladolid C	
Material :	SUELO NATURAL	Fecha de Muestreo :	21/07/2025	
Muestra :	ACOPIO	Fecha de Ensayo :	21/07/2025	
ESTRUCTURA:	RESERVORIO DEL SUELO NATURAL			
DATOS DE LA MUESTRA				
IDENTIFICACION	UND.	01	02	03
Número de Tara	Nro.			
Masa de la muestra humeda+tara	g.	2300.00		
Masa de la muestra seca+tara	g.	2141.00		
Masa de la tara	g.			
Masa del agua	g.	159.00		
Masa de la muestra seca	g.	2141.00		
Contenido de humedad	%	7.43		
PROMEDIO	%		7.43	
OBSERVACIONES:				
 CIRIO K. QUILLATUPA ORDÓÑEZ ING. CIVIL CIP N° 255597				

Figura 41 — Resultados de contenido de humedad sin tratamiento

MULTISERVICIOS G&S LAS BAMBAS SAC INGENIERÍA, CONSULTORÍA Y CONSTRUCCIÓN Cel. 997358348 - 941051396				
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS				
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELOS				
MTC E 108 / ASTM D 2216				
PROYECTO:	INFLUENCIA DE SILANO HIDROLIZADO EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DEL FONDO Y TALUD DE RESERVORIO DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN SUELO NATURAL EN EL DISTRITO DE HAQUIRA - 2024			
SOLICITANTE:	MARCO ANTONIO HUALLPA CCAHUANA	Hecho Por :	Teófilo Valladolid C	
Material :	SUELO CON 1.25 ml/m2 DE SILANO HIDROLIZADO	Fecha de Muestreo :	21/07/2025	
Muestra :	ACOPIO	Fecha de Ensayo :	21/07/2025	
ESTRUCTURA:	RESERVORIO DEL SUELO NATURAL			
DATOS DE LA MUESTRA				
IDENTIFICACION	UND.	01	02	03
Número de Tara	Nro.			
Masa de la muestra humeda+tara	g.	2355.0		
Masa de la muestra seca+tara	g.	2141.0		
Masa de la tara	g.			
Masa del agua	g.	214.0		
Masa de la muestra seca	g.	2141.0		
Contenido de humedad	%	10.00		
PROMEDIO	%		10.0	
OBSERVACIONES:				
 CIRIO K. QUILLATUPA ORDÓÑEZ ING. CIVIL CIP N° 255597				

Figura 42 — Resultados de contenido de humedad con tratamiento de 1.25 L/m2 de silano hidrolizado




MULTISERVICIOS G&S LAS BAMBAS SAC INGENIERÍA, CONSULTORÍA Y CONSTRUCCIÓN Cel. 997358348 - 941051396																																																	
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS																																																	
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELOS MTC E 108 / ASTM D 2216																																																	
PROYECTO:		INFLUENCIA DE SILANO HIDROLIZADO EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DEL FONDO Y TALUD DE RESERVORIO DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN SUELO NATURAL EN EL DISTRITO DE HAQUIRA - 2024																																															
SOLICITANTE:		MARCO ANTONIO HUALLPA CCAHUANA		Hecho Por : Teófilo Valladolid C																																													
Material :		SUELO CON 1.50 ml/m2 DE SILANO HIDROLIZADO		Fecha de Muestreo : 21/07/2025																																													
Muestra :		ACOPIO		Fecha de Ensayo : 21/07/2025																																													
ESTRUCTURA:		RESERVORIO DEL SUELO NATURAL																																															
DATOS DE LA MUESTRA																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>IDENTIFICACION</th> <th>UND.</th> <th>01</th> <th>02</th> <th>03</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Número de Tara</td> <td>Nro.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Masa de la muestra húmeda+tara</td> <td>g.</td> <td>2365.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Masa de la muestra seca+tara</td> <td>g.</td> <td>2141.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Masa de la tara</td> <td>g.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Masa del agua</td> <td>g.</td> <td>224.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Masa de la muestra seca</td> <td>g.</td> <td>2141.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Contenido de humedad</td> <td>%</td> <td>10.5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PROMEDIO</td> <td>%</td> <td colspan="3" style="text-align: center;">10.5</td> </tr> </tbody> </table>					IDENTIFICACION	UND.	01	02	03	Número de Tara	Nro.				Masa de la muestra húmeda+tara	g.	2365.0			Masa de la muestra seca+tara	g.	2141.0			Masa de la tara	g.				Masa del agua	g.	224.0			Masa de la muestra seca	g.	2141.0			Contenido de humedad	%	10.5			PROMEDIO	%	10.5		
IDENTIFICACION	UND.	01	02	03																																													
Número de Tara	Nro.																																																
Masa de la muestra húmeda+tara	g.	2365.0																																															
Masa de la muestra seca+tara	g.	2141.0																																															
Masa de la tara	g.																																																
Masa del agua	g.	224.0																																															
Masa de la muestra seca	g.	2141.0																																															
Contenido de humedad	%	10.5																																															
PROMEDIO	%	10.5																																															
OBSERVACIONES:																																																	
 CIRO X. QUILLATUPA ORDOÑEZ ING. CIVIL CIP N° 255597																																																	

Figura 43 — Resultados de contenido de humedad con tratamiento de 1.50 L/m2 de silano hidrolizado





LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS

LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLÁSTICO E INDICE DE PLASTICIDAD
MTC E 110 / ASTM D 4318 / AASHTO T 89
MTC E 111 / ASTM D 4318 / AASHTO T 90

PROYECTO: INFLUENCIA DE SILANO HIDROLIZADO EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DEL FONDO Y TALUD DE RESERVORIO DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN SUELO NATURAL EN EL DISTRITO DE HAQUIRA - 2024

SOLICITANTE: MARCO ANTONIO HUALLPA CCAHUANA

Hecho Por : Teófilo Valladolid C

Material : SUELO NATURAL

Fecha de Muestreo : 21/07/2025

Muestra : ACOPIO

Fecha de Ensayo : 21/07/2025

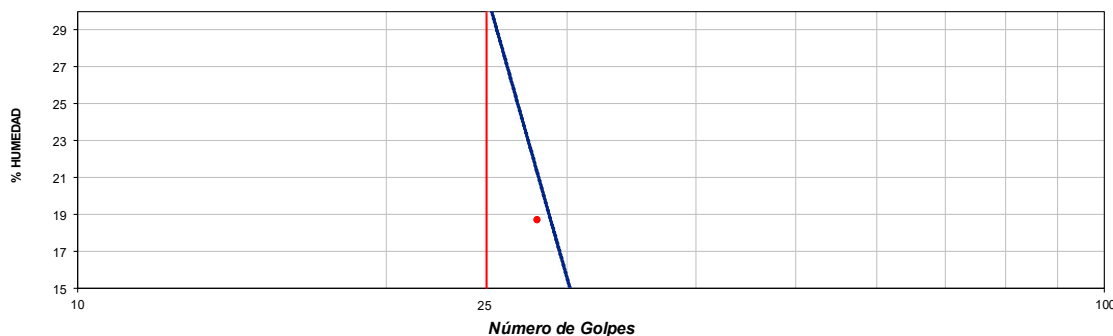
ESTRUCTURA: RESERVORIO DEL SUELO NATURAL

Material Pasante Tamiz N° 40

DESCRIPCION	UNIDAD	LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Recipiente	N°								
Peso Recipiente + Suelo Humedo (A)	gr.	215.00	215.00	210.00	200.00	180.00	197.00		
Peso Recipiente + Suelo Seco (B)	gr.	159.00	166.00	180.00	181.00	140.00	155.00		
Peso de Recipiente (C)	gr.	19.00	18.00	20.00	22.00	18.00	19.00		
Peso del Agua (A-B)	gr.	56.00	49.00	30.00	19.00	40.00	42.00		
Peso del Suelo Seco (B-C)	gr.	140.00	148.00	160.00	159.00	122.00	136.00		
Contenido Humedad $[W=(A-B)/(B-C)*100]$	%	40.00	33.11	18.75	11.95	32.79	30.88		
Golpes	N°	22	26	28	31				

RESULTADOS OBTENIDOS	LIMITES DE CONSISTENCIA		INDICE PLASTICO
	LIQUIDO	PLASTICO	
	42.0	15.9	26.1

RELACION HUMEDAD - NUMERO DE GOLPES



OBSERVACIONES :

[Signature]
CIRIO QUILLATUPA ORDÓÑEZ
ING. CIVIL
CIP N° 259597

Figura 44 — Resultados de límites de Atterberg sin tratamiento



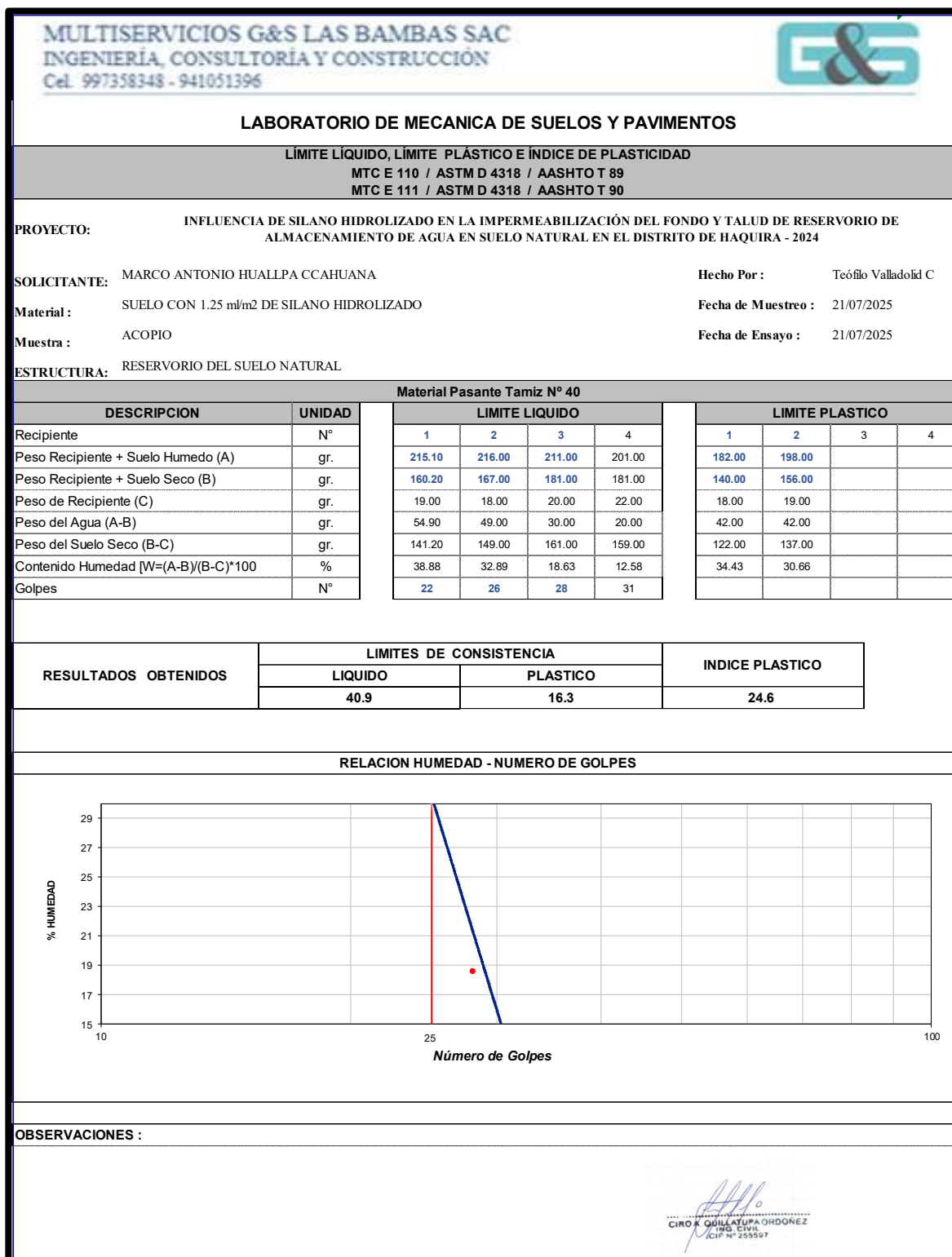


Figura 45 — Resultados de límites de Atterberg con tratamiento de 1.25 L/m² de silano hidrolizado



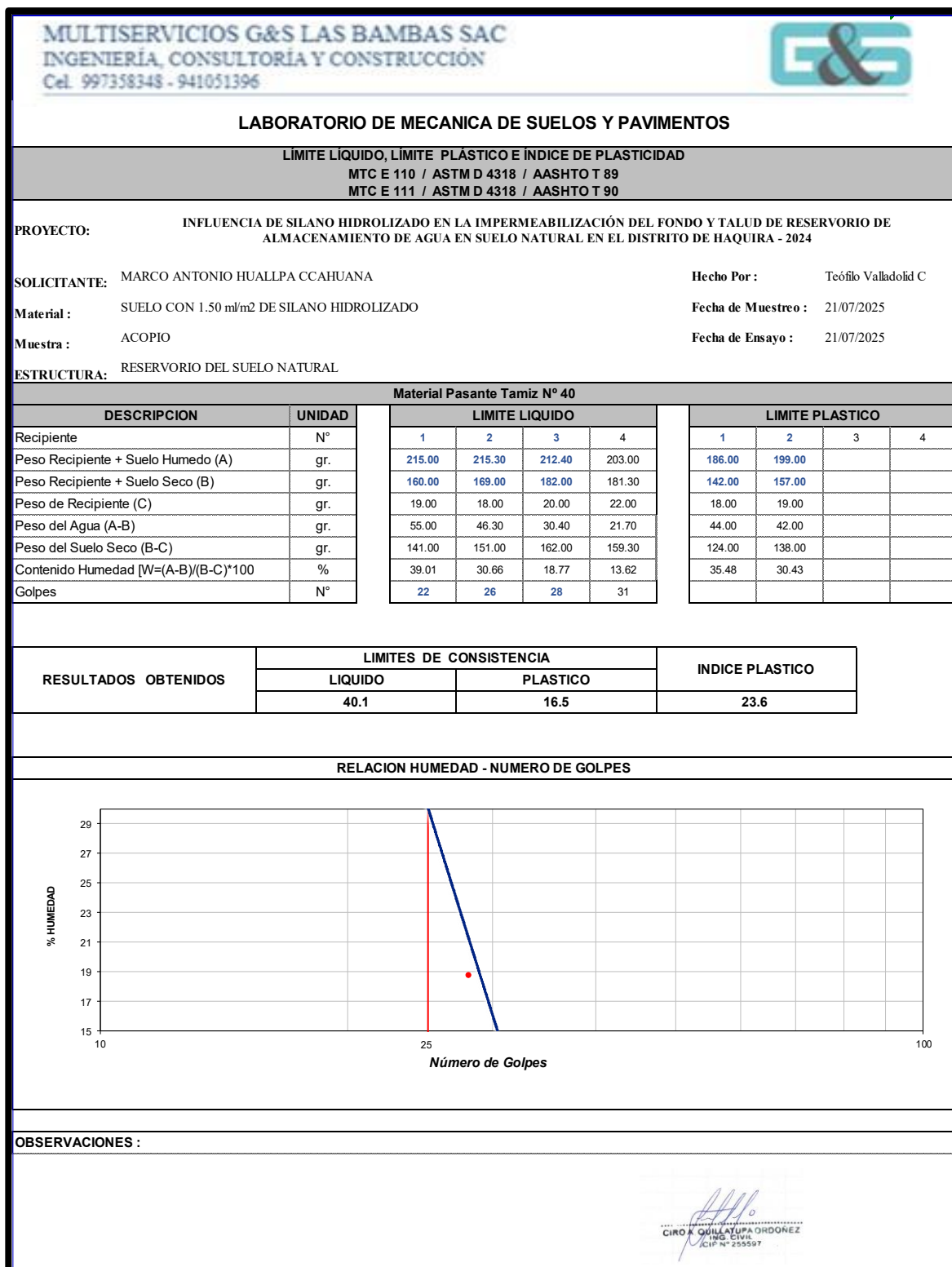


Figura 46 — Resultados de límites de Atterberg con tratamiento de 1.50 L/m² de silano hidrolizado




Proyecto: Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira - 2024					
DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DE CONO Y ARENA (NORMA ASTM D1556 - MTC E 117)					
MATERIAL:	SUELO NATURAL	KM / N° CAPA:	1	ESPESOR	0.15 Mts
PROCEDENCIA:	HAQUIRA	ESTRUCTURA:	FONDO DE RESERVORIO		
UBICACIÓN:	BARRIO MARCALLAC - HAQUIRA	FECHA DE ENSAYO:	martes, 22 de Julio de 2025		
1. DATOS PRELIMINARES					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	DATO	DATO	DATO
1	Densidad de la arena (min. 3 medidas)	g/cm3	1.46		
2	Peso arena en cono (min. 3 medidas)	g	1605.00		
3	Peso específico de la grava	g/cm3	2.48		
4	Optimo contenido de humedad	%	8.40		
5	Maxima densidad seca en laboratorio	g/cm3	2.13		
Grado de compactación requerido		%	95.00%		
2. DENSIDAD DE HUMEDAD					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
6	Peso de frasco + arena	g	7492.00		
7	Peso de frasco + arena remanente	g	2836.50		
8	Peso de arena: cono + hueco	g	4655.50		
9	Peso de arena en el hueco	g	3050.50		
10	Volumen del hueco	cm3	2095.12		
11	Peso del recipiente + suelo + grava	g	4068.00		
12	Peso del recipiente	g	10.00		
13	Peso retenido en la malla #3/4"	g	329.00		
14	Volumen de la grava	cm3	132.66		
15	Peso del suelo sin grava	g	3729.00		
16	Volumen de suelo sin grava	cm3	1962.46		
17	Densidad Humeda	g/cm3	1.90		
3. CONTENIDO DE HUMEDAD		%	7.40		
4. RESULTADOS					
IT	DESCRIPCIÓN	UND			
18	Densidad de Campo	g/cm3	1.77		
19	Compactación de Campo	g	83.10%		
20	Evaluacion de capa	APR/DES	DESAPROBADA		
21	RESULTADO:				
OBERVACIONES:					
 CIRIO QUILLATUPA ORDOÑEZ ING. CIVIL ICIP N° 255597					

Figura 47 — Resultados de densidad de campo sin tratamiento en fondo


Proyecto: Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira - 2024					
DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DE CONO Y ARENA (NORMA ASTM D1556 - MTC E 117)					
MATERIAL:	SUELO TRATADO 1.25 ml/m ²	KM / N° CAPA:	1	ESPESOR	0.15 mts
PROCEDENCIA:	HAQUIRA	ESTRUCTURA:	FONDO DE RESERVORIO		
UBICACIÓN:	BARRIO MARCALLAC - HAQUIRA	FECHA DE ENSAYO:	miércoles, 23 de Julio de 2025		
1. DATOS PRELIMINARES					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	DATO	DATO	DATO
1	Densidad de la arena (min. 3 medidas)	g/cm ³	1.46		
2	Peso arena en cono (min. 3 medidas)	g	1605.00		
3	Peso específico de la grava	g/cm ³	2.48		
4	Óptimo contenido de humedad	%	8.40		
5	Máxima densidad seca en laboratorio	g/cm ³	2.13		
Grado de compactación requerido		%	95.00%		
2. DENSIDAD DE HUMEDAD					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
6	Peso de frasco + arena	g	7491.50		
7	Peso de frasco + arena remanente	g	2828.00		
8	Peso de arena: cono + hueco	g	4663.50		
9	Peso de arena en el hueco	g	3058.50		
10	Volumen del hueco	cm ³	2100.62		
11	Peso del recipiente + suelo + grava	g	4070.00		
12	Peso del recipiente	g	10.00		
13	Peso retenido en la malla #3/4"	g	331.90		
14	Volumen de la grava	cm ³	133.83		
15	Peso del suelo sin grava	g	3728.10		
16	Volumen de suelo sin grava	cm ³	1966.79		
17	Densidad Humeda	g/cm ³	1.90		
3. CONTENIDO DE HUMEDAD		%	10.00		
4. RESULTADOS					
IT	DESCRIPCIÓN	UND			
18	Densidad de Campo	g/cm ³	1.72		
19	Compactación de Campo	g	80.94%		
20	Evaluación de capa	APR/DES	DESAPROBADA		
21	RESULTADO:				
OBSERVACIONES:					
					

Figura 48 — Resultados de densidad de campo con tratamiento 1.25 L/m² en fondo


Proyecto: Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira - 2024					
DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DE CONO Y ARENA (NORMA ASTM D1556 - MTC E 117)					
MATERIAL:	SUELO TRATADO 1.50 ml/m2	KM / N° CAPA:	1	ESPESOR	0.15 mts
PROCEDENCIA:	HAQUIRA	ESTRUCTURA:	FONDO DE RESERVORIO		
UBICACIÓN:	BARRIO MARCALLAC - HAQUIRA	FECHA DE ENSAYO:	jueves, 24 de Julio de 2025		
1. DATOS PRELIMINARES					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	DATO	DATO	DATO
1	Densidad de la arena (min. 3 medidas)	g/cm3	1.46		
2	Peso arena en cono (min. 3 medidas)	g	1605.00		
3	Peso especifico de la grava	g/cm3	2.48		
4	Optimo contenido de humedad	%	8.40		
5	Maxima densidad seca en laboratorio	g/cm3	2.13		
Grado de compactación requerido		%	95.00%		
2. DENSIDAD DE HUMEDAD					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
6	Peso de frasco + arena	g	7491.00		
7	Peso de frasco + arena remanente	g	2833.00		
8	Peso de arena: cono + hueco	g	4658.00		
9	Peso de arena en el hueco	g	3053.00		
10	Volumen del hueco	cm3	2096.84		
11	Peso del recipiente + suelo + grava	g	4075.50		
12	Peso del recipiente	g	10.00		
13	Peso retenido en la malla #3/4"	g	333.00		
14	Volumen de la grava	cm3	134.27		
15	Peso del suelo sin grava	g	3732.50		
16	Volumen de suelo sin grava	cm3	1962.57		
17	Densidad Humeda	g/cm3	1.90		
3. CONTENIDO DE HUMEDAD		%	10.50		
IT	DESCRIPCIÓN	UND			
18	Densidad de Campo	g/cm3	1.72		
19	Compactación de Campo	g	80.84%		
20	Evaluacion de capa	APR/DES	DESAPROBADA		
21	RESULTADO:				
OBERVACIONES:					
					

Figura 49 — Resultados de densidad de campo con tratamiento 1.50 L/m2 en fondo


Proyecto: Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira - 2024					
DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DE CONO Y ARENA (NORMA ASTM D1556 - MTC E 117)					
MATERIAL:	SUELO NATURAL	KM / N° CAPA:	1	ESPESOR	0.15 mts
PROCEDENCIA:	HAQUIRA	ESTRUCTURA:	TALUD DE RESERVORIO		
UBICACIÓN:	BARRIO MARCALLAC - HAQUIRA	FECHA DE ENSAYO:	viernes, 25 de Julio de 2025		
1. DATOS PRELIMINARES					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	DATO	DATO	DATO
1	Densidad de la arena (min. 3 medidas)	g/cm3	1.46		
2	Peso arena en cono (min. 3 medidas)	g	1605.00		
3	Peso específico de la grava	g/cm3	2.48		
4	Óptimo contenido de humedad	%	8.40		
5	Máxima densidad seca en laboratorio	g/cm3	2.13		
Grado de compactación requerido		%	95.00%		
2. DENSIDAD DE HUMEDAD					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
6	Peso de frasco + arena	g	7618.00		
7	Peso de frasco + arena remanente	g	2567.00		
8	Peso de arena: cono + hueco	g	5051.00		
9	Peso de arena en el hueco	g	3446.00		
10	Volumen del hueco	cm3	2366.76		
11	Peso del recipiente + suelo + grava	g	3797.00		
12	Peso del recipiente	g	10.00		
13	Peso retenido en la malla #3/4"	g	456.00		
14	Volumen de la grava	cm3	183.87		
15	Peso del suelo sin grava	g	3331.00		
16	Volumen de suelo sin grava	cm3	2182.89		
17	Densidad Humeda	g/cm3	1.53		
3. CONTENIDO DE HUMEDAD		%	7.40		
4. RESULTADOS					
IT	DESCRIPCIÓN	UND			
18	Densidad de Campo	g/cm3	1.42		
19	Compactación de Campo	g	66.74%		
20	Evaluación de capa	APR/DES	DESAPROBADA		
21	RESULTADO:				
OBSERVACIONES:					
					

Figura 50 — Resultados de densidad de campo sin tratamiento en talud


Proyecto: Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira - 2024					
DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DE CONO Y ARENA (NORMA ASTM D1556 - MTC E 117)					
MATERIAL:	SUELO TRATADO 1.25 ml/m2	KM / N° CAPA:	1	ESPESOR	0.15 mts
PROCEDENCIA:	HAQUIRA	ESTRUCTURA:	TALUD DE RESERVORIO		
UBICACIÓN:	BARRIO MARCALLAC - HAQUIRA	FECHA DE ENSAYO:	sábado, 26 de Julio de 2025		
1. DATOS PRELIMINARES					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	DATO	DATO	DATO
1	Densidad de la arena (min. 3 medidas)	g/cm3	1.46		
2	Peso arena en cono (min. 3 medidas)	g	1605.00		
3	Peso específico de la grava	g/cm3	2.48		
4	Optimo contenido de humedad	%	8.40		
5	Maxima densidad seca en laboratorio	g/cm3	2.13		
Grado de compactación requerido		%	95.00%		
2. DENSIDAD DE HUMEDAD					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
6	Peso de frasco + arena	g	7620.00		
7	Peso de frasco + arena remanente	g	2561.00		
8	Peso de arena: cono + hueco	g	5059.00		
9	Peso de arena en el hueco	g	3454.00		
10	Volumen del hueco	cm3	2372.25		
11	Peso del recipiente + suelo + grava	g	3812.00		
12	Peso del recipiente	g	10.00		
13	Peso retenido en la malla #3/4"	g	461.00		
14	Volumen de la grava	cm3	185.89		
15	Peso del suelo sin grava	g	3341.00		
16	Volumen de suelo sin grava	cm3	2186.37		
17	Densidad Humeda	g/cm3	1.53		
3. CONTENIDO DE HUMEDAD		%	10.00		
4. RESULTADOS					
IT	DESCRIPCIÓN	UND			
18	Densidad de Campo	g/cm3	1.39		
19	Compactación de Campo	g	65.25%		
20	Evaluacion de capa	APR/DES	DESAPROBADA		
21	RESULTADO:				
OBERVACIONES:					
					

Figura 51 — Resultados de densidad de campo con tratamiento 1.25 L/m2 en talud


Proyecto: Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira - 2024					
DENSIDAD DE CAMPO POR EL METODO DE CONO Y ARENA (NORMA ASTM D1556 - MTC E 117)					
MATERIAL:	SUELO TRATADO 1.50 ml/m ²	KM / N° CAPA:	1	ESPESOR	0.15 mts
PROCEDENCIA:	HAQUIRA	ESTRUCTURA:	TALUD DE RESERVORIO		
UBICACIÓN:	BARRIO MARCALLAC - HAQUIRA	FECHA DE ENSAYO:	domingo, 27 de Julio de 2025		
1. DATOS PRELIMINARES					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	DATO	DATO	DATO
1	Densidad de la arena (min. 3 medidas)	g/cm ³	1.46		
2	Peso arena en cono (min. 3 medidas)	g	1605.00		
3	Peso específico de la grava	g/cm ³	2.48		
4	Óptimo contenido de humedad	%	8.40		
5	Máxima densidad seca en laboratorio	g/cm ³	2.13		
Grado de compactación requerido		%	95.00%		
2. DENSIDAD DE HUMEDAD					
IT	DESCRIPCIÓN	UND	1	2	3
6	Peso de frasco + arena	g	7620.20		
7	Peso de frasco + arena remanente	g	2559.20		
8	Peso de arena: cono + hueco	g	5061.00		
9	Peso de arena en el hueco	g	3456.00		
10	Volumen del hueco	cm ³	2373.63		
11	Peso del recipiente + suelo + grava	g	3814.00		
12	Peso del recipiente	g	10.00		
13	Peso retenido en la malla #3/4"	g	462.40		
14	Volumen de la grava	cm ³	186.45		
15	Peso del suelo sin grava	g	3341.60		
16	Volumen de suelo sin grava	cm ³	2187.17		
17	Densidad Humeda	g/cm ³	1.53		
3. CONTENIDO DE HUMEDAD		%	10.50		
4. RESULTADOS					
IT	DESCRIPCIÓN	UND			
18	Densidad de Campo	g/cm ³	1.38		
19	Compactación de Campo	g	64.94%		
20	Evaluación de capa	APR/DES	DESAPROBADA		
21	RESULTADO:				
OBSERVACIONES:					
 CIRO A. QUILLATUPA ORDÓÑEZ ING. CIVIL CIP N° 255597					

Figura 52 — Resultados de densidad de campo con tratamiento 1.50 L/m²

METODO DE DOBLE ANILLO			
Proyecto:	Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de		
Ubicación:	Distrito de Haquira		
Estructura:	Talud de reservorio		
Dosificación:	0 (L/Area) de silano hidrolizado (Sin tratamiento)		
Fecha de ensayo:	28 de julio 2025		
Lectura Tiempo (min)	Lectura infiltracion (cm)		Observaciones
0	0.00	21.15	inicio
1	20.11		infiltración lenta
2	18.79		
3	18.02		
4	17.33		
5	16.49		
6	15.39		
8	14.09		
10	13.66		
12	12.45		
14	11.29		
17	10.22		
22	9.22		
30	8.99	22.00	
38	18.44		
53	16.37		
70	15.66		
87	14.69		
99	12.55		
112	11.25		
134	10.55	20.33	
147	18.79		
166	17.02		
180	14.22		Infiltración final en 3 horas
Total de horas 3:00 horas	6.11	cm	



 CIRIO A. QUILLATUPA ORDÓÑEZ
 ING. CIVIL
 CIP N° 255597

Figura 53 — Resultado del ensayo de infiltración sin tratamiento en talud de reservorio

METODO DE DOBLE ANILLO			
Proyecto:	Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de		
Ubicación:	Distrito de Haquira		
Estructura:	Talud de reservorio		
Dosificación:	1.5 (L/Area) de silano hidrolizado		
Fecha de ensayo:	31 de julio 2025		
Lectura Tiempo (min)	Lectura infiltracion (cm)		Observaciones
0	0.00	20.59	inicio
5	20.59		infiltración lenta
10	20.59		
17	20.58		
30	20.58		
50	20.57		
70	20.56		
100	20.56		
120	20.55		
150	20.55		
180	20.54		infiltración final
Total de horas =	0.05	cm	en 3 horas
3:00 horas			



 CIRIO A. QUILLATUPA ORDOÑEZ
 ING. CIVIL
 CIP N° 255597

Figura 54 — Resultado del ensayo de infiltración con tratamiento de 1.5 L/m2 en talud


METODO DE DOBLE ANILLO			
Proyecto:	Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haquira - 2024		
Ubicación:	Distrito de Haquira		
Estructura:	Fondo de reservorio		
Dosificación:	0 (L/Area) de silano hidrolizado (Sin tratamiento)		
Fecha de ensayo:	28 de julio 2025		
Lectura Tiempo (min)	Lectura infiltración (cm)		Observaciones
0	0.00	21.01	inicio
1	19.99		Infiltración lenta
2	19.03		
3	17.89		
4	17.44		
5	16.56		
6	15.79		
8	14.00		
10	13.55		
12	12.78		
14	12.03		
17	11.78		
22	11.05		
30	10.67		
38	10.33		
53	18.58		
70	17.99		
87	16.04		
99	15.35		
112	14.78		
134	12.89		
147	19.05		
166	17.09		
180	13.09		Infiltración final en 3 horas
Total de horas=3:00 horas	7.98	Cm.	


 CIRO A. QUILLATUPA ORDÓÑEZ
 ING. CIVIL
 CIP N° 255597

Figura 55 — Resultado del ensayo infiltración sin tratamiento en fondo de reservorio



METODO DE DOBLE ANILLO			
Proyecto:	Influencia de silano hidrolizado en la impermeabilización del fondo y talud de reservorio de almacenamiento de agua en suelo natural en el distrito de Haqira -		
Ubicación:	Distrito de Haqira		
Estructura:	Fondo de reservorio		
Dosificación:	1.5 (L/Area) de silano hidrolizado		
Fecha de ensayo:	31 de julio 2025		
Lectura Tiempo (min)	Lectura infiltracion (cm)		Observaciones
0	0.00	20.19	inicio
5	20.18		infiltracion lenta
16	20.18		
17	20.17		
36	20.16		
50	20.16		
70	20.15		
100	20.14		
120	20.14		
150	20.13		
180	20.13		infiltracion final en 3 horas
Total de horas = 3:00 horas	0.06	cm	




CIRO A. QUILLATUPA ORDÓNEZ
ING. CIVIL
CIP N° 255597

Figura 56 — Resultado del ensayo de infiltración con tratamiento 1.50 L/m2 de fondo

Anexo H

Panel de fotografía de los certificados de calibración de los equipos



METROLAB Y CALIDAD S.A.C.
Laboratorio de Metrología - Servicio con Tecnología y Calidad

CERTIFICADO DE CALIBRACION N° 835 - LT - 2024

LABORATORIO DE TEMPERATURA Página 1 de 2

Expediente : 053- MYC - 2024
 Solicitante : MULTISERVICIOS G&S LAS BAMBAS SAC
 Dirección : Av. Cristo de los Andes s/n Chalhuanhuacho - Apurímac

Equipo : HORNO ELECTRICO DIGITAL
 Marca : A&A INSTRUMENTS
 Modelo : STHX-3A Dring Oven
 Numero de serie : 14416
 Procedencia : CHINA
 Identificación : LS-81

Instrumento medicion : Termometro Digital Selector : S18
 Marca / Modelo : DELTA OHM Marca / Modelo : SALZER
 Alcance de Indicación : -50 °C a 400 °C Alcance de Indicación : 0 °C a 200 °C
 División de Escala : 0.01 °C División de Escala : 1 °C
 Lugar de Calibración : Laboratorio de Suelos Multiservicios G&S las Bambas SAC
 Fecha de Calibración : 11/09/2024

Método de Calibración
 La Calibración se realizó por comparación directa según el PC-018, 2da Ed. "Procedimiento Para la Calibración Caracterización de Medios Isotermos con Aire como medio Termostático"

Lugar de Calibración
 Laboratorio de Suelos Multiservicios G&S las Bambas SAC


Condiciones Ambientales

	Inicial	Final
Temperatura (°C)	55.5	52.8 °C
Humedad Relativa (%HR)	55.8	52.3 °C

Patrones de Referencia
 Los resultados de la calibración son trazables a la Unidad de Medida de los Patrones Nacionales de masa de la Dirección de Metrología - INACAL en concordancia con el Sistema Internacional de Unidades de Medidas (SI) y el Sistema Legal de Unidades del Perú (SLUMP)

Trazabilidad	Patrón Utilizado	Certificado de Calibración
Patrones de referencia del SNM - INACAL	TERMOMETRO DE INDICACION DIGITAL Rango de Indicación -50°C a 400 °C	TERMOMETRÍA INACAL Exp. 1951156 LT - 213 - 2023
Patrones de referencia del SNM - INACAL	Termohigrómetro Patrón de Resolución 0,1 °C / 1 %HR	METROLOGIA INACAL 1AT-0030-2024 Exp. 1A24225

Sello
Fecha de Emisión
Jefe de Laboratorio de Metrología



2024/09/13

METROLAB Y CALIDAD S.A.C.

Miguel Ángel Jesus Bullock
Jefe Laboratorio

METROLAB Y CALIDAD SAC - LABORATORIO DE METROLOGIA
 Dirección: PASADÉ SANTIAGO MZA E, LOTE N° 2, SANTIAGO CUSCO - PERU Teléfono: (084) 206172 Cel: 978 648 580
www.metrolab.com.pe | metrolab@metrolab.com.pe | www.metrolab.com.pe | [metrolab.com.pe](http://www.metrolab.com.pe)

Figura 57 — Certificado de calibración de horno eléctrico página 01



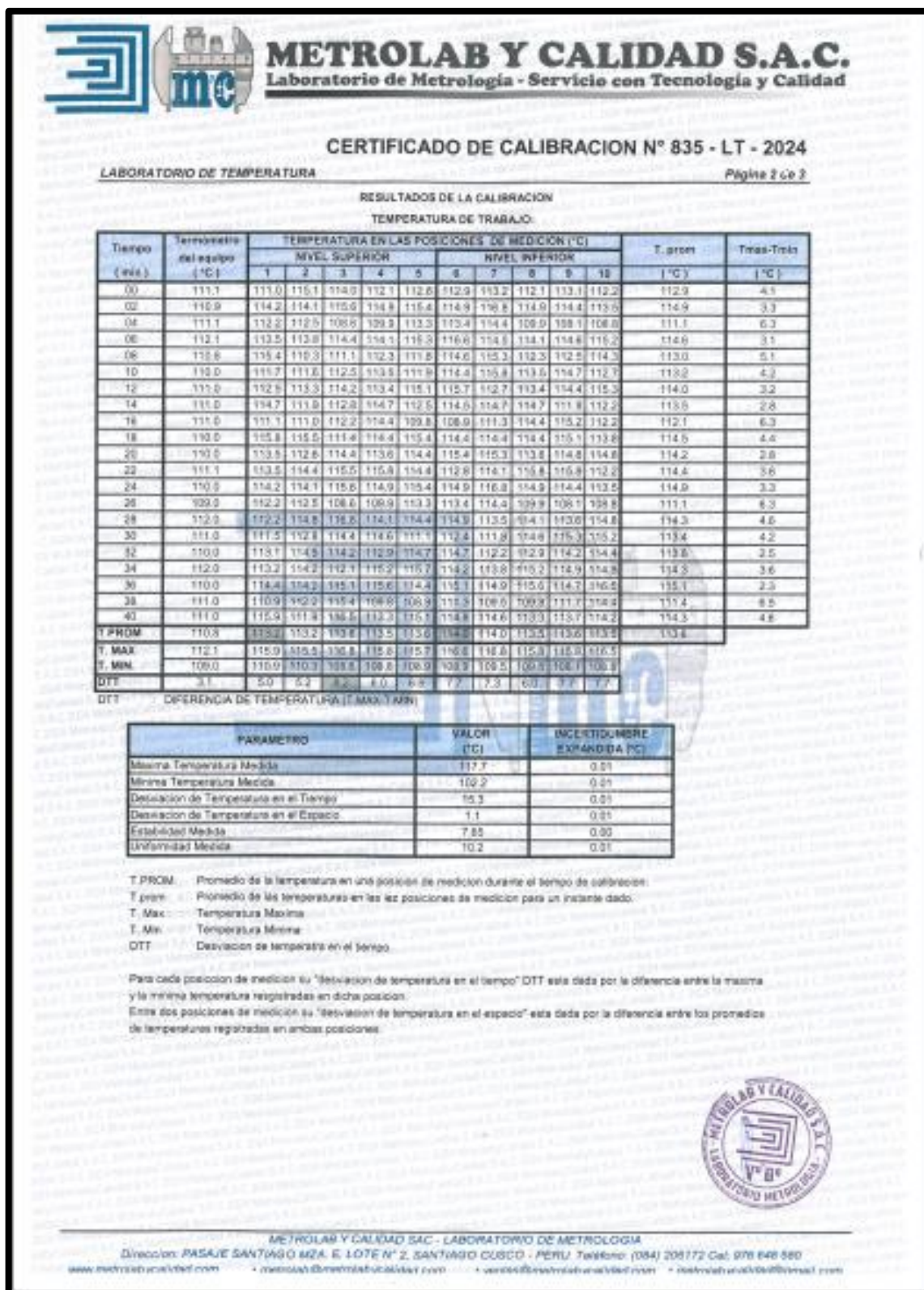


Figura 58 — Certificado de calibración de horno eléctrico página 02



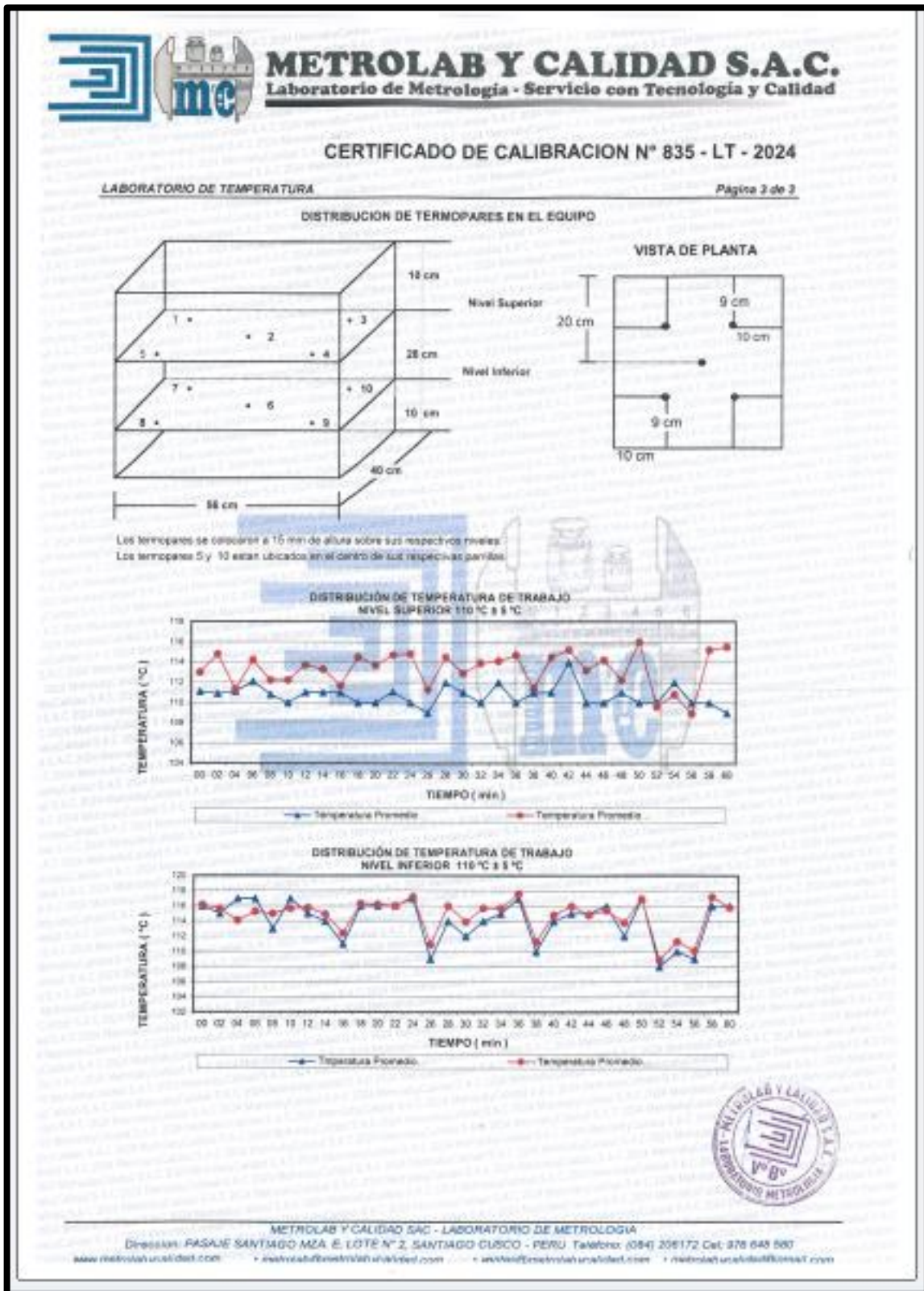



Figura 59 — Certificado de calibración de horno eléctrico página 03





METROLAB Y CALIDAD S.A.C.

Laboratorio de Metrología - Servicio con Tecnología y Calidad

CERTIFICADO DE CALIBRACION Nº 828-LL-2024

Laboratorio de Longitud y Angulo
Página 1 de 2

Expediente	: 053 -MYC-2024	
Solicitante	: MULTISERVICIOS G&S LAS BAMBAS SAC	La incertidumbre reportada en el presente informe es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición".
Dirección	: Av. Cristo de los Andes s/n Chalhuanhuacho - Apurímac	
Instrumento de Medición	: CALIBRADOR - VERNIER	
Marca	: UYUSTOOLS	
Identificación	: LJ - 142	
Número de Serie	: NO INDICA	Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.
Ubicación	: NO INDICA	
Tipo	: MECÁNICO	La periodicidad de la calibración depende del uso mantenimiento y conservación del instrumento de medición.
Modelo	: CLA012	
Alcance de Indicación	: 0,00 mm a 300,00 mm	
División de Escala	: 0,02 mm	
Procedencia	: NO INDICA	Este Certificado de Calibración, no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio emisor.
Fecha de Calibración	: 2024-09-11	


Método de Calibración
 Según el "Procedimiento de Calibración de Pie de Rey" - PC-012, 5ta Edición - Agosto 2012, del Servicio Nacional de Metrología SNM – INDECOP.

Lugar de Calibración
 Laboratorio de Suelos Multiservicios G&S las Bambas SAC

Condiciones Ambientales

	Inicial	Final
Temperatura (°C)	13.8	14.2
Humedad (%)	50.3	51.1

Sello




Fecha de Emisión

13/09/2024

Jefe de Laboratorio de Metrología

METROLAB Y CALIDAD S.A.C.



Miguel Ángel Ruiz Sallica
JEFE LABORATORIO


METROLAB Y CALIDAD S.A.C. - LABORATORIO DE METROLOGÍA

Dirección: PASAJE SANTIAGO MZA. E. LOTE N° 2, SANTIAGO-CUSCO - PERU. Teléfono: (084) 206172 Cel: 976 648 580

www.metrolabycalidad.com • metrolab@metrolabycalidad.com • ventas@metrolabycalidad.com • metrolabycalidad@bambas.com

Figura 60 — Certificado de calibración de calibrador vernier página 01





METROLAB Y CALIDAD S.A.C.

Laboratorio de Metrología - Servicio con Tecnología y Calidad

CERTIFICADO DE CALIBRACION N° 828- LL -2024

Laboratorio de Longitud y Angulo
Página 2 de 2

Patrones de referencia

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
Patrones de referencia del SNM-INACAL	Bloques patrón longitud, grado 0	INACAL (LA-C-085-2023) Exp. N° 1051156
Patrones de referencia del SNM-INACAL	Termómetro patrón de resolución 0,1 °C	INACAL LT - 219 - 2023 Exp. N° 1051156
Patrones de referencia del SNM-INACAL	Termohigrómetro patrón de resolución 0,5 °C / 1 NHR	METROLAB - INACAL 1AT-2530-2024 Exp. 1A24228

Observaciones

Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva, el cual hace referencia al número del presente informe de calibración.

Los resultados obtenidos en la calibración del Pie de Rey son conformes

RESULTADOS

ERROR DE REFERENCIA INICIAL (I) = 0 µm

ERROR DE INDICACIÓN DE PIE DE REY


Valor Patrón (mm)	Promedio de la indicación del Pie de Rey (mm)	Error para medición de exteriores (µm)	Error para medición de interiores (µm)	Error para medición de profundidad (µm)	E.m.p (*) (µm)
5.00	5.00	0.0	5	5	20
10.00	10.00	0.0	10	10	20
20.00	20.00	3.3	20	20	20
30.00	30.00	0.0	30	30	20
40.00	40.00	3.3	40	40	20
50.00	50.00	0.0	50	50	20
99.99	100.00	-0.2	100	100	20
199.99	200.00	2.8	200	200	30
249.98	250.00	-0.7	250	250	30

(*) EMP: Errores máximos permitidos para Pie de Rey, según norma DIN 862 - 1988

Incertidumbre de medición: $\sqrt{[(25.64^2 + 0.11^2 * L^2)]}$ µm

Nota1: Error de indicación del pie de rey para medición de interiores = Error de indicación de exteriores + Error de cambio de escala de exteriores a interiores (SE-I).

Nota2: Error de indicación del pie de rey para medición de profundidad = Error de indicación de exteriores + Error de cambio de escala de exteriores a profundidad (SE-P).



Fin de Documento


METROLAB Y CALIDAD S.A.C. - LABORATORIO DE METROLOGÍA

Dirección: PASAJE SANTIAGO MZA. E. LOTE N° 2, SANTIAGO CUSCO - PERU. Teléfono: (084) 206172 Ccc: 978 648 580

www.metrolabycalidad.com • metrolab@metrolabycalidad.com • ventas@metrolabycalidad.com • metrolabycalidad@gmail.com

Figura 61 — Certificado de calibración de calibrador vernier página 02





METROLAB Y CALIDAD S.A.C.

Laboratorio de Metrología - Servicio con Tecnología y Calidad

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

826-LL-2024

Laboratorio de Longitud

Pág. 1 de 2

Expediente	: 053-MYC-2024	Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales o internacionales, que realizan las unidades de la medición de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).
Solicitante	: MULTISERVICIOS G&S LAS BAMBAS SAC	
Dirección	: Av. Cristo de los Andes s/n Chalhuhauacho - Apurímac	
Equipo	: COPA CASAGRANDE (Equipo de limite liquido)	
Marca (o Fabricante)	: FORNEY	Los resultados son validos en el momento de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración.
Modelo	: LA - 3715	
Numero de Serie	: 853	Esta certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio emisor.
Procedencia	: USA	
Código Interno	: LS-68	
Ubicación de Equipo	: Laboratorio de Suelos G&C	Los certificados de calibración sin firma y sello no son válidos.
Lugar de Calibración	: Laboratorio de Suelos Multiservicios G&S las Bambas SAC	
Fecha de Calibración	: 11-09-2024	

Método de Calibración

La calibración se realiza por comparación directa utilizando como referencia la Norma Técnica ASTM D4318 Determinación del Límite Líquido de los suelos usando equipo Casagrande.


Trazabilidad

Trazabilidad	Patron utilizado	Certificado de Calibración
Patrones de referencia del SNM - INACAL	Pie de Rey Patron de resolución 0.01 mm.	METROIL - INACAL 1A0-1115-2023, Exp. 1A17482
Patrones de referencia del SNM - INACAL	Termohigrómetro patrón de resolución 0,1 °C / 1 %HR	METROIL - INACAL 1A7-2530-2024 Exp. 1A24229

Condiciones Ambientales

Condicion Ambiental	Inicial	Final
Temperatura ° C	13.3 ° C	13.8 ° C
Humedad Relativa %	50.2	50.7


Sello



Fecha de Certificación

13/09/2024

Jefe de laboratorio de calibración



MIGUEL ÁNGEL RUIZ SOUTO


METROLAB Y CALIDAD SAC - LABORATORIO DE METROLOGIA

Dirección: PASAJE SANTIAGO MZA. E. LOTE N° 2, SANTIAGO CUSCO - PERU/ Teléfono: (084) 208172 Cel: 976 840 580

www.metrolabysac.com | metrolab@metrolabysac.com | ventas@metrolabysac.com | metrolabysac@protonmail.com

Figura 62— Certificado de calibración de copa Casagrande página 01





METROLAB Y CALIDAD S.A.C.

Laboratorio de Metrología · Servicio con Tecnología y Calidad

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

826-LL-2024

Laboratorio de Longitud
Pág. 2 de 2

Resultados

DIMENSIONES DE LA BASE DE GOMA DURA

ALTURA (mm)	PROFUNDIDAD (mm)	ANCHO (mm)
51.69	150.11	125.12

HERRIMIENTO DE RANURADO

EXTREMO CURVADO		
ESPESOR (mm)	BORDE CORTANTE (mm)	ANCHO (mm)
10.49	2.07	11.96

DIMENSIONES DE LA COPA


RADIO DE LA COPA (mm)	ESPESOR DE LA COPA (mm)	ALTURA DESDE LA GUIA DEL ELEVADOR HASTA LA BASE (mm)
95.52	2.59	60.00

DUREZA DE LA BASE DE GOMA DURA

RESILIENCIA DE LA BASE DE GOMA DURA		
Ensayo N° 1	Ensayo N° 2	Ensayo N° 3
82	83	83

Observación:

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación de "CALIBRADO"
- La incertidumbre de medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre estándar de la medición por el factor de cobertura $k=2$ para una distribución normal de aproximadamente 95 %



METROLAB Y CALIDAD S.A.C. - LABORATORIO DE METROLOGIA

Dirección: PASAJE SANTIAGO MZA. E. LOTE N° 2, SANTIAGO CUSCO - PERU. Teléfono: (084) 208172 Cel: 978 647444

www.metrolabycalidad.com • metrolab@metrolabycalidad.com • ventas@metrolabycalidad.com • metrolab@metrolabycalidad.com

Figura 63 — Certificado de calibración de copa Casagrande página 02





SERVIMETROL

SERVICIOS & METROLOGÍA S.A.C
LABORATORIO DE METROLOGÍA

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
SMF - 113 - 2024

Página 1 de 3

Expediente	24-0124	<p>Los resultados del certificado son válidos sólo para el objeto calibrado y se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones y no deben utilizarse como certificado de conformidad con normas de producto.</p> <p>Se recomienda al usuario recalibrar el instrumento a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos con base en las características del trabajo realizado, el mantenimiento, conservación y el tiempo de uso del instrumento.</p> <p>SERVICIOS & METROLOGÍA S.A.C. no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado de este instrumento, ni de una incorrecta interpretación de los resultados de la calibración aquí declarados.</p> <p>Este certificado de calibración es trazable a patrones nacionales o internacionales, los cuales realizan las unidades de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI). Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite.</p> <p>El certificado de calibración sin firma y sello carece de validez.</p>
1. Solicitante	MULTISERVICIOS G & S LAS BAMBAS S.A.C.	
2. Dirección	Cal. Patron Santiago N° s/n Chall; huahuacho Cotabambas - APURIMAC	
3. Equipo	PRENSA DE CONCRETO	
Capacidad	100000 kgf	
Marca	FORNEY	
Modelo	F-110KN-VFD/AUTO - Int230	
Número de Serie	14128	
Identificación	NO INDICA	
Procedencia	U.S.A.	
Indicación	DIGITAL	
Marca	NO INDICA	
Modelo	NO INDICA	
Número de Serie	NO INDICA	
Resolución	10 kgf	
4. Fecha de Calibración	2024-11-07	
5. Fecha de Emisión	2024-11-11	

Sello



Jefe de Laboratorio



Firmado digitalmente por
ELEAZAR CESAR CHAVEZ RARAZ
Fecha: 2024.11.11 19:39:20 -05'00'


ventasservimetrol@gmail.com
aservimetrol@gmail.com
cservimetrol@gmail.com

938102709
938327400

Cal.37 Mza. A-34 Lote. 29 Urb. Cultura Peruana Moderna Lima- Lima- Santa Anita

Figura 64— Certificado de calibración de prensa hidráulica página 01





SERVIMETROL

SERVICIOS & METROLOGÍA S.A.C
LABORATORIO DE METROLOGÍA

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
SMF - 113 - 2024

Página 2 de 3

6. Método de Calibración


La calibración se realizó por el método de comparación directa utilizando patrones trazables al SI calibrados en las Instalaciones del LEDI-PUCP tomado como referencia el método descrito en la norma UNE-EN ISO 7500-1 "Verificación de Máquinas de Ensayo Uniaxiales Estáticos. Parte 1: Máquinas de ensayo de tracción/compresión. Verificación y calibración del sistema de medida de fuerza." - Julio 2006.

7. Lugar de calibración

Las Instalaciones del cliente.
Calle 36 Mz. 11 Lt. 1 Edificio los Tulipanes. Urb. El Pinar - Comas -Lima

8. Condiciones Ambientales

	Inicial	Final
Temperatura	23,3 °C	23,9 °C
Humedad Relativa	67 % HR	67 % HR



9. Patrones de referencia

Trazabilidad	Patrón utilizado	Informe/Certificado de calibración
Celdas patrones calibradas en HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GmbH - Alemania 2023-1 87747	Celda de carga calibrado a 150 tn con Incertidumbre del orden de 0,6 %	LEDI-PUCP INF-LE-071-24A

10. Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la Indicación CALIBRADO.
- Durante la realización de cada secuencia de calibración la temperatura del equipo de medida de fuerza permanece estable dentro de un intervalo de $\pm 2,0$ °C.
- El equipo no indica clase sin embargo cumple con el criterio para máquinas de ensayo uniaxiales de clase de 1,0 según la norma UNE-EN ISO 7500-1.

ventasservimetrol@gmail.com
aservimetrol@gmail.com
cservimetrol@gmail.com

938102709
938327400

Cal.37 Mza. A-34 Lote. 29 Urb.
Cultura Peruana Moderna
Lima- Lima- Santa Anita

Figura 65— Certificado de calibración de prensa hidráulica página 02



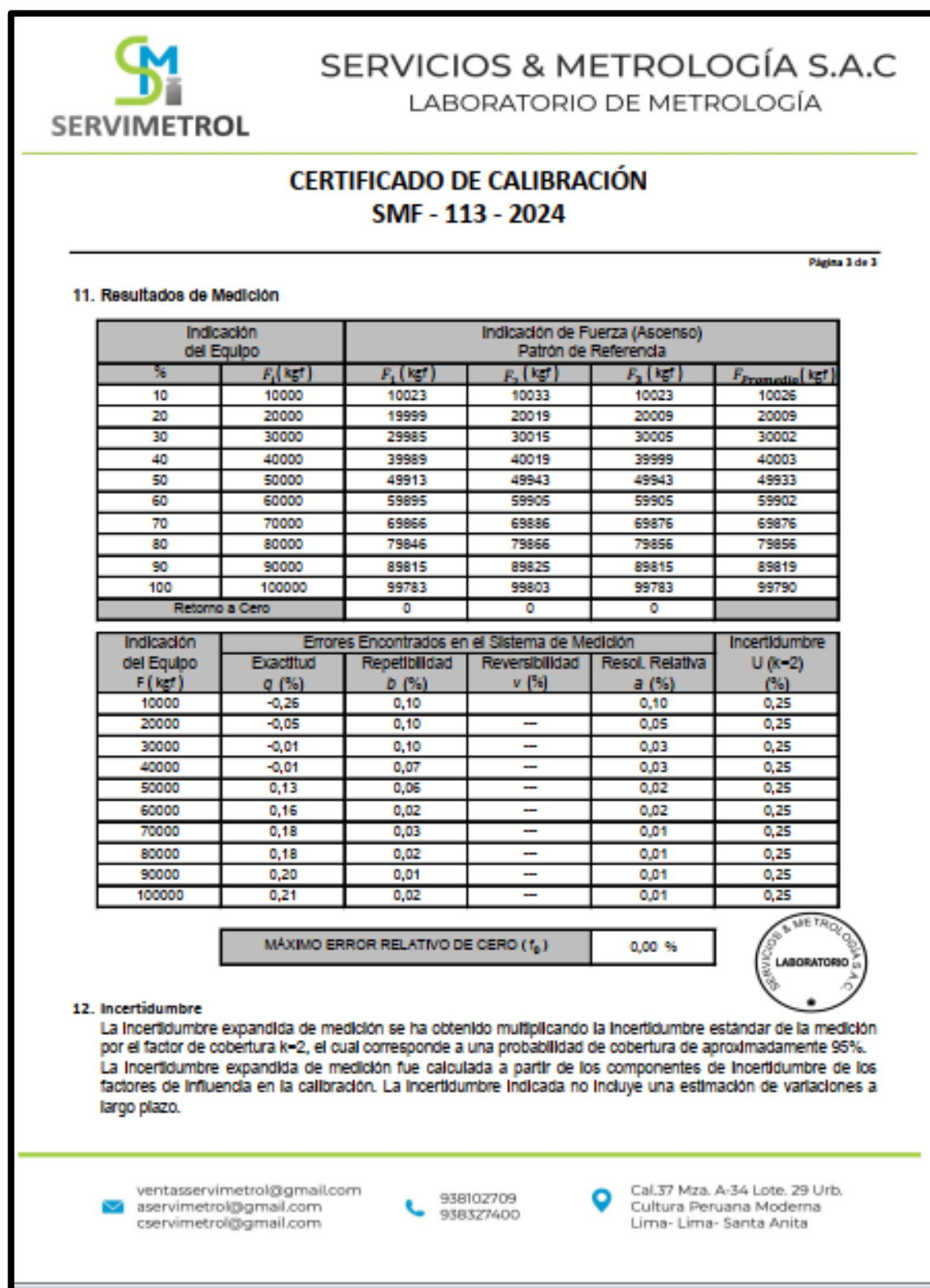


Figura 66— Certificado de calibración de prensa hidráulica página 03

