EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL PASTO VETIVER EN APLICACIONES PARA EL CONTROL DE EROSION HIDRICA EN TALUDES

MAYCON ESTEBAN QUIÑONES CABANZO

Universidad de la Salle

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Bogotá D.C.

2024

EVALUACION DEL POTENCIAL DEL PASTO VETIVER EN APLICACIONES PARA EL CONTROL DE EROSION HIDRICA EN TALUDES

MAYCON ESTEBAN QUIÑONES CABANZO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al titulo de Ingeniero Civil

Director

MSC Edgar Alexander Padilla González

Universidad de la Salle

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Bogotá D.C.

2024

Tabla de contenido

Resumen 8

Introducción 9

Descripción del problema 10

Pregunta de investigación 11

Objetivos 12

Objetivo general 12

Objetivos específicos 12

Marco de referencia 12

Marco teórico 12

Erosión 12

Pasto vetiver 13

Características especiales 14

Marco Conceptual 19

Talud 19

Erosión 19

Suelo 20

Degradación del suelo 20

Etnobotánica 21

Marco Legal 21

Ley 2811 de 1974 21

INVIAS Art. 811 – 13 21

Antecedentes 23

Desarrollo de la investigación 24

Metodología y Materiales 24

Fase 1: Diagnostico 25

Fase 2: Caracterización física y mecánica 25

Fase 3: Simulación a escala 25

Fase 4: Seguimiento de prototipos 25

Resultados y análisis 26

Conclusiones 64

Recomendaciones 66

Bibliografía 66

Lista de figuras

Figura 1. Efecto de la temperatura del suelo sobre el crecimiento de la raíz del vetiver (The Vetiver Network International, 2009) 18

Figura 2. Precipitación mensual promedio de la estación Buenavista (23125100) en los años 2004 a 2024 29

Figura 3. Precipitación mensual promedio de la estación Coper (23120210) en los años 2004 a 2024 30

Figura 4. Esfuerzos de corte directo 45

Figura 5. Curva IDF 52

Figura 6. Cajón de escorrentía 53

Figura 7. Coeficientes de impermeabilidad 54

Figura 8. Volúmenes de escorrentía para cada talud 60

Figura 9. Volúmenes de infiltración para cada talud 61

Figura 10. Suelo erosionado en ambos taludes a escala 62

Figura 11. Taludes erosionados con y sin alternativa 63

Lista de tablas

Tabla 1. Resultados ensayo humedad 33

Tabla 2. Resultados ensayo peso unitario 34

Tabla 3. Resultados ensayo gravedad especifica 35

Tabla 4. Resultados ensayo granulométrico 37

Tabla 5. Datos de entrada al ensayo de corte directo 41

Tabla 6. Resultados ensayo corte directo para 0,25 42

Tabla 7. Resultados ensayo corte directo para 0,5 43

Tabla 8. Resultados ensayo corte directo para 1 44

Tabla 9.Resultados el ensayo de corte directo 44

Tabla 10. Resumen resultados de laboratorio 45

Tabla 11. Precipitación máxima anual de la estación BUENAVISTA (23125100) 48

Tabla 12. Precipitación máxima mensual de la estación BUENAVISTA (23125100) 49

Tabla 13. Secuencia de dias para simulación 50

Tabla 14. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas 50

Tabla 15. Datos de intensidad para la elaboración de las curvas IDF 51

Tabla 16. Dimensiones talud a escala 53

Tabla 17. Calculo altura cajón de escorrentía 55

Tabla 18. Calculo altura cajón de infiltración 55

Tabla 19. Resultados recolectados de volúmenes de escorrentía e infiltración y de porcentajes de escorrentía e infiltración para cada talud a escala. 57

Tabla 20. Resultados perdida de suelo en los taludes a escala 59

Tabla 21. Humedades antes y después de la simulación en cada talud 63

Tabla 22. Humedades siguientes dias a la simulación 64

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Comparación hierba luisa y vetiver 14

Ilustración 2. Tallos erguidos y firmes forman una densa barrera cuando el vetiver es plantado a corta (The Vetiver Network International, 2009) 15

Ilustración 3. El pasto vetiver sobrevive a los incendios forestales; a la derecha: dos meses después de la quema (The Vetiver Network International, 2009) 17

Ilustración 4. Diferencias entre las raíces de C. zizanioides (arriba) y C. nemoralis (abajo). 18

Ilustración 5. Partes de la planta Chrysopogon zizanioides 19

Ilustración 6. Localización Coper en Colombia Ilustración 7. Localización Coper en Boyacá 27

Ilustración 8. Unidad cronoestratigráfica de Coper 27

Ilustración 9. Temperatura máxima y mínima promedio en Coper 28

Ilustración 10. Zona de estudio 31

Ilustración 11. Ubicación de la zona de estudio en Google Maps 32

Ilustración 12. Muestra extraida de la zona de estudio 32

Ilustración 14. Muestra ensayo impurezas orgánicas 38

Ilustración 15. Ensayo de corte directo 40

Ilustración 16. Modelación talud natural es SLIDE 46

Ilustración 17. Modelo fisico 47

Ilustración 18. Simulacion de lluvia 48

Resumen

Esta tesis investiga la eficacia del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en la prevención de la erosión hídrica en taludes del municipio de Coper, Boyacá. En una región donde la conservación del suelo es esencial y los taludes son vulnerables a procesos erosivos activando en algunos casos movimientos en masas en algunas laderas. El uso del vetiver se presenta como una solución prometedora para la estabilización del terreno. Razón por la cual, el objetivo principal del estudio es evaluar la capacidad de esta planta para reducir la erosión y mejorar la retención de agua en suelos con pendientes pronunciadas, comparando su impacto en taludes protegidos con vetiver frente a aquellos sin protección vegetal.

Para llevar a cabo el análisis, se implementaron peceras experimentales en taludes con y sin vetiver, donde se monitorearon parámetros como infiltración, escorrentía superficial y humedad del suelo. Este enfoque permitió examinar cómo el vetiver afecta la estabilidad del suelo y su capacidad de retención hídrica. Los resultados indicaron que los taludes con vetiver presentaron un aumento gradual de infiltración de agua una reducción en la escorrentía superficial. Esto se tradujo en un equilibrio hídrico que minimizó la pérdida de suelo y ayudó a mantener una humedad estable, lo cual es crucial para suelos arenosos con bajo nivel de cohesión.

La investigación concluye que el sistema profundo del vetiver refuerza la estructura del suelo, funcionando como una barrera natural contra la erosión y estabilizando áreas susceptibles a deslizamientos. En conjunto, los hallazgos demuestran que el uso del

vetiver es una herramienta viable y sostenible para la conservación del suelo en zonas agrícolas y en proyectos de infraestructura que demandan estabilidad en terrenos inclinados.

Introducción

La investigación sobre la pertinencia y efectividad de las técnicas destinadas a la estabilización de taludes es crucial en el contexto colombiano, donde los frecuentes deslizamientos de tierra generan impactos negativos en la infraestructura vial, afectando especialmente a los municipios y repercutiendo en su economía y seguridad. La necesidad de implementar enfoques pertinentes, sostenibles y eficaces no solo busca reducir los deslizamientos, sino también fomentar la conservación del suelo y la protección del entorno natural.

En este escenario, el pasto vetiver (Chrysopogon zizanioides) emerge como una opción altamente prometedora gracias a su capacidad probada para estabilizar el suelo,

El Ingeniero civil Federico Gómez de la Universidad Nacional, afirmo lo siguiente El vetiver, a pesar de que las raíces de esta planta son tan finas, es decir, delgadas, como un alambre de calibre menor, pueden funcionar como un cable de tensión que estabilice el suelo, además de tener una capacidad de penetración importante, hasta en capas rocosas o endurecidas, sin la necesidad de levantar el suelo como sí lo puede hacer la raíz de un árbol. Sin embargo, la implementación efectiva de esta planta plantea desafíos significativos que van más allá de la mera elección de la técnica. Comprender a fondo los aspectos técnicos,

económicos y ambientales asociados se convierte en una prioridad, dada la falta de métodos específicos y adaptados a las condiciones locales.

La resistencia a la adopción de nuevas prácticas y la complejidad añadida por la ausencia de lineamientos claros subrayan la necesidad de investigación en este campo. La aplicación exitosa del pasto vetiver no solo se traducirá en la mitigación de deslizamientos y la reducción de la erosión, sino que también ejercerá un impacto directo en la resiliencia de las comunidades afectadas. Al proporcionar conocimientos aplicables y pautas específicas, la investigación que llevamos a cabo tiene como propósito ser un agente impulsor esencial para la toma de decisiones informadas en el proyecto de implementación del pasto vetiver en las cercanías del municipio de Coper. Buscamos ser un recurso valioso al proporcionar análisis detallados, datos confiables y evaluaciones, apoyando activamente el proceso de toma de decisiones local y allanando el camino para una implementación exitosa del pasto vetiver y sus beneficios tanto a nivel ambiental como comunitario.

Descripción del problema

En Colombia, la incidencia de deslizamientos se ve agravada por una combinación de factores geológicos, geomorfológicos y climáticos, generando perjuicios significativos en términos de pérdidas materiales y humanas. En la actualidad se estima que los departamentos más propensos a la erosión del suelo según cifras suministradas por el IDEAM lo encabezan el Cesar (81,9%), Caldas (81,9%), Córdoba (80,9%), Cundinamarca (80,3%), Santander (79,4%), La Guajira (79,3%), Atlántico (77,9%), Magdalena (76,9%), Sucre (75,1%), Tolima (73,7%), Quindío (72,7%), Huila (72,5%) y Boyacá (72,1%) (IDEAM, 2017). A pesar de los

esfuerzos continuos para controlar la erosión en taludes, persisten desafíos sustanciales en la estabilización del suelo y la prevención efectiva de deslizamientos.

La ineficacia de las estrategias actuales resalta la urgencia de abordar estos problemas de manera más innovadora y sostenible. La implementación del pasto vetiver se presenta como una posible solución, pero es esencial entender y superar los obstáculos que podrían surgir durante su aplicación.

La falta de métodos específicos y adaptados a las condiciones locales, así como la ausencia de lineamientos claros para la correcta aplicación del pasto vetiver en taludes, agrega complejidad al problema. Además, la resistencia a la adopción de nuevas prácticas por parte de comunidades locales y profesionales del sector podría representar un desafío adicional.

En consecuencia, esta investigación se propone desarrollar técnicas sostenibles para la implementación exitosa del pasto vetiver en taludes. Al hacerlo, se espera contribuir significativamente a la mitigación de la erosión del suelo y la reducción de deslizamientos, promoviendo así la resiliencia de las áreas propensas a este tipo de eventos en Colombia.

Pregunta de investigación

¿Cuál es el desempeño de la implementación del pasto vetiver en taludes para prevenir la erosión hídrica y lograr una estabilización efectiva del suelo?

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la efectividad de la utilización de pasto vetiver para el control de la erosión hídrica en taludes.

Objetivos específicos

Desarrollar un modelo físico que simule la pérdida de suelo al implementar pasto vetiver, abarcando componentes como un simulación de lluvia, un talud inclinado y un sistema de recolección de escorrentía.

Caracterizar las condiciones físicas, mecánicas de la zona de estudio donde se implementará la alternativa.

Determinar la capacidad del pasto vetiver para el control de erosión en taludes.

Determinar mediante pruebas de laboratorio la conservación del contenido de humedad del suelo, en un talud que contenga la alternativa y otro sin ella.

Marco de referencia

Marco teórico

Erosión

La erosión del suelo es un proceso natural que implica la remoción del material superficial del suelo debido a la acción del viento o del agua. Este fenómeno ocurre cuando

el agua, ya sea en forma de lluvia o escorrentía, entra en contacto con el suelo y supera la resistencia de las partículas del suelo, llevándolas consigo.

La Ecuación Universal de Perdida de Suelos – USLE, permite predecir la cantidad de pérdida de suelo por escurrimiento en áreas específicas bajo determinados sistemas de manejo y cultivos. (CORTOLIMA)

La USLE se expresa, en el sistema métrico internacional, como: A = R*K*L.S*C*P donde:

A, es la pérdida de suelo en t/ha.año.

R, es el factor erosividad de la lluvia en Mjmm/ha.año.

K, es el factor erosionabilidad el suelo en (t/ha)/(Mj.mm/ha.h)

L, es el factor longitud del terreno (adimensional).

S, es el factor pendiente del terreno (adimensional).

C, es el factor cobertura y manejo de la vegetación (adimensional).

P, es el factor prácticas de conservación (adimensional).

Pasto vetiver

La planta de vetiver es una gramínea perenne, similar a la hierba luisa, que se caracteriza por sus tupidos penachos, inflorescencia y semillas estériles que se reproducen con dificultad. No tiene rizoma radicular o haces enraizados, y crece en grandes macollos a partir de una masa radicular muy ramificada y esponjosa. Sus tallos erguidos alcanzan una altura de 0.5 a 1.5 metros, y sus hojas son relativamente rígidas, largas y angostas, con hasta 75 cm de largo y no más de 8 mm de ancho. La panícula, donde se desarrolla la inflorescencia,

mide entre 15 a 40 cm de largo. La planta puede soportar sequías extremas e inundaciones prolongadas, y crece en una amplia variedad de suelos y niveles de fertilidad. Puede resistir temperaturas de hasta –9° C y se encuentra desde el nivel del mar hasta los 2500 metros sobre el nivel del mar (msnm).

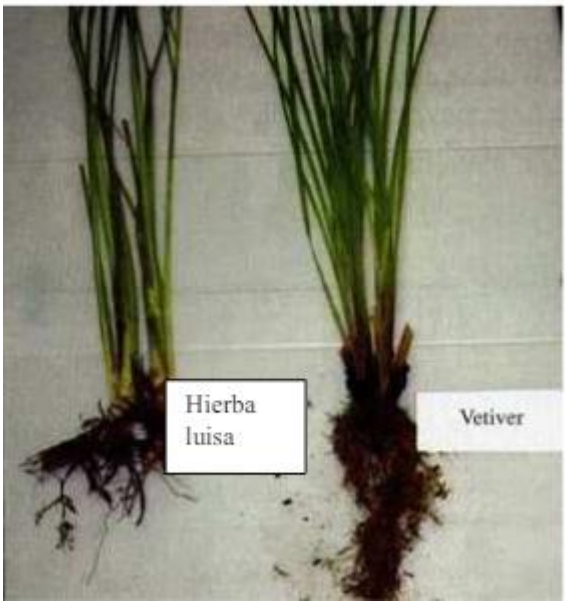


Ilustración 1. Comparación hierba luisa y vetiver

Características especiales

Las características de la planta en estudio se recopilaron del manual técnico de referencia publicado por The Vetiver Network International en el año 2009.

Morfológicas

- La planta de vetiver no tiene estolones ni rizomas funcionales. Su sistema de raíces finas y compactas crece muy rápido, en algunas aplicaciones puede alcanzar entre 3 y 4 m de profundidad en el primer año. Este profundo sistema de raíces hace que la

planta de vetiver sea extremadamente tolerante a las sequías y difícil de arrancar por fuertes corrientes.

- Tallos firmes y erguidos, que pueden soportar flujos de agua relativamente profundos. - Foto 1.
- Muy resistente a plagas, enfermedades y al fuego.
- Forma una barrera densa cuando es plantado a corta distancia actuando como un filtro muy efectivo de los sedimentos y como un dispersor del agua de escorrentía.
- Nuevos brotes se forman desde la corona subterránea haciendo al vetiver resistente al fuego, heladas, tráfico y alta presión de pastoreo.
- Cuando es enterrado por los sedimentos atrapados, crecen nuevas raíces desde los nudos. El vetiver continuará creciendo hacia arriba con los sedimentos depositados formando eventualmente terrazas, si el sedimento atrapado no es removido.

Ilustración 2. Tallos erguidos y firmes forman una densa barrera cuando el vetiver es plantado a corta (The Vetiver Network International, 2009)

Fisiológicas

- Tolerancia a variaciones climáticas extremas como sequía prolongada, inundaciones, sumersión y temperaturas extremas de -15ºC a +55ºC.

- Habilidad para rebrotar rápidamente después de haber sido afectado por sequías, heladas, salinidad y otras condiciones adversas al mejorar las condiciones del tiempo o se añadan correctivos al suelo.
- Tolerancia a un amplio rango de pH desde 3.3 a 12.5 sin enmiendas del suelo. • Alto nivel de tolerancia a herbicidas y plaguicidas.
- Alta eficiencia en absorber nutrientes tales como N y P y metales pesados en aguas contaminadas.
- Muy tolerante a medios de crecimiento altos en acidez, alcalinidad, salinidad, sodicidad y Mg. • Alta tolerancia al Al, Mn y metales pesados tales como As, Cd, Cr, Ni, Pb, Hg, Se y Zn en los suelos.

Ecológicas

Aunque el vetiver es muy tolerante a ciertas condiciones extremas de suelo y clima mencionadas arriba, como pasto tropical es muy intolerante a la sombra. La sombra reduce su crecimiento y en casos extremos, puede incluso eliminar el vetiver en el largo plazo. Por lo tanto, el vetiver crece mejor en espacios abiertos y libres de malezas, siendo necesario el control de malezas en la etapa de establecimiento. En terrenos erosionables e inestables el vetiver primero reduce la erosión, estabiliza el terreno, luego debido a la conservación de humedad y nutrientes, mejora el microambiente y otras especies espontáneas o cultivadas, pueden establecerse. Debido a esto se considera al vetiver una planta nodriza en tierras degradadas. (The Vetiver Network International, Pag. 2, 2009)

Ilustración 3. El pasto vetiver sobrevive a los incendios forestales; a la derecha: dos meses después de la quema (The Vetiver Network International, 2009)

Tolerancia planta vetiver al frio

Aunque el vetiver es una planta tropical, puede sobrevivir y desarrollarse en condiciones de frío extremo. Bajo condiciones de escarcha o helada su parte aérea muere o entra en latencia y se torna color púrpura pero sus puntos de crecimiento subterráneos sobreviven. En Australia, el vetiver no se afectó por una severa helada a -14ºC y sobrevivió por un corto período a –22ºC en el norte de China. En Georgia (EEUU), el vetiver sobrevivió a una temperatura del suelo de –10ºC pero no resistió a –15ºC. Recientes estudios demuestran que el crecimiento óptimo de raíces se presenta a temperaturas del suelo de 25ºC, pero las raíces continúan creciendo hasta 13ºC. Aunque un crecimiento muy pequeño ocurre a temperaturas del suelo en el rango entre 15ºC (día) y 13ºC el crecimiento de la raíz continúa a una velocidad de 12.6cm/día, indicando que el pasto vetiver no entra en latencia a esta temperatura y por extrapolación se estima que la latencia ocurre a 5ºC. (Figura 1) (The Vetiver Network International, Pag. 2, 2009)

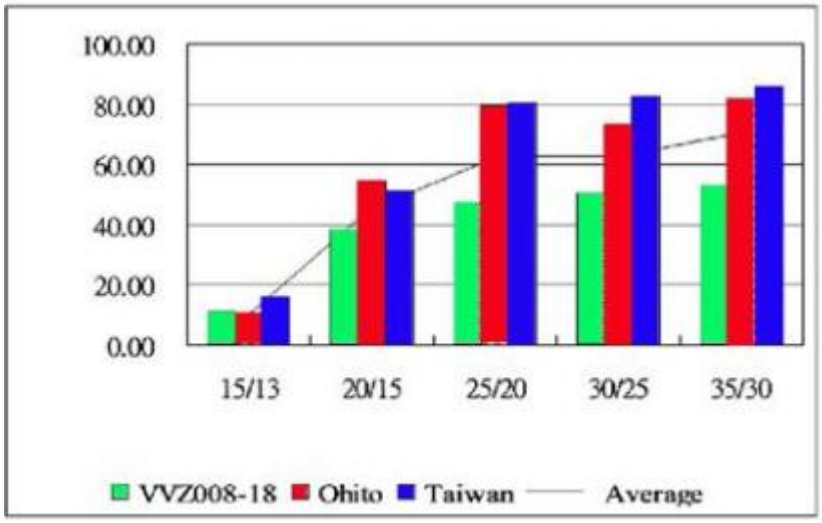


Figura 1. Efecto de la temperatura del suelo sobre el crecimiento de la raíz del vetiver (The Vetiver Network International, 2009)

Características genéticas

Son utilizadas tres especies de vetiver con propósitos de protección ambiental, las cuales son Vetiveria zizanioides L reclasificada como Chrysopogon zizanioides L, Chrysopogon nemoralis, Chrysopogon nigritana. Para efectos de nuestra investigacion optamos por utilizar la planta Chrysopogon zizanioides ya que es una planta con raicez mas largas y fuertes.

Ilustración 4. Diferencias entre las raíces de C. zizanioides (arriba) y C. nemoralis (abajo).

A continuación, se muestran las partes de la planta vetiver (Chrysopogon zizanioides).

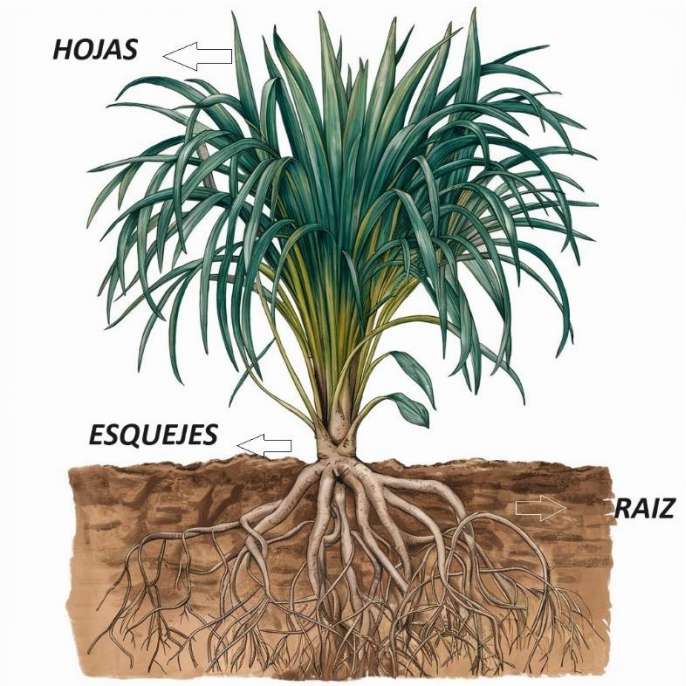


Ilustración 5. Partes de la planta Chrysopogon zizanioides

Marco Conceptual

Talud

Un talud es una superficie inclinada, con respecto a la horizontal, que adoptan permanente o provisionalmente las estructuras de tierra. Estos pueden ser artificiales, cuando están construidos por el hombre en sus obras de ingeniería (terraplén o desmonte), o naturales (laderas). Asimismo, pueden ser de suelos, rocas o mixtos, variando a su vez la metodología de estudio. (R. Valiente Sanz, 2016)

Erosión

La erosión del suelo consiste en la remoción, arranque y transporte de los materiales que constituyen el suelo. Este proceso puede ser causado por el impacto directo de las gotas de lluvia, conocido como erosión por salpicadura (splash erosion), o por el

transporte de material por el agua de escorrentía que fluye en forma de lámina de agua sobre la superficie del suelo (flujo no concentrado). Además, la erosión en regueros (rill erosion) ocurre cuando la concentración de escorrentía genera un caudal con energía suficiente para que la fuerza cortante del agua supere la resistencia del suelo, dando lugar a la incisión de regueros. (S. de Alba Alonso, 2011)

Suelo

El suelo es como una gran comunidad donde viven muchos organismos diferentes, desde pequeños insectos hasta microorganismos. Estos organismos ayudan a descomponer y transformar materiales, lo que es esencial para mantener el suelo saludable.

El suelo está compuesto por varias cosas: minerales, materia orgánica (como restos de plantas y animales), agua, aire y los organismos vivos que mencionamos. La forma en que estos componentes se organizan y se mezclan afecta a los organismos que viven en el suelo y también a la cantidad de agua, nutrientes y gases disponibles.

La formación del suelo es un proceso que puede ser influenciado tanto por la naturaleza (como el clima y el tipo de roca madre) como por las actividades humanas (como la agricultura y la construcción). Hay diferentes tipos de suelos, y cada tipo tiene características únicas que determinan qué tipo de plantas pueden crecer en ellos. (R. Anadon, U de Oviedo)

Degradación del suelo

La degradación de los suelos y las tierras hace referencia a la disminución de la producción, de su calidad y de su capacidad para cumplir con las funciones y servicios ecosistémicos; por tanto, el diagnóstico de este proceso es de vital importancia para la toma

de decisiones en lo referente a la gestión sostenible de los suelos a nivel nacional e internacional (IDEAM, 2019).

Etnobotánica

La etnobotánica es el estudio de las relaciones entre las plantas y las personas. Se enfoca en cómo las diferentes culturas usan las plantas en su vida diaria, ya sea para alimentación, medicina, rituales o cualquier otro propósito. Este campo de estudio es importante porque ayuda a conservar el conocimiento tradicional sobre las plantas y sus usos, lo cual es parte del patrimonio cultural de una comunidad. Además, la etnobotánica puede promover el desarrollo sostenible y tener beneficios económicos, como atraer turismo ecológico. (M. Pardo de Santayana, 2003)

Marco Legal

Ley 2811 de 1974

Esta ley contempla que el uso de los suelos debe estar en función de sus condiciones y factores constitutivos, y que además el uso potencial y clasificación de los suelos se debe hacer según los factores físicos, ecológicos y socioeconómicos de la región en estudio. También se señala dentro de esta ley que el aprovechamiento de los suelos debe efectuarse considerando su integridad física y su capacidad productiva, complementado con el ejercicio de la conservación y el manejo adecuado de los suelos. (MADS, 2013).

INVIAS Art. 811 – 13

Protección de taludes con productos enrollados para control de erosión. En esta especificación del INVIAS encontramos el tema referente al uso e instalación de mecanismos para control de erosión que faciliten el establecimiento de la vegetación natural en taludes o

laderas geotécnicamente estables, esto con el objetivo de controlar el proceso erosivo, aquí se toma en consideración la implementación de productos enrollados para control de erosión. (INVIAS, 2013).

Resolución 0170 del 2009

Se declara el año de los suelos y el 17 de junio como Día Nacional de los Suelos. Se adoptan medidas para la conservación y protección de los suelos en el territorio

Nacional

Ley 461 del 4 de agosto de 1998

Incorporación de Colombia en Lucha contra la Desertificación y la Sequía (UNCCD).

INV SECCIÓN 800 (Artículo 811)

Basada en AASHTO M288-05 para la construcción de Productos enrollados para control de erosión

INV E – 901

Basada en ASTM D-4632, indica el Método para la determinación de la carga de rotura y la elongación de geotextiles (método Grab)

INV E – 902

Basa en ASTM D-4833 Indica el Método para la determinación del índice de resistencia al punzonamiento de geotextiles, geomembranas y productos relacionados

Antecedentes

La erosión hídrica en taludes es un desafío significativo para la estabilidad del suelo. El pasto vetiver (Chrysopogon zizanioides) se presenta como una solución natural y sostenible para este problema. Para lo cual se hallaron investigaciones dirigidas al desarrollo de esta planta en la protección de suelos, entre los cuales están.

Control de la erosión de taludes mediante el uso de vetiver y micorrizas arbusculares, zona de soceagro en el municipio de villavicencio – meta andrés, s., restrepo, s., & solano, s. o. (s/f). salomón andrés sánchez restrepo sergio oviedo solano.

Los resultados de la implementación, se observó que el suelo con vetiver micorrizado mostró una disminución del 20% en la erosión en comparación con el suelo descapotado y una disminución del 15% en comparación con el suelo con vetiver sin micorrizar. Además, se evidenció un aumento del 25% en la retención de humedad en el suelo con vetiver micorrizado en comparación con el suelo descapotado y un aumento del 18% en comparación con el suelo con vetiver sin micorrizar. Estos resultados demuestran la efectividad de la técnica de vetiver micorrizado en la estabilización del suelo y el control de la erosión en taludes.

Influencia del vetiver y eucalipto en la estabilización de taludes. chaparro-sarmiento, l. d., castañeda-quijano, w. j., & sánchez-ortiz, ó. f.

Se encontró que el eucalipto proporciona un mejor incremento en el factor de seguridad en comparación con el vetiver, especialmente en suelos arcillosos y arenosos. En suelos arcillosos, el refuerzo con eucalipto aumentó significativamente el factor de seguridad

de 1.254, con un aumento promedio del 25%. En suelos arenosos, el eucalipto también mostró un mayor impacto en el factor de seguridad de 1.453, con un aumento promedio del 20%. Además, se observará que la presencia de niveles freáticos afectó excesivamente el factor de seguridad en suelos arcillosos, disminuyéndolo en un promedio del 30%. Por otro lado, se encontró que el eucalipto puede disminuir el factor de seguridad del talud en suelos húmedos, con una disminución promedio del 15%, pero su aporte a la cohesión del suelo lo hace efectivo como estabilizador.

Desarrollo de la investigación

En esta sección se detalla el proceso de investigación, estructurado en capítulos y subcapítulos que describen las acciones implementadas para alcanzar los objetivos del proyecto. Los capítulos principales incluyen: Metodología y materiales, resultados y análisis de resultados, Conclusiones y Recomendaciones, términos ampliamente conocidos y comprendidos en el ámbito de la investigación.

Metodología y Materiales

Dado que la investigación se enfoca en evaluar la eficiencia del pasto vetiver para disminuir la erosión hídrica mediante pruebas en taludes a escala en peceras de vidrio, fue necesario establecer una metodología detallada. Esta metodología tiene como objetivo comprender el comportamiento del pasto vetiver frente a la erosión hídrica, basado en los resultados obtenidos. Se definieron varias fases, comenzando con el diagnóstico y culminando con la simulación de taludes a escala en dos peceras de vidrio, una con la implementación del pasto vetiver y otra sin ella.

Fase 1: Diagnostico

En esta fase se presenta el contexto geográfico, climático e hidrológico del municipio donde se ubica la zona de estudio.

Fase 2: Caracterización física y mecánica

Se realizaron diversos ensayos de laboratorio en las instalaciones de la Universidad de La Salle para caracterizar físicamente y analizar el comportamiento del suelo del talud natural.

Fase 3: Simulación a escala

En esta fase se llevó a cabo una simulación a escala para evaluar la efectividad del pasto vetiver en la prevención de la erosión hídrica. Se utilizaron dos peceras para crear un modelo controlado de taludes. En una de las peceras, se plantó pasto vetiver, mientras que la otra se mantuvo sin vegetación para servir como control. Ambos modelos fueron sometidos a condiciones de lluvia simulada para observar y comparar la cantidad de erosión. Esta configuración permitió una evaluación clara y directa del impacto del pasto vetiver en la estabilización del suelo frente a la erosión hídrica.

Fase 4: Seguimiento de prototipos

Se realizó un seguimiento diario de las dos peceras durante los cuatro días de simulación para evaluar la eficacia del vetiver en la reducción de la erosión hídrica. Durante este período, se registraron datos de humedad antes y después de cada aplicación de agua, así como los volúmenes de infiltración y escorrentía. Al finalizar la simulación, se continuó monitoreando la humedad del suelo en ambos modelos para observar su capacidad de retención de agua. Este procedimiento permitió analizar en detalle el comportamiento del

suelo en presencia y ausencia de vetiver, evaluando tanto la retención de sedimentos como la estabilidad general del suelo frente a la erosión hídrica.

Resultados y análisis

Descripción de la zona de estudio

El municipio de Coper, ubicado en la provincia de Occidente del departamento de Boyacá, se sitúa a los 05º 28' 40" de latitud norte y 74º 02' 55" de longitud oeste. El área urbana se encuentra a una altitud de 950 m s. n. m., mientras que el territorio en su conjunto abarca un rango altitudinal de 600 a 2600 m s. n. m. La temperatura media anual es de 23 °C y la precipitación media anual alcanza los 3.152 mm, lo que resulta en la presencia de tres pisos térmicos y, por ende, una diversidad de productos agrícolas y pecuarios.

El municipio limita al norte con Maripí (Boyacá); al sur con Paime y San Cayetano (Cundinamarca); al oeste con Muzo (Boyacá) y Paime; y al este con Buenavista y Carmen de Carupa (Cundinamarca).

Coper tiene una extensión de 202 km², distribuidos en tres pisos térmicos: 171 km² de clima cálido, 17 km² de clima templado y 14 km² de clima frío.

Ilustración 6. Localización Coper en Colombia

Ilustración 7. Localización Coper en Boyacá

De acuerdo con el Sistema Geológico Colombiano (SGC, 2020) el municipio de Coper posee una unidad cronoestratigráfica “b2b6-Sm” que corresponde a Shales con yeso, cherts, calizas y arenitas de la edad del Valanginiano – Albiano.

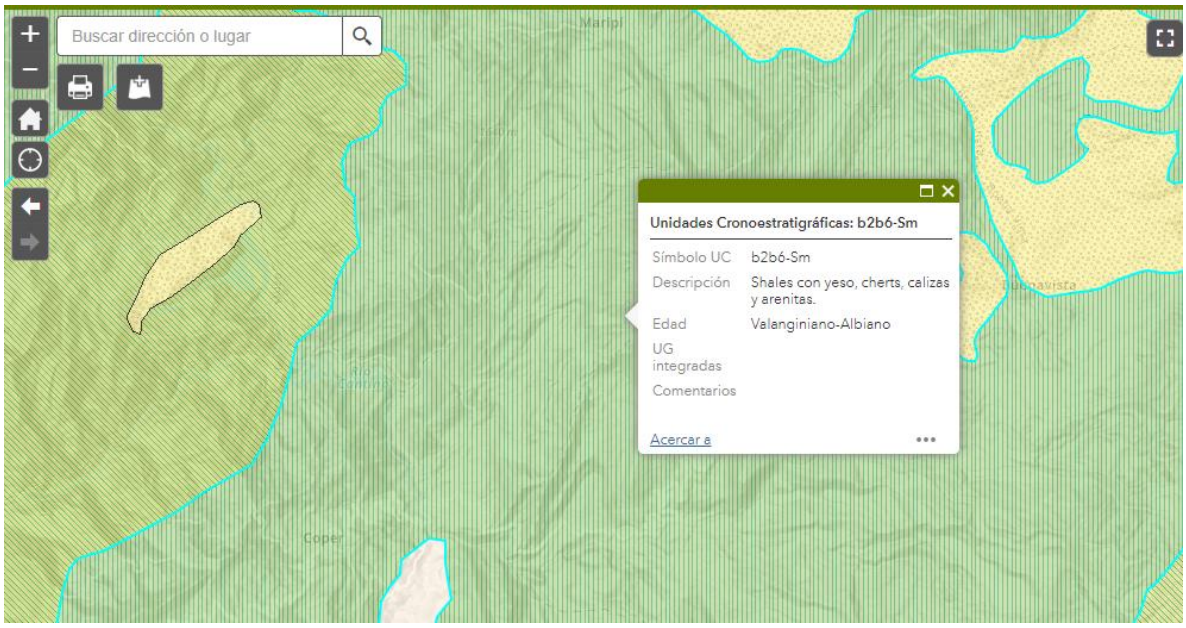


Ilustración 8. Unidad cronoestratigráfica de Coper

Climatología e hidrología de la zona

En Coper, la temporada templada dura aproximadamente 2.3 meses, desde el 15 de enero hasta el 24 de marzo, con una temperatura máxima diaria promedio que supera los 26 °C. Mayo es típicamente el mes más cálido del año, con temperaturas máximas y mínimas promedio de 26 °C y 17 °C, respectivamente. Por otro lado, la temporada fresca dura alrededor de 1,7 meses, desde el 14 de octubre hasta el 6 de diciembre, con una temperatura máxima diaria promedio inferior a 26 °C. El mes más frío del año es diciembre, con temperaturas mínimas y máximas promedio de 16 °C y 26 °C, respectivamente. (WeatherSpark, 2016)

Sin embargo, el año 2011 se destacó por ser el más lluvioso registrado, con precipitaciones en todos los meses y abril sobresaliendo como el mes más húmedo del periodo.

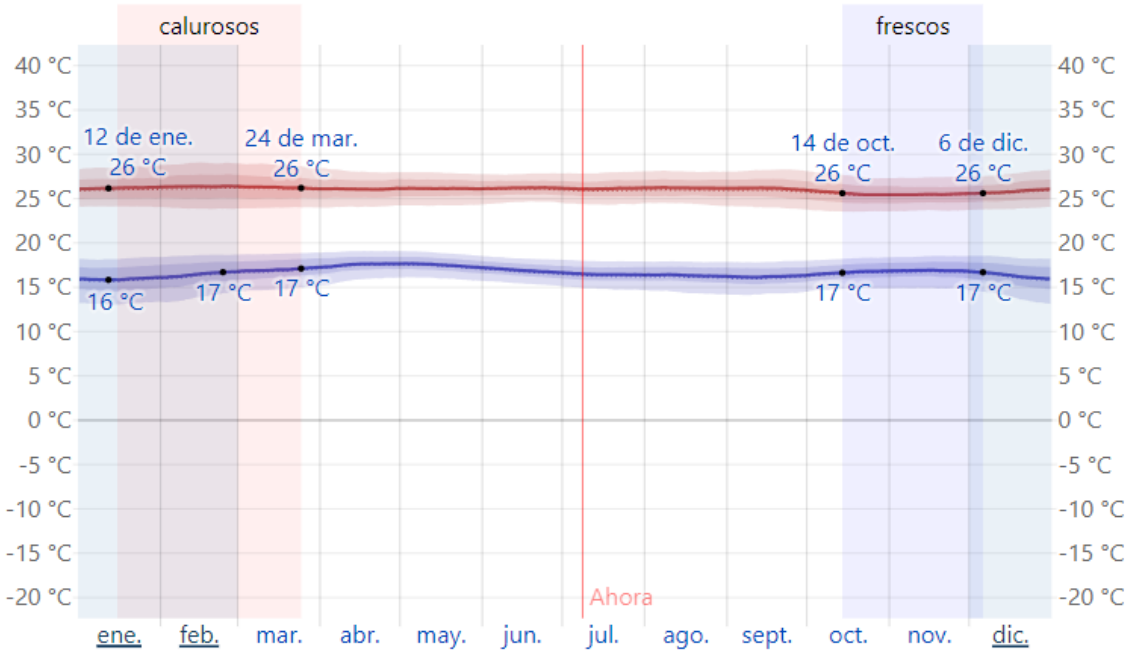


Ilustración 9. Temperatura máxima y mínima promedio en Coper

En cuanto a la precipitación del municipio de Coper se realizó un análisis hidrológico de la zona con la ayuda de datos de precipitación mensual en un periodo de 17 años (2007 – 2022), estos datos fueron obtenidos del IDEAM y se obtuvieron de las dos estaciones más cercanas a la zona de estudio; Buenavista (23125100) y Coper (23120210). Con los datos que proporcionaron las estaciones se estableció la precipitación mensual por cada año.

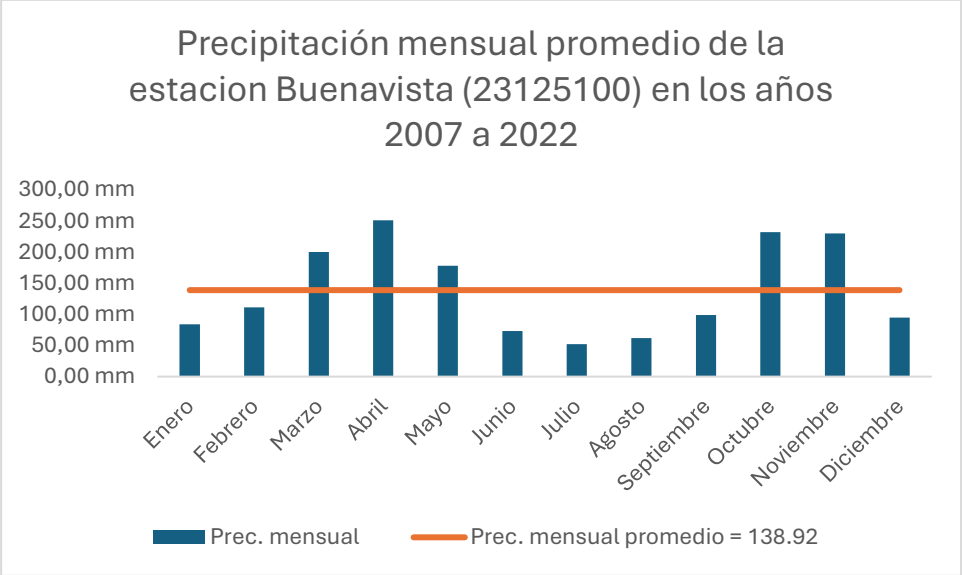


Figura 2. Precipitación mensual promedio de la estación Buenavista (23125100) en los años 2004 a 2024

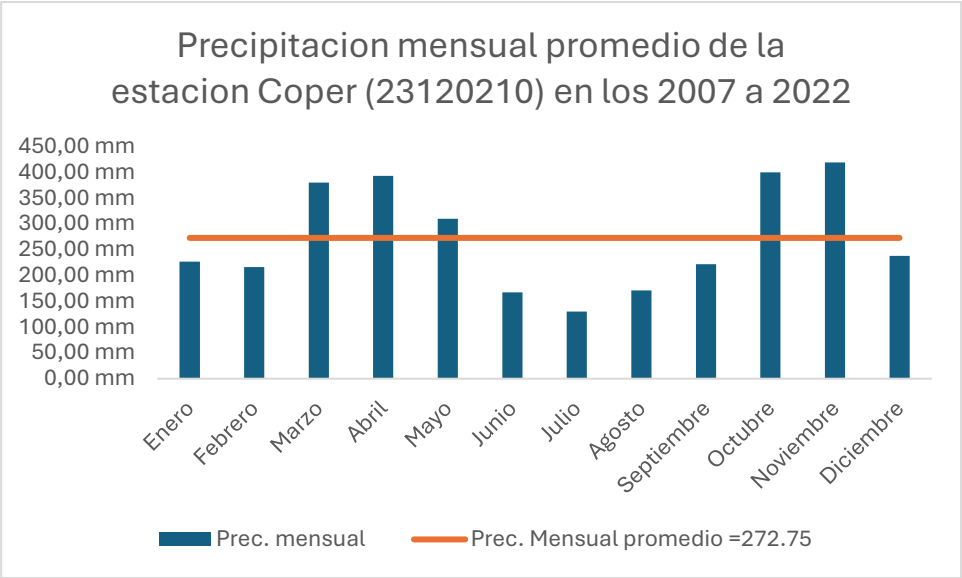


Figura 3. Precipitación mensual promedio de la estación Coper (23120210) en los años 2004 a 2024

Al realizar el cálculo de los promedios mensuales de todos los años se observa que las estaciones escogidas en cercanías a la zona de estudio presentan un comportamiento bimodal ya que hay dos cambios de periodo seco a húmedo. Por lo cual se tomarán datos de los periodos húmedos para su respectiva evaluación y simulación.

Ensayos de laboratorio

Se determinó que el suelo del talud natural en la zona de estudio hace parte del estrato superficial, caracterizado visualmente como un macizo altamente meteorizado con zonas de oxidación y acumulación de detritos. Las coordenadas de la ubicación son (N: 5°30’ 28.563’’, W: 74°0’ 47.634’’) y su ubicación con la herramienta Google Maps.

Ilustración 10. Zona de estudio

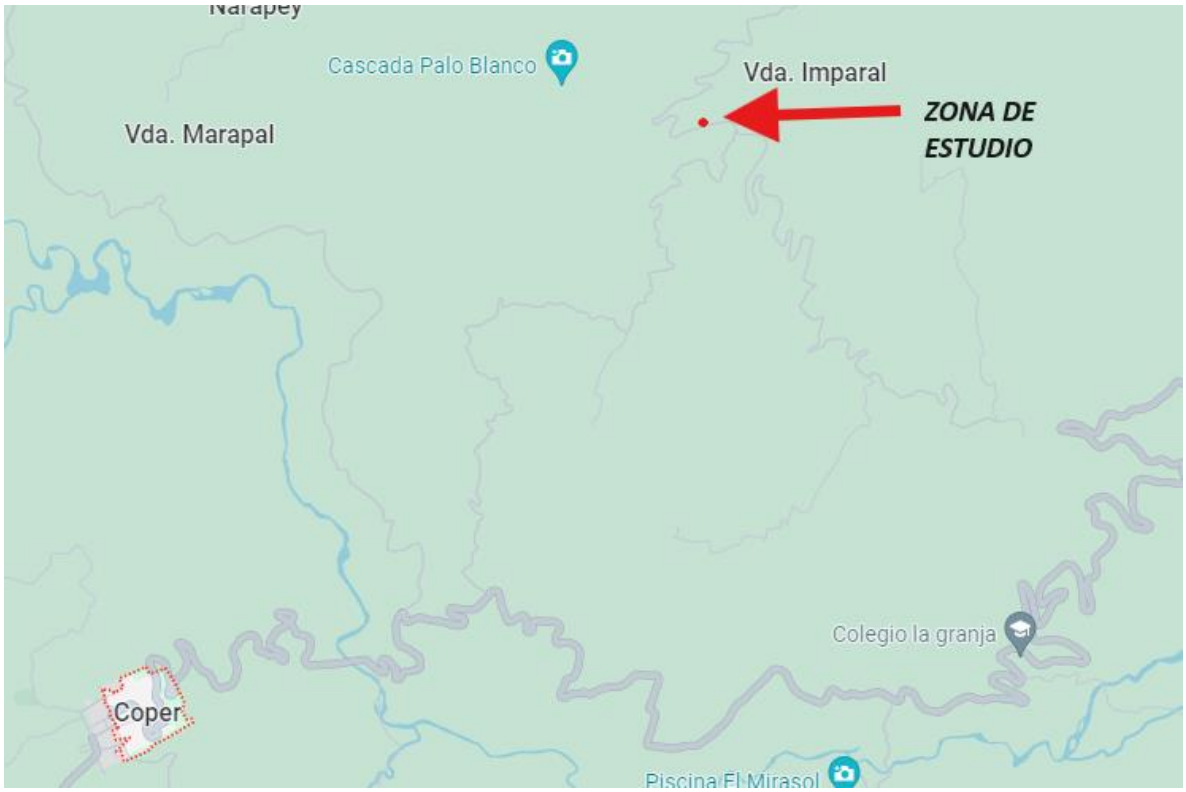


Ilustración 11. Ubicación de la zona de estudio en Google Maps

Se extrajo una muestra significativa en un balde de 5 galones con un peso aproximado de 35 kg, la cual se envolvió en vinipel para preservar la humedad del terreno y asegurar su transporte seguro a las instalaciones del laboratorio.

Ilustración 12. Muestra extraída de la zona de estudio

La información de los ensayos realizados al suelo se organizó de la siguiente manera: normas aplicables, cálculos requeridos y, en algunos casos, evidencias fotográficas. Es importante señalar que las variables de las ecuaciones presentadas en los ensayos de laboratorio se adaptaron a una nomenclatura adecuada para el investigador.

Ensayo de humedad

Norma: INV E-122-13 "*Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo –agregado"*

Cálculos:

$$w = \frac{Wsh - Wss}{Wss} * 100$$

Donde:

w = humedad (%)

Wsh = peso del suelo húmedo (g)

Wss = peso del suelo seco (g)

Ww = peso del agua (g)

Los datos tomados y calculados se pueden ver en el siguiente cuadro.

Humedad natural	
Peso suelo húmedo	137,50 g
Peso suelo seco	120,70 g
Peso tazón	37,50 g
Humedad	20,19%

Tabla 1. Resultados ensayo humedad

Ensayo peso unitario

Norma: INV E-734-13 "*Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas absorbentes empleando especímenes recubiertos con una película de parafina"*, En este caso, se reemplazó el espécimen de mezcla asfáltica por una muestra de grava del suelo extraída de la zona del talud natural para los ensayos.

Cálculos:

$$\rho s = \frac{Ws}{(Ws + p) - (Ws + ps) - \frac{(Ws + p) - Ws}{dp}}$$

Donde:

ρs = peso unitario del suelo (g/cc)

Ws = peso del suelo seco al aire(g)

Ws + p = peso del suelo envuelto en parafina al aire (g)

Ws + ps = peso del suelo envuelto en parafina sumergido (g)

dp = densidad de la parafina (g/cc)

Los datos tomados y calculados se pueden ver en el siguiente cuadro.

Peso unitario	
Peso suelo	7,80 g
Peso suelo + parafina	10,88 g
Peso suelo + parafina sumergido	3,10 g
Densidad parafina	0,75 g/cm3
Peso unitario	2,12 g/cm3

Tabla 2. Resultados ensayo peso unitario

Ensayo gravedad especifica

Norma: INV E-128-13 "*Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua"*, en el cual se usa el método de remoción de aire por ebullición.

Cálculos:

$$Gs = \frac{Ws}{Wbw - (Wbws - Ws)} * k$$

Donde:

Gs = gravedad específica (adimensional)

Ws = peso del suelo seco (g)

Wbw = peso picnómetro + agua de curva de calibración según temperatura de ensayo (g)

Wbws = peso del conjunto picnómetro + agua + suelo a temperatura de ensayo (g)

k = factor de corrección basado en el peso específico del agua a 20°C (adimensional), (ver Tabla 128-2 de la norma INVIAS)

Los datos tomados y calculados se pueden ver en el siguiente cuadro.

Gravedad especifica	
Peso muestra seca	50,00 g
Peso pic. + agua destilada	684,95 g
Peso pic. + agua destilada + muestra seca	714,53 g
Gravedad especifica	2,504

Tabla 3. Resultados ensayo gravedad especifica

Ensayo de granulometría

Norma: Primero se registra el peso del material seco, luego se procede a lavar en el tamiz #200 para eliminar los limos y arcillas presentes. Luego se seca y se registra el peso de material retenido en el tamiz #200, al cual se le practica el ensayo INV E-123-13 "*Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos"* para el caso de las partículas mayores de 75 µm (retenidas en el tamiz No. 200).

Cálculos:

$$\%Finos = \frac{Wst - Wa}{Wst} * 100$$

$$\%Arenas = \frac{Wa}{Wst} * 100$$

Donde:

%Finos = porcentaje de material fino en la muestra de suelo seca (%)

%Arenas = porcentaje de arena en la muestra de suelo seca (%)

Wst = peso total del suelo tamizado (g)

Wa = peso seco de las arenas retenidas en el tamiz #200 (g)

$$\%Retenido = \frac{Wri}{Wrt} * 100$$

$$\%Retenido\ acumulado = \%Retenido + \%Retenido\ acumulado\ anterior$$

$$\%Pasa = 100\% - \%Retenido\ acumulado$$

Donde:

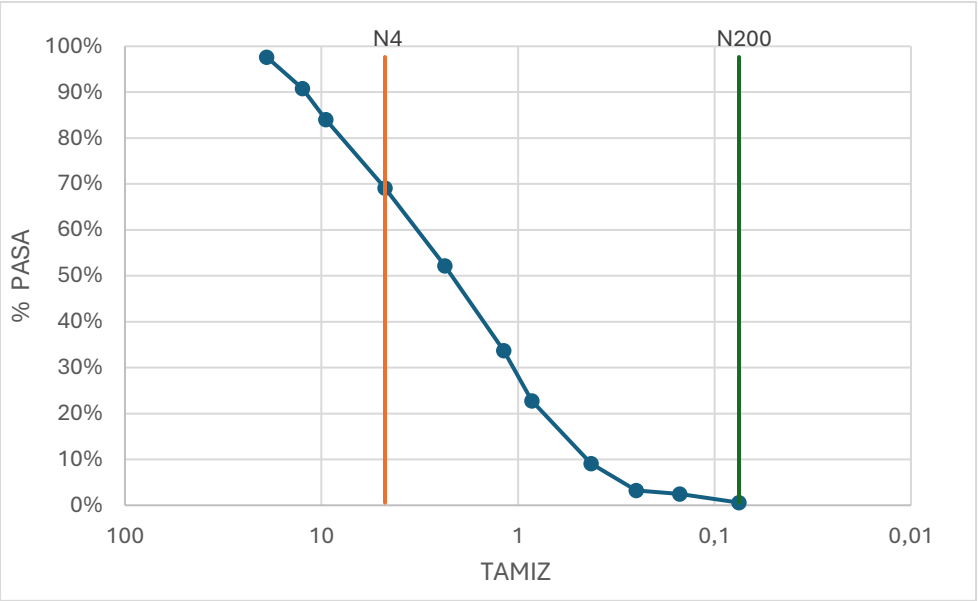
Wri = peso retenido en cada tamiz (g)

Wrt = peso retenido total (g)

Los datos tomados y calculados se pueden ver en el siguiente cuadro.

Granulometría					
Tamiz	**Mm**	**Peso retenido**	**%Retenido**	**%Retenido acumulado**	**%Pasa**
1'	**25**	0 g	0%	0%	100%
3/4	**19**	117 g	2%	2%	98%
1/2	**12,5**	342 g	7%	9%	91%
3/8	**9,5**	340 g	7%	16%	84%
#4	**4,75**	746 g	15%	31%	69%
#8	**2,36**	846 g	17%	48%	52%
#16	**1,18**	923 g	18%	66%	34%
#20	**0,85**	547 g	11%	77%	23%
#40	**0,425**	685 g	14%	91%	9%
#60	**0,25**	292 g	6%	97%	3%
#100	**0,15**	39 g	1%	98%	2%
#200	**0,075**	94 g	2%	99%	1%
Filler		29 g	1%	100%	0%
TOTAL		5000 g			
%Arenas		68.5%			
%Finos		0,6%			
%Gravas		30.9%			

Tabla 4. Resultados ensayo granulométrico



Ensayo de impurezas orgánicas

Norma: INV E-212-13 "*Presencia de impurezas orgánicas en arenas"*

Para este ensayo después de colocar la muestra 24 horas en la solución de hidróxido de sodio y por medio de la tableta de vidrios de colores de referencia, se determinó que el suelo tiene un nivel alto de impurezas orgánicas, detonando un color más oscuro al de referencia.

Ilustración 13. Muestra ensayo impurezas orgánicas

Ensayo de corte directo-drenada

Norma: INV E-154-13 "*Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada CD"*

Cálculos:

$$C = \frac{\sigma * Ai * Wp}{10}$$

Donde:

C = peso a aplicar al espécimen para ensayo de corte directo (kg)

σ = esfuerzo a evaluar (kg/cm2)

Ai = área inicial superior del espécimen para ensayo de corte directo (kg)

Wp = peso del pistón (kg)

$$Ac = a * (l - DH)$$

Donde:

Ac = área corregida (cm2)

a = ancho del espécimen para ensayo de corte directo (cm)

l = largo del espécimen para ensayo de corte directo (cm)

DH = lectura de deformación horizontal de la máquina de corte directo (cm)

$$\sigma n = \frac{\sigma * Ai}{Ac}$$

Donde:

σn = esfuerzo normal (kg/cm2)

σ = esfuerzo a evaluar (kg/cm2)

Ai = área inicial superior del espécimen para ensayo de corte directo (cm2)

Ac = área corregida (cm2)

$$\tau = \frac{Fh}{Ac}$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante (kg/cm2)

σn = esfuerzo normal (kg/cm2)

Ac = área corregida (cm2)

Ilustración 14. Ensayo de corte directo

Esfuerzo	s	kg/cm2	0,25	0,5	1
DIMENSIONES DE LA MUESTRA					
Ancho	a	mm	59,75	59,83	59,58
Longitud	l	mm	60,1	59,52	59,99
Espesor	e	mm	22,08	22,5	23,4
Area	A	cm2	35,91	35,61	35,74
CARGA APLICADA					
Peso del piston	Wp	kg	0,541		
Peso a aplicar	F	kg	1,8	4,5	7,8
PROPIEDAD DEL SUELO					
Recipiente	-	N°	2	132	45
Peso recipiente	Wr	g	39,25	38,55	40
Pr + Mh		g	136,7	150	232
Pr + Ms		g	128,3	135,5	209,5
Humedad	H	%	16,39	14,9	13,27

Tabla 5. Datos de entrada al ensayo de corte directo

Esfuerzo	0,25 Kg/cm2						
Datos	**T**	**F**	**DH**	**DV**	**Area corregida**	**Esfuerzo normal**	**Esfuerzo cortante**
1	28 s	0,484 kgf	0,006 cm	0,003 cm	35,874 cm2	0,2502 kg/cm2	0,0135 kg/cm2
2	41 s	0,484 kgf	0,012 cm	0,006 cm	35,838 cm2	0,2505 kg/cm2	0,0135 kg/cm2
3	47 s	0,494 kgf	0,018 cm	0,008 cm	35,802 cm2	0,2508 kg/cm2	0,0138 kg/cm2
4	55 s	0,495 kgf	0,024 cm	0,010 cm	35,766 cm2	0,2510 kg/cm2	0,0138 kg/cm2
5	63 s	0,651 kgf	0,030 cm	0,012 cm	35,731 cm2	0,2513 kg/cm2	0,0182 kg/cm2
6	94 s	1,519 kgf	0,060 cm	0,013 cm	35,551 cm2	0,2525 kg/cm2	0,0427 kg/cm2
7	127 s	1,606 kgf	0,090 cm	0,013 cm	35,372 cm2	0,2538 kg/cm2	0,0454 kg/cm2
8	162 s	1,917 kgf	0,120 cm	0,017 cm	35,193 cm2	0,2551 kg/cm2	0,0545 kg/cm2
9	196 s	2,374 kgf	0,150 cm	0,020 cm	35,014 cm2	0,2564 kg/cm2	0,0678 kg/cm2
10	230 s	2,564 kgf	0,180 cm	0,023 cm	34,834 cm2	0,2577 kg/cm2	0,0736 kg/cm2
11	295 s	2,859 kgf	0,240 cm	0,027 cm	34,476 cm2	0,2604 kg/cm2	0,0829 kg/cm2
12	372 s	3,323 kgf	0,300 cm	0,025 cm	34,117 cm2	0,2631 kg/cm2	0,0974 kg/cm2
13	447 s	3,688 kgf	0,360 cm	0,024 cm	33,759 cm2	0,2659 kg/cm2	0,1092 kg/cm2
14	587 s	3,866 kgf	0,480 cm	0,012 cm	33,042 cm2	0,2717 kg/cm2	0,1170 kg/cm2
15	733 s	4,391 kgf	0,600 cm	0,002 cm	32,325 cm2	0,2777 kg/cm2	0,1358 kg/cm2
16	880 s	4,413 kgf	0,720 cm	0,002 cm	31,608 cm2	0,2840 kg/cm2	0,1396 kg/cm2
17	1025 s	5,166 kgf	0,840 cm	0,035 cm	30,891 cm2	0,2906 kg/cm2	0,1672 kg/cm2
18	1167 s	5,354 kgf	0,960 cm	0,052 cm	30,174 cm2	0,2975 kg/cm2	0,1775 kg/cm2
19	1308 s	5,649 kgf	1,080 cm	0,055 cm	29,457 cm2	0,3048 kg/cm2	0,1918 kg/cm2
20	1451 s	5,949 kgf	1,200 cm	0,055 cm	28,740 cm2	0,3124 kg/cm2	0,2070 kg/cm2
				σ prom		0,2679 kg/cm2	
				τ máx		0,2070 kg/cm2	

Esfuerzo	0,25 Kg/cm2

Datos	T	F	DH	DV	Area corregida	Esfuerzo normal
1	28 s	0,484 kgf	0,006 cm	0,003 cm	35,874 cm2	0,2502 kg/cm2
2	41 s	0,484 kgf	0,012 cm	0,006 cm	35,838 cm2	0,2505 kg/cm2
3	47 s	0,494 kgf	0,018 cm	0,008 cm	35,802 cm2	0,2508 kg/cm2
4	55 s	0,495 kgf	0,024 cm	0,010 cm	35,766 cm2	0,2510 kg/cm2
5	63 s	0,651 kgf	0,030 cm	0,012 cm	35,731 cm2	0,2513 kg/cm2
6	94 s	1,519 kgf	0,060 cm	0,013 cm	35,551 cm2	0,2525 kg/cm2
7	127 s	1,606 kgf	0,090 cm	0,013 cm	35,372 cm2	0,2538 kg/cm2
8	162 s	1,917 kgf	0,120 cm	0,017 cm	35,193 cm2	0,2551 kg/cm2
9	196 s	2,374 kgf	0,150 cm	0,020 cm	35,014 cm2	0,2564 kg/cm2
10	230 s	2,564 kgf	0,180 cm	0,023 cm	34,834 cm2	0,2577 kg/cm2
11	295 s	2,859 kgf	0,240 cm	0,027 cm	34,476 cm2	0,2604 kg/cm2
12	372 s	3,323 kgf	0,300 cm	0,025 cm	34,117 cm2	0,2631 kg/cm2
13	447 s	3,688 kgf	0,360 cm	0,024 cm	33,759 cm2	0,2659 kg/cm2
14	587 s	3,866 kgf	0,480 cm	0,012 cm	33,042 cm2	0,2717 kg/cm2
15	733 s	4,391 kgf	0,600 cm	0,002 cm	32,325 cm2	0,2777 kg/cm2
16	880 s	4,413 kgf	0,720 cm	0,002 cm	31,608 cm2	0,2840 kg/cm2
17	1025 s	5,166 kgf	0,840 cm	0,035 cm	30,891 cm2	0,2906 kg/cm2
18	1167 s	5,354 kgf	0,960 cm	0,052 cm	30,174 cm2	0,2975 kg/cm2
19	1308 s	5,649 kgf	1,080 cm	0,055 cm	29,457 cm2	0,3048 kg/cm2
20	1451 s	5,949 kgf	1,200 cm	0,055 cm	28,740 cm2	0,3124 kg/cm2
				σ prom		0,2679
				Ʈ máx		0,2070

Tabla 6. Resultados ensayo corte directo para 0,25

Esfuerzo	0,50 Kg/cm2						
Datos	**T**	**F**	**DH**	**DV**	**Area corregida**	**Esfuerzo normal**	**Esfuerzo cortante**
1	29 s	0,579 kgf	0,006 cm	0,002 cm	35,575 cm2	0,5005 kg/cm2	0,0163 kg/cm2
2	39 s	0,715 kgf	0,012 cm	0,003 cm	35,539 cm2	0,5010 kg/cm2	0,0201 kg/cm2
3	50 s	2,086 kgf	0,018 cm	0,003 cm	35,503 cm2	0,5015 kg/cm2	0,0588 kg/cm2
4	57 s	3,054 kgf	0,024 cm	0,004 cm	35,467 cm2	0,5020 kg/cm2	0,0861 kg/cm2
5	68 s	4,421 kgf	0,030 cm	0,006 cm	35,431 cm2	0,5025 kg/cm2	0,1248 kg/cm2
6	102 s	5,021 kgf	0,060 cm	0,008 cm	35,252 cm2	0,5051 kg/cm2	0,1424 kg/cm2
7	136 s	5,398 kgf	0,090 cm	0,009 cm	35,072 cm2	0,5077 kg/cm2	0,1539 kg/cm2
8	173 s	5,723 kgf	0,120 cm	0,010 cm	34,893 cm2	0,5103 kg/cm2	0,1640 kg/cm2
9	206 s	6,380 kgf	0,150 cm	0,011 cm	34,713 cm2	0,5129 kg/cm2	0,1838 kg/cm2
10	240 s	6,403 kgf	0,180 cm	0,011 cm	34,534 cm2	0,5156 kg/cm2	0,1854 kg/cm2
11	317 s	7,215 kgf	0,240 cm	0,010 cm	34,175 cm2	0,5210 kg/cm2	0,2111 kg/cm2
12	395 s	7,722 kgf	0,300 cm	0,004 cm	33,816 cm2	0,5265 kg/cm2	0,2284 kg/cm2
13	469 s	8,300 kgf	0,360 cm	0,001 cm	33,457 cm2	0,5322 kg/cm2	0,2481 kg/cm2
14	617 s	8,779 kgf	0,480 cm	0,015 cm	32,739 cm2	0,5439 kg/cm2	0,2682 kg/cm2
15	764 s	9,534 kgf	0,600 cm	0,029 cm	32,021 cm2	0,5561 kg/cm2	0,2977 kg/cm2
16	904 s	10,259 kgf	0,720 cm	0,040 cm	31,303 cm2	0,5688 kg/cm2	0,3277 kg/cm2
17	1036 s	10,983 kgf	0,840 cm	0,044 cm	30,585 cm2	0,5822 kg/cm2	0,3591 kg/cm2
18	1164 s	11,144 kgf	0,960 cm	0,047 cm	29,867 cm2	0,5962 kg/cm2	0,3731 kg/cm2
19	1298 s	11,486 kgf	1,080 cm	0,048 cm	29,149 cm2	0,6108 kg/cm2	0,3940 kg/cm2
20	1433 s	11,602 kgf	1,200 cm	0,049 cm	28,431 cm2	0,6263 kg/cm2	0,4081 kg/cm2
				σ prom		0,5362 kg/cm2	
				Ʈ máx		0,4081 kg/cm2	

Tabla 7. Resultados ensayo corte directo para 0,5

Esfuerzo	1,00 Kg/cm2						
Datos	**T**	**F**	**DH**	**DV**	**Area corregida**	**Esfuerzo normal**	**Esfuerzo cortante**
1	15 s	1,401 kgf	0,006 cm	0,000 cm	35,706 cm2	1,0010 kg/cm2	0,0392 kg/cm2
2	26 s	2,388 kgf	0,012 cm	0,004 cm	35,671 cm2	1,0020 kg/cm2	0,0669 kg/cm2
3	39 s	12,150 kgf	0,018 cm	0,007 cm	35,635 cm2	1,0030 kg/cm2	0,3409 kg/cm2
4	47 s	13,811 kgf	0,024 cm	0,009 cm	35,599 cm2	1,0040 kg/cm2	0,3880 kg/cm2
5	56 s	15,615 kgf	0,030 cm	0,009 cm	35,563 cm2	1,0050 kg/cm2	0,4391 kg/cm2
6	97 s	17,231 kgf	0,060 cm	0,016 cm	35,385 cm2	1,0101 kg/cm2	0,4870 kg/cm2
7	139 s	19,889 kgf	0,090 cm	0,019 cm	35,206 cm2	1,0152 kg/cm2	0,5649 kg/cm2
8	180 s	23,313 kgf	0,120 cm	0,023 cm	35,027 cm2	1,0204 kg/cm2	0,6656 kg/cm2
9	219 s	25,951 kgf	0,150 cm	0,024 cm	34,848 cm2	1,0256 kg/cm2	0,7447 kg/cm2
10	255 s	25,948 kgf	0,180 cm	0,023 cm	34,670 cm2	1,0309 kg/cm2	0,7484 kg/cm2
11	332 s	26,281 kgf	0,240 cm	0,024 cm	34,312 cm2	1,0417 kg/cm2	0,7660 kg/cm2
12	406 s	26,562 kgf	0,300 cm	0,022 cm	33,955 cm2	1,0526 kg/cm2	0,7823 kg/cm2
13	484 s	26,939 kgf	0,360 cm	0,016 cm	33,597 cm2	1,0638 kg/cm2	0,8018 kg/cm2
14	629 s	27,762 kgf	0,480 cm	0,008 cm	32,882 cm2	1,0870 kg/cm2	0,8443 kg/cm2
15	770 s	28,132 kgf	0,600 cm	0,000 cm	32,167 cm2	1,1111 kg/cm2	0,8745 kg/cm2
16	909 s	28,418 kgf	0,720 cm	0,003 cm	31,452 cm2	1,1364 kg/cm2	0,9035 kg/cm2
17	1042 s	28,781 kgf	0,840 cm	0,006 cm	30,737 cm2	1,1628 kg/cm2	0,9363 kg/cm2
18	1178 s	28,965 kgf	0,960 cm	0,006 cm	30,022 cm2	1,1905 kg/cm2	0,9648 kg/cm2
19	1315 s	29,261 kgf	1,080 cm	0,006 cm	29,307 cm2	1,2196 kg/cm2	0,9984 kg/cm2
20	1452 s	29,424 kgf	1,200 cm	0,003 cm	28,592 cm2	1,2501 kg/cm2	1,0291 kg/cm2
				σ prom		1,0716 kg/cm2	
				Ʈ máx		1,0291 kg/cm2	

Tabla 8. Resultados ensayo corte directo para 1

Esfuerzo	σ	0,3 kg/cm2	0,5 kg/cm2	1 kg/cm2
Esfuerzo normal promedio	σ prom	0,3 kg/cm2	0,5 kg/cm2	1 kg/cm2
Esfuerzo cortante máximo	Ʈ máx	0,2 kg/cm2	0,4 kg/cm2	1 kg/cm2
Cohesión	c	0.1043 kg/cm2		
Angulo de fricción	ø	43,54°		

Tabla 9.Resultados el ensayo de corte directo

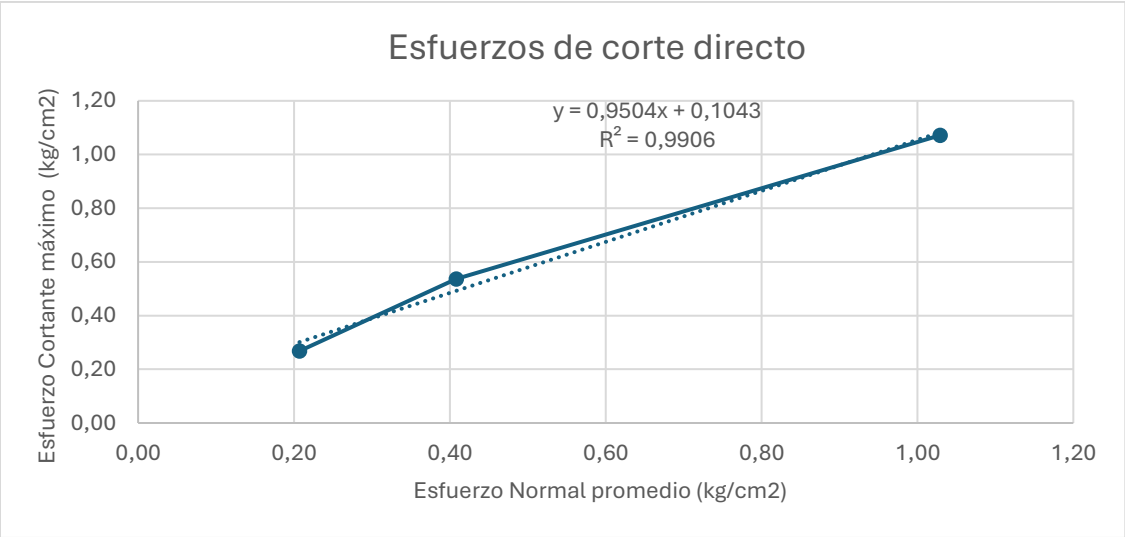


Figura 4. Esfuerzos de corte directo

A continuación, se muestra el resumen de los resultados de laboratorio para el suelo en estudio.

Ensayo	**Resultado**	
Humedad	20,19%	
Peso unitario	2,12 g/cm3	
Gravedad especifica	2,504	
Granulometría	Arenas	68,5%
	Gravas	30,9%
	Finos	0,6%
Material orgánico	Alto	
Corte directo		
Esfuerzo	Esfuerzo normal	Esfuerzo cortante
0,25 kg/cm2	0,2679 kg/cm2	0,2070 kg/cm2
0,5 kg/cm2	0,5362 kg/cm2	0,4081 kg/cm2
1,0 kg/cm2	1,0716 kg/cm2	1,0291 kg/cm2
Cohesión	0,1043 kg/cm2	
Angulo de fricción	43,54°	

Tabla 10. Resumen resultados de laboratorio

Estabilidad por métodos de equilibrio limite en SLIDE 1.0

A partir de los ensayos de caracterización del suelo, que incluyeron la determinación del peso unitario (20.8 kN/m³), cohesión (10.22 kN/m²) y ángulo de fricción (43.54°), además del análisis de la geometría del talud, se estableció un ángulo de inclinación de 40°. Este ángulo, seleccionado con base en estudios previos, es el que favorece una mayor erosión y se ajustó a la escala de las peceras para la simulación. Con estos parámetros, se realizó un modelado detallado mediante el método simplificado de Bishop en el software SLIDE, con el objetivo de evaluar la estabilidad del talud a través del cálculo del factor de seguridad. Los métodos de equilibrio límite integrados en el programa proporcionaron una estimación precisa de la resistencia del talud frente a posibles fallas, fundamentando el análisis para la prevención y mitigación de riesgos relacionados con la estabilidad del terreno.

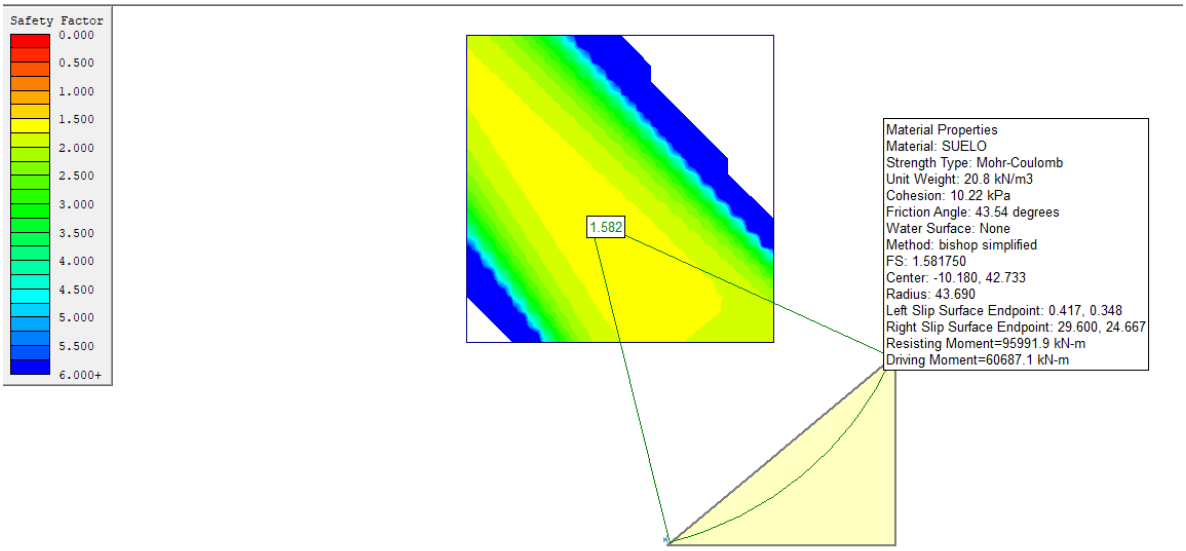


Ilustración 15. *Modelación talud natural es SLIDE*

Modelo físico

Se elaboró un recipiente tipo pecera de cristal de 3 mm de espesor con dimensiones 30 x 40 cm, en el interior 4 escalones en acrílico de 10 cm de largo y 3,44 cm de ancho, con perforaciones de 1 mm de diámetro con el fin de permitir el flujo de la precipitación. En la parte inferior se realiza un cajón en acrílico con el propósito de observar la pérdida del suelo.

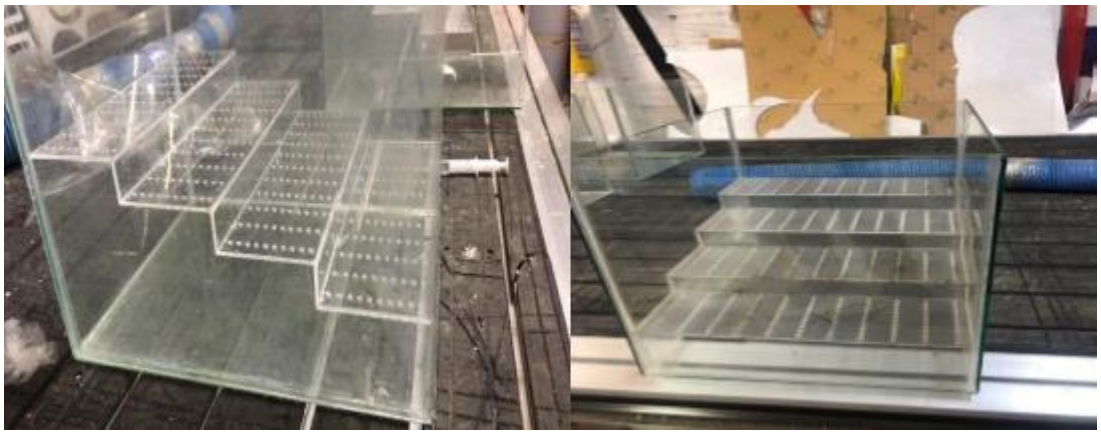


Ilustración 16. Modelo fisico

Sistema de simulación de lluvia

Se diseñó un sistema de simulación de lluvia a escala en el laboratorio, utilizando una malla tubular con múltiples orificios que permiten el drenaje del agua por gravedad desde un depósito ubicado en la parte superior del sistema. Este sistema incluye una válvula para controlar el caudal y así cumplir con el nivel de precipitación propuesto, el cual es 0.37L/min. Para asegurar que las condiciones de precipitación fueran similares a las del área de estudio, se realizaron varias pruebas utilizando agujas de diferentes diámetros. En estas pruebas, se determinó que el tiempo máximo de simulación de riego continuo era de 8 horas, necesario para vaciar completamente el depósito. Utilizar orificios más pequeños para extender el riego a 24 horas causaba estancamiento y obstrucción de los orificios, lo que alteraba las pruebas

de precipitación. Es importante destacar que los registros de precipitación del área de estudio se toman a 24

horas. El valor de precipitación máxima anual promedio, obtenido del análisis de la estación más cercana a la zona de estudio (estación BUENAVISTA [23125100]), fue de 138.47 mm, como se muestra en la Tabla10 .

Ilustración 17. Simulacion de lluvia

Nombre Estación	BUENAVISTA [23125100]
Años	**Pmax anual**
2007	153,97 mm
2008	144,79 mm
2009	136,78 mm
2010	156,01 mm
2011	232,89 mm
2012	120,23 mm
2013	118,23 mm
2014	107,85 mm
2015	84,45 mm
2016	120,30 mm
2017	120,05 mm
2018	146,79 mm
2019	136,53 mm
2020	111,58 mm
2021	144,84 mm
2022	180,28 mm
Total, general	**2215,57 mm**
Pmax anual promedio	**138,47 mm**

Tabla 11. Precipitación máxima anual de la estación BUENAVISTA (23125100)

Para simular una lluvia, se tomaron como referencia los datos del año 2011, el cual es el año con el promedio de mayor precipitación máxima anual (Pmax), con un total de

232,89 mm de lluvia. Se identificó abril como el mes más representativo, ya que cuenta con 30 días y una precipitación de 504,4 mm, siendo esta una situación común en nuestra zona de estudio. A partir de esta información, se obtuvieron datos clave que serán utilizados en la simulación de los modelos

Nombre Estación	**BUENAVISTA [23125100]**
Mes	**Precipitación**
ene	49,9 mm
feb	204 mm
mar	424,8 mm
abr	504,4 mm
may	298,2 mm
jun	75,6 mm
jul	52,6 mm
ago	106,2 mm
sep	97,8 mm
oct	320,7 mm
nov	496,5 mm
dic	164 mm
Total, general	**2794,7 mm**
Pprom mensual	**232,89 mm**

Tabla 12. Precipitación máxima mensual de la estación BUENAVISTA (23125100)

Basado en los datos de la estación meteorológica, se identificó el mes que más lluvioso, en el que se registraron días con lluvias fuertes, moderadas y ligeras. Se realizó un análisis para detectar períodos consecutivos de lluvia fuerte, moderada y ligera, lo que permitió seleccionar una secuencia de 4 días seguidos para la simulación en peceras.

Nombre Estación	BUENAVISTA [23125100]			
Suma de Valor	**Precipitación**			
Fecha	**Fuerte**	**Moderada**	**Ligera**	**Total, general**
1/04/2011 0:00	44,5 mm			44,5 mm
2/04/2011 0:00				0,0 mm
3/04/2011 0:00	24,0 mm			24,0 mm
4/04/2011 0:00	21,0 mm			21,0 mm
5/04/2011 0:00	19,4 mm			19,4 mm

Nombre Estación	BUENAVISTA [23125100]			
Suma de Valor	**Precipitación**			
Fecha	**Fuerte**	**Moderada**	**Ligera**	**Total, general**
6/04/2011 0:00				0,0 mm
7/04/2011 0:00		14,8 mm		14,8 mm
8/04/2011 0:00		13,2 mm		13,2 mm
9/04/2011 0:00		13,7 mm		13,7 mm
10/04/2011 0:00		7,1 mm		7,1 mm
11/04/2011 0:00				0,0 mm
12/04/2011 0:00	21,6 mm			21,6 mm
13/04/2011 0:00		14,3 mm		14,3 mm
14/04/2011 0:00				0,0 mm
15/04/2011 0:00	114,0 mm			114,0 mm
16/04/2011 0:00	19,0 mm			19,0 mm
17/04/2011 0:00				0,0 mm
18/04/2011 0:00	19,0 mm			19,0 mm
19/04/2011 0:00				0,0 mm
20/04/2011 0:00	35,0 mm			35,0 mm
21/04/2011 0:00	23,0 mm			23,0 mm
22/04/2011 0:00	29,5 mm			29,5 mm
23/04/2011 0:00			1,5 mm	1,5 mm
24/04/2011 0:00				0,0 mm
25/04/2011 0:00		14,2 mm		14,2 mm
26/04/2011 0:00				0,0 mm
27/04/2011 0:00	17,7 mm			17,7 mm
28/04/2011 0:00		3,9 mm		3,9 mm
29/04/2011 0:00	34,0 mm			34,0 mm
30/04/2011 0:00				0,0 mm
Total, general	421,7 mm	81,2 mm	1,5 mm	504,4 mm

Tabla 13. Secuencia de dias para simulación

Los parámetros para el cálculo de la intensidad (a, b, c, d), según la región geográfica, se muestra en la **Tabla 2.**

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Tabla 14. Valores de los coeficientes a, b, c y d para el cálculo de las curvas

Teniendo las variables necesarias se procede a calcular la intensidad para cada periodo de retorno con su respectiva duración, que está dada por la ecuación. Los datos calculados se pueden observar en la **Tabla 3.**

$$i = \frac{a * T_r^b * M^d}{(\frac{t}{60})^c}$$

Donde:

i = intensidad de precipitación (mm/h)

Tr = periodo de retorno (años)

M = precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual (mm)

t = duración de la lluvia (min)

a, b, c, d = parámetros de ajuste de la regresión según región geográfica, (ver tabla 2.12 del manual de drenaje para carreteras)

Tr (años)	2	5	10	20		
t (min)	i (mm/h)				Volumen	Intensidad
5	328,8	387,7	439,3	497,6	3,84 L	0,77 L/min
10	208,1	245,4	278,0	314,9	4,86 L	0,49 L/min
15	159,2	187,8	212,7	241,0	5,57 L	0,37 L/min
20	131,7	155,3	175,9	199,3	6,15 L	0,31 L/min
25	113,7	134,0	151,8	172,0	6,63 L	0,27 L/min
30	100,8	118,8	134,6	152,5	7,05 L	0,24 L/min
35	91,0	107,3	121,6	137,8	7,43 L	0,21 L/min
40	83,3	98,3	111,3	126,1	7,78 L	0,19 L/min
45	77,1	90,9	103,0	116,7	8,10 L	0,18 L/min

Tabla 15. Datos de intensidad para la elaboración de las curvas IDF

A continuación, se presentan las curvas IDF

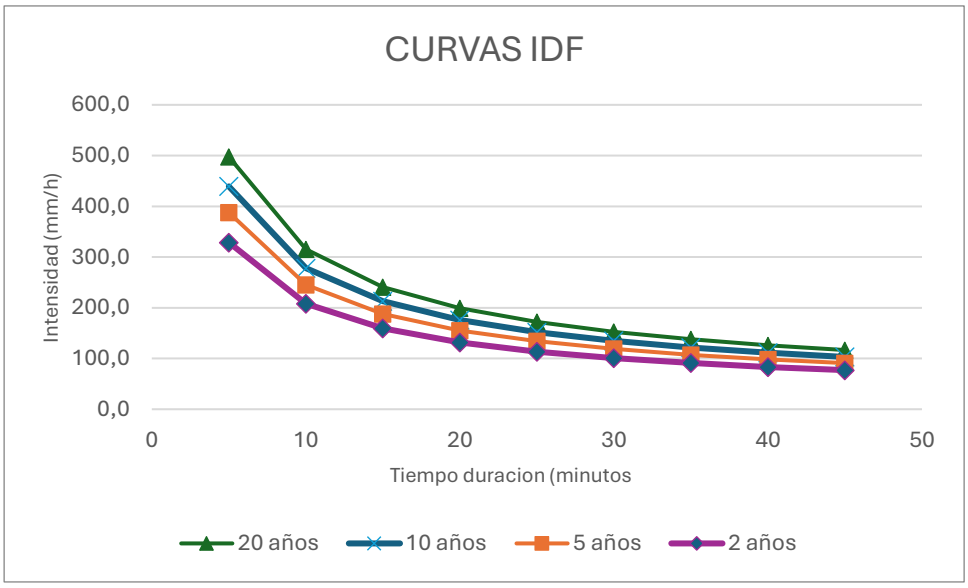


Figura 5. Curva IDF

Para el proyecto se estableció un periodo de retorno de 2 años con un tiempo de duración de precipitación de 15 minutos, por lo tanto, la intensidad corresponde a 159,2 mm/h, teniendo en cuenta estos datos hallamos el rendimiento hídrico.

Área para trabajar

$$0{,}40 * 0{,}35 = 0{,}14m^2$$

Litros

$$2538.33\frac{mm}{h} * \frac{1h}{60min} = 2.653333\frac{mm}{min}$$

$$2.653333\frac{mm}{min} * 15\,\text{min} = 39.8\,mm$$

$$39.8mm = 39.8\,\frac{l}{m^2}$$

$$39.8\,\frac{l}{m^2} * 0.14m^2 = 5.572\,litros$$

Talud a escala

Para determinar las dimensiones del talud a escala se establecieron de acuerdo con las dimensiones de la pecera, con el fin de que el talud se acomodara dentro de esta.

Dimensiones talud	
Alto	25 cm
Ancho	30 cm
Largo	30 cm
Pendiente	40 °

Tabla 16. Dimensiones talud a escala

Diseño cajón recolector

El diseño del cajón recolector para infiltración y escorrentía se ajustó a las dimensiones externas de la pecera, de modo que encajara perfectamente. Al dividir el espacio interno, se crearon dos compartimentos: uno para la infiltración y otro para la escorrentía (ver figura 7). La altura del cajón recolector se determinó con base en el volumen máximo que debía captar el compartimento de escorrentía. Este volumen se calculó utilizando el área correspondiente al perímetro interno y está condicionado por la intensidad de diseño (i = 159.2 mm/h), la duración de la lluvia (t = 15 min) y el coeficiente de escorrentía (C = 0.6). Con estos parámetros, se estimó el volumen de agua que el cajón debía recolectar para la escorrentía, y a partir de ahí, se calculó la altura de la lámina de agua mediante la ecuación correspondiente.

Figura 6. Cajón de escorrentía

Tipo de superficie	C
Cubiertas	0,90
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0,90
Vías adoquinadas	0,85
Zonas comerciales o industriales	0,90
Residencial, con casas contiguas, predominio de zonas duras	0,75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas duras entre estos	0,75
Residencial unifamiliar, con casas contiguas y predominio de jardines	0,60
Residencial, con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separados	0,45
Residencial, con predominio de zonas verdes y parques-cementerios	0,30
Laderas sin vegetación	0,60
Laderas con vegetación	0,30
Parques recreacionales	0,30

Figura 7. Coeficientes de impermeabilidad

$$H\ esc = \frac{i * t * At * C}{10 * Ae} = \frac{P * At * C}{10 * Ae}$$

Donde:

H esc = altura de la lámina de agua en el cajón simulador de lluvia (cm)

i = intensidad de diseño (mm/min)

t = tiempo de duración de la lluvia (min)

P = precipitación en el tiempo de duración (mm)

At = área de la vista superior del talud a escala “largo x ancho” (cm2)

C = coeficiente de escorrentía definido en la **Tabla 7** para “talud sin vegetación” (adimensional)

Ae = área de la vista superior del cajón de escorrentía “largo x ancho” (cm2)

Variable	Dato
Intensidad	159,2 mm/h
	2,7 mm/min
Tiempo duración	15 min
Precipitación	5,7 mm
Área superior talud a escala	900 cm2
Coeficiente de escorrentía	0,6
Área superior cajón de escorrentía	300 cm2
Altura lámina de agua (H esc)	7 cm
Altura cajón de escorrentía	8,0 cm
Capacidad cajón de escorrentía	2400 cm3

Tabla 17. Calculo altura cajón de escorrentía

La altura del cajón de escorrentía se ajustó incrementando el valor obtenido de la ecuación, añadiendo un factor de seguridad para evitar el desbordamiento. De esta manera, se definió una altura final de 8 cm, lo que proporciona una capacidad de 2400 cm^3.

En cuanto al diseño del cajón de infiltración, se consideró el grosor de la lámina que el agua debía atravesar, ya que un mayor grosor dificulta el paso de las gotas. Por ello, se seleccionó un grosor de 4 mm. Para facilitar el flujo de agua, la lámina fue perforada estratégicamente. Posteriormente, se establecieron las dimensiones del perímetro externo del cajón simulador.

La altura del cajón simulador se fijó en 8 cm, la misma que la del cajón recolector, ya que esta medida resultó ser adecuada para el volumen de agua que se pretende aplicar.

Variable	Dato
Intensidad	159,2 mm/h
	2,7 mm/min
Tiempo duración	15 min
Precipitación	5,7 mm
Área superior talud a escala	900 cm2
Coeficiente de escorrentía	0,6
Área superior cajón de infiltración	1200 cm2
Altura lámina de agua (H esc)	2 cm
Altura cajón de infiltración	3,0 cm
Capacidad cajón de infiltración	3600 cm3

Tabla 18. Calculo altura cajón de infiltración

Medición de datos

Para la medición de los datos, se seleccionó el mayor número de días consecutivos con precipitaciones en la zona de estudio. Este enfoque busca simular eventos de lluvia típicos, que son más frecuentes en la región. Utilizando esta información y la intensidad de precipitación registrada, se generó un ciclo de simulación que reproduce de manera más precisa las condiciones reales de la zona. De este modo, se garantiza que los resultados obtenidos reflejen mejor las características hidrológicas habituales del área de estudio.

Infiltración y escorrentía

Para realizar el análisis de medición de escorrentía e infiltración obtenidos del talud a escala con y sin la alternativa, se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$E\% = \frac{Ve}{Va} * 100$$

Dónde:

%E = porcentaje de escorrentía (%)

Ve = volumen de escorrentía por cada talud a escala (ml)

Va = volumen aplicado al talud a escala (ml)

$$I\% = \frac{Vi}{Va} * 100$$

Dónde:

%I = porcentaje de infiltración (%)

Vi = volumen de infiltración por cada talud a escala (ml)

Va = volumen aplicado al talud a escala (ml)

$$R\% = \frac{\%Esv - \%Ecv}{\%Esv}$$

Dónde:

%R = porcentaje de reducción de escorrentía entre el talud a escala con vetiver y el talud a escala sin vetiver (%)

%Esv = porcentaje de escorrentía del talud a escala sin vetiver (%)

%Ecv = Porcentaje de escorrentía del talud a escala con vetiver (%)

A continuación, se presentan los resultados recolectados de volúmenes de escorrentía e infiltración y de porcentajes de escorrentía e infiltración para cada talud a escala.

Dia	Precipitación	Volumen aplicado	Vol. Escorrentía		Vol. Infiltración		% Escorrentía		% Infiltración		Reducción escorrentía superficial
			Talud con vetiver	Talud sin vetiver	Talud con vetiver	Talud sin vetiver	Talud con vetiver	Talud sin vetiver	Talud con vetiver	Talud sin vetiver	
1	5,7 mm	5,57 L	300 mL	480 mL	3530 mL	3200 mL	5,38%	8,61%	63,34%	57,42%	38%
2	5,7 mm	5,57 L	370 mL	540 mL	4440 mL	4890 mL	6,64%	9,69%	79,67%	87,75%	31%
3	5,7 mm	5,57 L	480 mL	600 mL	4920 mL	4960 mL	8,61%	10,77%	88,29%	89,00%	20%
4	5,7 mm	5,57 L	360 mL	570 mL	5010 mL	4980 mL	6,46%	10,23%	89,90%	89,36%	37%

Tabla 19. Resultados recolectados de volúmenes de escorrentía e infiltración y de porcentajes de escorrentía e infiltración para cada talud a escala.

En el talud donde se implementó el pasto vetiver, se esperaba una reducción en la infiltración debido a la influencia de la planta. No obstante, se observaron periodos de prueba en los que la infiltración fue mayor en la alternativa con vetiver y otros en los que fue mayor sin esta alternativa. Esta variabilidad podría explicarse por la naturaleza del vetiver, que en sus primeras etapas de desarrollo tiende a absorber agua, permitiendo que el exceso de humedad siga su curso.

Además, el suelo en el cual se realizó el estudio es predominantemente arenoso, pero con un alto contenido orgánico, lo cual favorece la retención de agua. Por otro lado, se

evidenció que el vetiver tuvo un impacto significativo en la reducción de la escorrentía superficial, disminuyéndola hasta en un 38%. Estos resultados sugieren que el pasto vetiver puede ser efectivo en el control de la erosión hídrica, aunque sus efectos en la infiltración pueden depender de las condiciones específicas del suelo y la etapa de desarrollo de la planta.

Calculo perdida del suelo

El procedimiento para medir la pérdida de suelo debido a la escorrentía consistió en recolectar el agua con sedimentos utilizando jeringas. El volumen extraído se vertía en un recipiente y se calentaba en un horno a 110°C durante un día, con el fin de evaporar completamente el agua y dejar solo el suelo erosionado.

Posteriormente, se retiraba cuidadosamente el suelo adherido al recipiente y se pesaba en una balanza de precisión. Para calcular la pérdida de suelo, se empleó una ecuación específica que permite cuantificar el material erosionado.

$$Ps = \frac{Wss}{Pi * At}$$

Dónde

Ps = pérdida de suelo ((g/mm)/m2)

Wss = peso del suelo erosionado (g)

Pi = precipitación individual del ciclo (mm)

At = área superior del talud a escala (m2)

Se presentan los resultados obtenidos mediante la ecuación de pérdida de suelo aplicada a cada uno de los taludes a escala. Además, se muestran los datos recolectados sobre

la cantidad de suelo erosionado, así como el porcentaje de reducción en la pérdida de suelo, calculado con la fórmula correspondiente.

$$\%R.P.S. = \frac{Pssv - Pscv}{Pssv}$$

Dónde:

%R.P.S = reducción de la pérdida de suelo entre ambos taludes a escala (%)

Pssv = pérdida de suelo en talud a escala sin vetiver ((g/mm)/ m2)

Pscv = pérdida de suelo en talud a escala con vetiver ((g/mm)/m2)

	Peso suelo erosionado		Perdida de suelo (g/mm) /m2		Reducción de perdida de suelo (%)
Precipitación	Talud con vetiver	Talud sin vetiver	Talud con vetiver	Talud sin vetiver	
5,7 mm	6,85 g	13,72 g	13,35	26,74	50%
5,7 mm	3,34 g	7,35 g	6,51	14,33	55%
5,7 mm	4,53 g	5,87 g	8,83	11,44	23%
5,7 mm	3,98 g	5,07 g	7,76	9,88	21%

Tabla 20. Resultados perdida de suelo en los taludes a escala

De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidencia que la planta de vetiver cumplió su función de reducir la erosión hídrica en el talud, en comparación con el talud sin la presencia de esta planta. La diferencia es notable especialmente en los primeros días, donde el talud sin vetiver presentó una mayor erosión. Esta situación puede explicarse por el estado inicial del suelo, que se encontraba muy seco al comienzo de las precipitaciones. Las partículas sueltas, al ser un suelo mayormente arenoso, fueron arrastradas más fácilmente por la acción del agua y la intensidad de la lluvia, lo que generó una pérdida significativa de suelo en el talud sin la cobertura del vetiver. Por el contrario, el talud protegido por el vetiver mostró una mayor estabilidad del suelo debido a la retención y consolidación que proporcionan las raíces de esta planta.

Para realizar un análisis gráfico de los resultados y poder observar mejor las diferencias entre el talud a escala con vetiver y el talud a escala sin vetiver se crearon gráficas a partir de los datos anteriormente mostrados en la **Tabla 18** y en la **Tabla 19**.

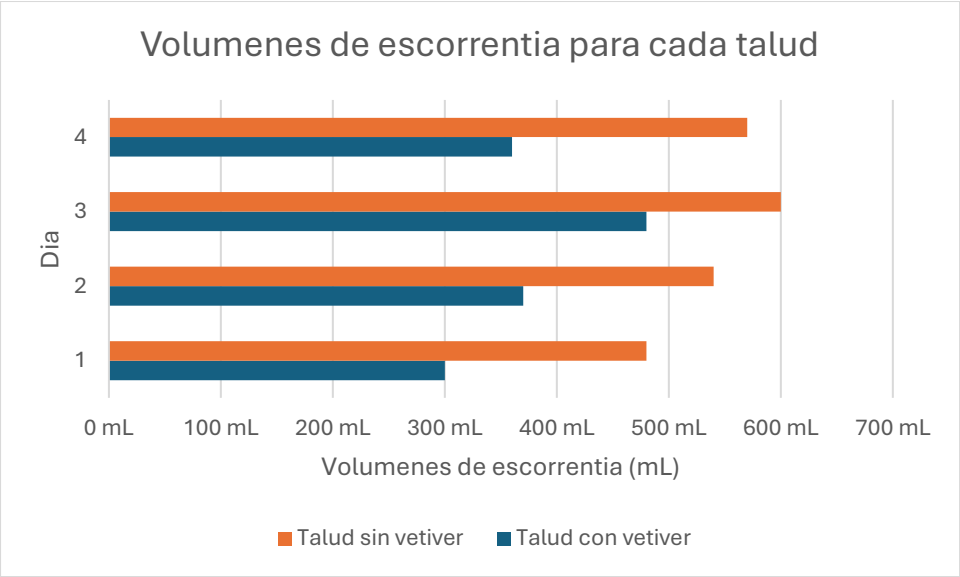


Figura 8. Volúmenes de escorrentía para cada talud

El análisis de la gráfica muestra que, en todos los casos, los volúmenes de escorrentía en el talud a escala con vetiver son menores en comparación con el talud a escala sin vetiver. Este comportamiento respalda la hipótesis planteada, según la cual la presencia de la planta de vetiver ayuda a reducir significativamente la escorrentía superficial.

La hipótesis se fundamenta en las características de la planta de vetiver, cuyas raíces profundas y densas mejoran la estabilidad del suelo. Estas propiedades contribuyen a disminuir la pérdida de agua por escorrentía, favoreciendo la retención y absorción de agua en el suelo.

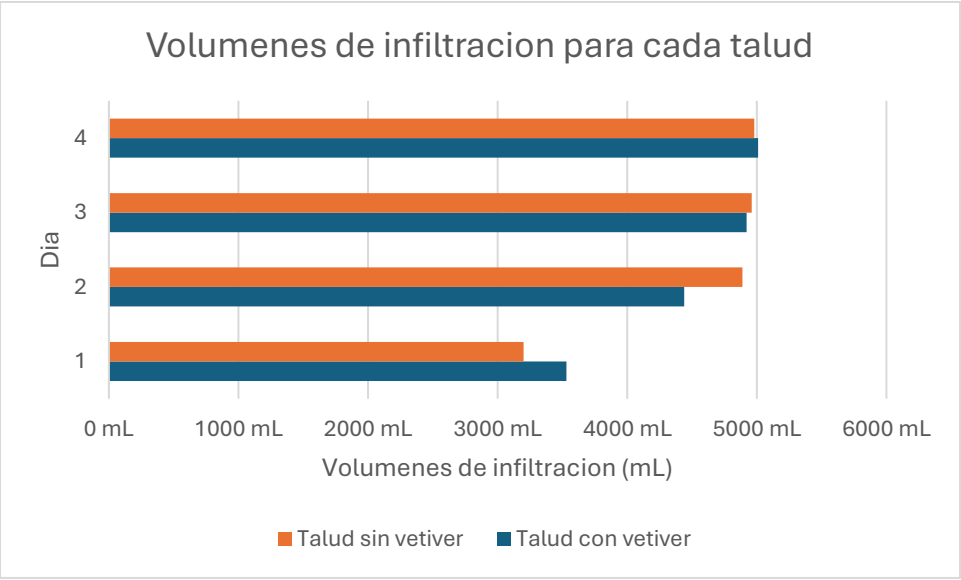


Figura 9. Volúmenes de infiltración para cada talud

Como se muestra en la gráfica, los taludes presentan altos niveles de infiltración, lo cual está asociado a la composición predominantemente arenosa del suelo. Las arenas son bien conocidas por su capacidad para permitir la filtración de agua. Además, se observa que, a medida que el suelo se va saturando, aumenta la cantidad de agua que puede infiltrar, fenómeno que es más evidente en el talud sin cobertura de vetiver. Por otro lado, el talud con vetiver mostró un régimen más estable de infiltración, donde la vegetación ayudó a infiltrar y retener el agua, reduciendo así el riesgo de erosión. Esto sugiere que el vetiver desempeña un papel importante en la estabilización del suelo y en la moderación de la escorrentía.

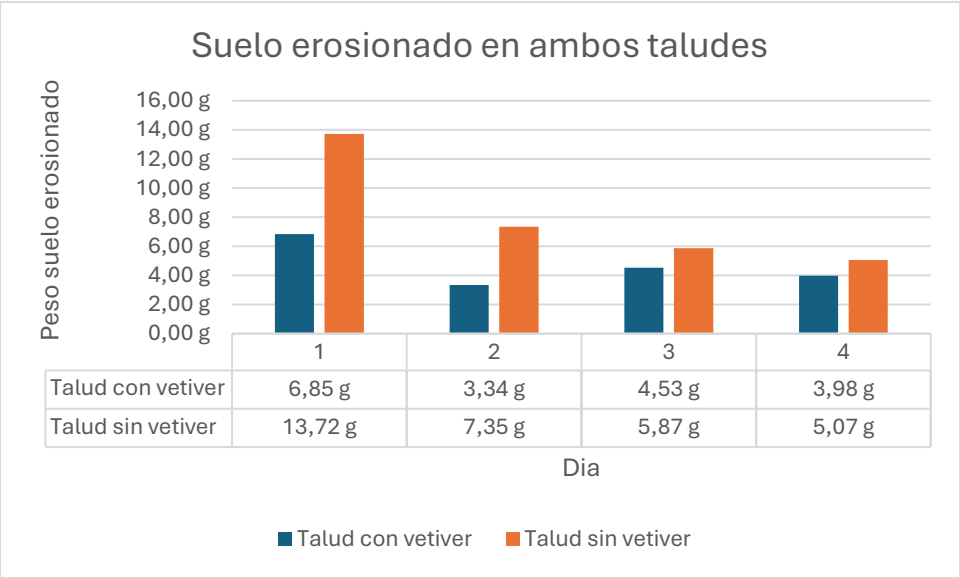


Figura 10. Suelo erosionado en ambos taludes a escala

Como se observa en la gráfica, la cantidad de suelo erosionado es significativamente mayor en el talud sin vetiver, siendo esta diferencia más notoria durante los primeros días de la prueba. Esto indica que la protección ofrecida por el vetiver es más efectiva desde las primeras etapas de exposición a la erosión hídrica.

De la misma manera, los resultados muestran diferencias significativas en los comportamientos erosivos entre el modelo con vetiver y el modelo sin cobertura vegetal. En el modelo sin vetiver, la erosión disminuyó progresivamente con el paso de los días debido a la saturación del suelo, lo que redujo la movilización de partículas. En contraste, el modelo con vetiver mostró una tasa de erosión relativamente constante, aunque siempre más baja que la del modelo sin vegetación.

Además, al comparar las mediciones de los volúmenes de escorrentía, se observó que el agua en el talud sin vetiver era notablemente más turbia, lo cual sugiere una mayor presencia de partículas suspendidas en el flujo de agua. Al secarse estas muestras, se constató

que en el talud sin vetiver se obtenía un mayor volumen de suelo erosionado, confirmando la mayor susceptibilidad a la erosión de los taludes desprovistos de esta vegetación.

Figura 11. Taludes erosionados con y sin alternativa

Seguimiento de humedad

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones de humedad del suelo en los dos taludes analizados: uno con vetiver y otro sin vetiver. Cabe aclarar que las humedades fueron medidas con un dispositivo digital propiedad de la universidad de la Salle.

	Humedad			
	Talud con vetiver		Talud sin vetiver	
Dia	Antes	Después	Antes	Después
1	25,0%	51,5%	6,7%	55,2%
2	48,5%	50,5%	47,3%	49,9%
3	47,7%	51,1%	43,9%	47,6%
4	50,1%	55,4%	40,2%	52,3%

Tabla 21. Humedades antes y después de la simulación en cada talud

	Humedad	
Dia	Talud con vetiver	Talud sin vetiver
5	53,3%	46,8%
6	49,2%	41,5%
7	44,7%	36,6%
8	39,1%	30,2%

Tabla 22. Humedades siguientes dias a la simulación

Los resultados de las mediciones de humedad del suelo demuestran que el vetiver es fundamental para mantener la humedad en el suelo durante períodos prolongados. En comparación con el talud sin vetiver, donde la humedad se evapora rápidamente, el talud con vetiver muestra una capacidad notable para retener el agua. Este fenómeno se atribuye a la densa red de raíces del vetiver. Al reducir la evaporación superficial y fomentar la retención hídrica, el vetiver contribuye a mantener niveles óptimos de humedad en el suelo, lo que beneficia la salud del ecosistema circundante. Estos hallazgos son especialmente relevantes en áreas propensas a la erosión, ya que una mayor humedad del suelo no solo favorece el crecimiento de la vegetación, sino que también ayuda a estabilizar el terreno, disminuyendo así el riesgo de erosión.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que el vetiver cumple su objetivo principal al reducir la erosión hídrica de manera efectiva. Antes de realizar la simulación, la planta se sometió a un periodo de preparación de aproximadamente dos meses, en los cuales recibió los cuidados recomendados para asegurar su desarrollo óptimo y eficacia en el control de la erosión.

El análisis de los resultados muestra diferencias significativas en la pérdida de suelo y el volumen de escorrentía entre el talud con vetiver y el talud sin esta alternativa. La incorporación del vetiver favorece la infiltración, dado que en las primeras etapas de

crecimiento la planta absorbe agua y permite que el exceso se infiltre en el suelo, reduciendo así la erosión. Para el talud con vetiver, se registró una infiltración de hasta un 90%, lo que también llevó a una reducción de la escorrentía en un 38% en comparación con el talud sin vegetación. Asimismo, la pérdida de suelo disminuyó en un 55%, lo que confirma la eficacia del vetiver como un método ambientalmente sostenible para el control de la erosión.

Se puede indicar que los resultados obtenidos en esta investigación son consistentes con los hallazgos de estudios previos sobre el uso del vetiver para el control de la erosión y la estabilización de taludes. En este estudio, el vetiver demostró una reducción del 55% en la pérdida de suelo, una disminución del 38% en la escorrentía y una capacidad de infiltración de hasta un 90%. Estos valores evidencian una mayor eficacia en comparación con lo reportado por Sánchez, quienes encontraron una disminución del 20% en la erosión y un aumento del 25% en la retención de humedad en suelos tratados con vetiver micorrizado. Las diferencias pueden atribuirse a las condiciones específicas y el tratamiento empleado en cada investigación. Por otro lado, en el estudio de Chaparro-Sarmiento, aunque no se abordó directamente el impacto del vetiver en la erosión, se destacó el uso de especies como el eucalipto en la estabilización de taludes, especialmente en suelos arcillosos y arenosos. No obstante, los resultados de esta tesis confirman que el vetiver es igualmente efectivo para la estabilización de taludes y ofrece una solución más sostenible a largo plazo

En condiciones favorables, se estima que el vetiver puede proporcionar estos beneficios de manera constante durante un periodo superior a 10 años, demostrando su capacidad para proteger el suelo a largo plazo y contribuir al equilibrio ambiental.

Recomendaciones

Ampliación del periodo de simulación: Se recomienda extender el periodo de simulación para evaluar el comportamiento a largo plazo del vetiver en diversas condiciones climáticas. Esto permitiría observar su efectividad en escenarios de lluvias más intensas y prolongadas.

Evaluación en diferentes tipos de suelos: Sería beneficioso realizar estudios adicionales en suelos con diferentes composiciones (arcillosos, limosos, etc.), ya que los resultados obtenidos en suelos arenosos podrían no ser aplicables a todos los tipos de terreno.

Investigación sobre técnicas de cultivo y mantenimiento: Para maximizar la efectividad del vetiver en la prevención de la erosión, se recomienda investigar las mejores prácticas de cultivo, manejo y mantenimiento del pasto, como el espaciamiento, la altura de corte y la frecuencia de riego. Estas prácticas pueden influir directamente en su desarrollo y, por ende, en su capacidad para mitigar la erosión.

Bibliografía

Durango, A. L. V. (s/f). Potencial de mallas tejidas en fibras del pseudotallo de la planta de plátano Musa x paradisiaca paradisiaca para la protección del suelo y el control de erosión en taludes. Edu.co. Recuperado el 14 de noviembre de 2024, de https://ciencia.lasalle.edu.co/server/api/core/bitstreams/97ceccd9-1aef-47a6-9010-0322062e34ea/content

Ortiz, A. (s/f). Evaluación de una malla tejida de Retamo Espinoso Ulex europaeus L para protección de la erosión en taludes. Edu.co. Recuperado el 14 de noviembre de 2024,

de https://ciencia.lasalle.edu.co/bitstreams/03024665-12b5-401a-81ac-c8810b9cc51b/download

Agrónomo, J. A. O. (s/f). *MANUAL SOBRE EL USO Y MANEJO DEL PASTO VETIVER (Chrysopogon zizanioides)*. Vetiver.org. Recuperado el 4 de julio de 2024, de https://www.vetiver.org/TVN_manualvetiver_spanish-o.pdf

de Alambre, A. 800 C. (s/f). *CAPÍTULO – OBRAS VARIAS*. Gov.co. Recuperado el 8 de julio de 2024, de http://aplicaciones.risaralda.gov.co/Modulos/Contratacion/Archivos/1977/Cap%C3%8Dtulo8_2.pdf

de Santayana' Eloy Gómez Pellón, M. P. (s/f). *ETNOBOTÁNICA: APROVECHAMIENTO TRADICIONAL DE PLANTAS Y PATRIMONIO CULTURAL*. Unirioja.es. Recuperado el 8 de julio de 2024, de https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/306731.pdf

Decreto 2811 de 1974 - Gestor Normativo. (s/f). Gov.co. Recuperado el 8 de julio de 2024, de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551

DEGRADACION DEL SUELO - IDEAM. (s/f). Gov.co. Recuperado el 8 de julio de 2024, de http://www.siac.gov.co/degradacion-del-suelo

del latín "erode" que significa desgaste o destrucción., L. P. E. P. (s/f). *ANEXO 5. METODOLOGIA PERDIDA DE SUELOS*. Gov.co. Recuperado el 4 de julio de 2024, de https://cortolima.gov.co/images/POMCA/POMCA_rio_lagunilla/ANEXOS/ANEXO_5._METODOLOGIA_PERDIDA_DE_SUELOS.pdf

El suelo, Q. en C. C., & de las partículas del suelo generándose el proceso de erosión., V. la R. (s/f). *EROSIÓN DE SUELOS*. Edu.co. Recuperado el 4 de julio de 2024, de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/3375/cap8.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Erosion, S., & ANTHROPOGENIC PROCESSES OF SOILL EROSION. (s/f). *EROSIÓN Y MANEJO DELL SUELLO. IMPORTANCIA DELL LLABOREO ANTE*

LLOS PROCESOS EROSIVOS NATURALLES Y ANTRÓPICOS. Core.ac.uk. Recuperado el 8 de julio de 2024, de https://core.ac.uk/download/pdf/36082896.pdf

Fernández, R. A. C. (s/f). *Características, Origen y Tipos de Suelo*. Unioviedo.es. Recuperado el 8 de julio de 2024, de https://www.unioviedo.es/chely/CHELY/docencia/Lecciones/Suelos.%20Lec%206.pdf

Ley 461 de 1998 -. (1998, agosto 4). Gov.co. https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-461-de-1998/

Resolucion 170 de 2009 Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (s/f). Gov.co. Recuperado el 8 de julio de 2024, de https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=35369

Sanz, A. R. V., Martí, S. S., & Orrego., A. D. (s/f). *Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo*. Upv.es. Recuperado el 8 de julio de 2024, de https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76781/taludes.pdf

(S/f). Org.co. Recuperado el 8 de julio de 2024, de https://fcds.org.co/wp-content/uploads/2021/01/vetiver-system-technical-manual-spanish.pdf