

ANALISIS DE LA EROSIÓN EN TALUDES Y LADERAS, MEDIANTE
LA IMPLEMENTACIÓN DE BIOSIEMBRAS A PARTIR DE COMPOST

ÁLVARO ANDRÉS GÓMEZ OTÁLORA
ANA MILENA HERRERA CASTELBLANCO

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
TUNJA
2015

ANALISIS DE LA EROSIÓN EN TALUDES Y LADERAS, MEDIANTE
LA IMPLEMENTACIÓN DE BIOSIEMBRAS A PARTIR DE COMPOST

ÁLVARO ANDRÉS GÓMEZ OTÁLORA
ANA MILENA HERRERA CASTELBLANCO

Proyecto de grado en la modalidad de “Investigación” presentado como
requisito parcial para optar el título de ingeniero civil

Director
Pedro Mauricio Acosta Castellanos
Ingeniero Civil
M. Cs. Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
TUNJA
2015

Nota de aceptación

Director del proyecto.

M. Cs. Pedro Mauricio Acosta Castellanos

Jurado 1

Jurado 2

Tunja, Boyacá Febrero 2015

DEDICATORIA

Sin lugar a duda, esta tesis es dedicada a nuestras familias y padres, los cuales con su apoyo, amor y sacrificio lograron junto con nosotros llevar a cabo esta nueva meta y sueño.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, por brindarnos los conocimientos para desempeñarnos muy pronto como profesionales.

Al ingeniero Pedro Mauricio Acosta, por su apoyo durante el proceso investigativo.

A los laboratoristas por brindarnos la ayuda necesaria en cada una de las prácticas que hicieron parte de esta investigación.

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación procesos erosivos.....	39
Tabla 2: Retenedores de arrastre de material	49
Tabla 3: Caracterización de los RSU en el municipio de Nuevo Colón	58
Tabla 4: Simulación 1	59
Tabla 5: Resumen simulación 1	60
Tabla 6: Simulación 2	60
Tabla 7: Resumen simulación 2	61
Tabla 8: Seguimiento de los modelos físicos	65
Tabla 9: Humedad inicial en el talud simulado a 20°	71
Tabla 10: Humedad inicial en el talud simulado a 30°	72
Tabla 11: Humedad inicial en el talud simulado a 45°	73
Tabla 12: Valores de pH durante el proceso de seguimiento de los modelos.....	73
Tabla 13: Valores de temperatura promedio durante el proceso de seguimiento	74
Tabla 14: Desplazamiento de suelo durante el seguimiento de los modelos físicos.....	74
Tabla 15: Cuantificación del arrastre de material, talud a 20°	75
Tabla 16: Cuantificación del arrastre de material, talud a 30°	75
Tabla 17: Cuantificación del arrastre de material, talud a 45°	75
Tabla 18: Resultados infiltración (M1 talud a 20°)	76
Tabla 19: Resultados infiltración (M2 talud a 20°)	77
Tabla 20: Resultados de infiltración (M3 talud a 20°)	77
Tabla 21: Resultados de infiltración (M4 talud a 20°)	78
Tabla 22: Resultados infiltración (M1 talud a 30°)	78
Tabla 23: Resultados infiltración (M2 talud a 30°)	79
Tabla 24: Resultados infiltración (M3 talud a 30°)	79
Tabla 25: Resultados infiltración (M4 talud a 30°)	80

Tabla 26: Resultados infiltración (M1 talud a 45°)	80
Tabla 27: Resultados infiltración (M2 talud a 45°)	81
Tabla 28: Resultados infiltración (M3 talud a 45°)	81
Tabla 29: Resultados infiltración (M4 talud a 45°)	82
Tabla 30: Balance hídrico para el modelo con inclinación de 20°	83
Tabla 31: Balance hídrico para el modelo con inclinación de 30°	83
Tabla 32: Balance hídrico para el modelo con inclinación de 45°	84
Tabla 33: Infiltración para el modelo físico a 20°	87
Tabla 34: Infiltración para el modelo físico a 30°	88
Tabla 35: Infiltración para el modelo físico a 45°	89
Tabla 36: Resumen arrastre de material después de la simulación de precipitación.	92
Tabla 37: Análisis comparativo de los modelos simulados.....	95

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Colocación de pastos en los taludes de las vías	23
Ilustración 2: Nomenclatura de taludes y laderas	33
Ilustración 3: Nomenclatura de un deslizamiento	34
Ilustración 4: Soporte de madera.....	47
Ilustración 5: Inclinação de los contenedores	48
Ilustración 6: Secciones de los modelos físicos	49
Ilustración 7: Simulador de precipitación	50
Ilustración 8: Perforación de la manguera de 3/8"	51
Ilustración 9: Banco hidráulico.....	51
Ilustración 10: Talud estudiado.....	53
Ilustración 11: Contenido de elementos mayores y menores, compuesto propiedades de abono sólido por un kilo	57
Ilustración 12: Aplicación del compost.....	63

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1: Valores totales mensuales de precipitación (mm/mes) para la estación de UPTC año 2011	54
Gráfica 2: Curvas IDF para la estación UPTC, de la ciudad de Tunja..	55
Gráfica 3: Regresión para la determinación de presión.....	62
Gráfica 4: Velocidad de infiltración modelo físico a 20°	87
Gráfica 5: Velocidad de infiltración modelo físico a 30°	88
Gráfica 6: Velocidad de infiltración modelo físico a 45°	89

RESUMEN

La erosión de taludes es una problemática que ha crecido principalmente por el cambio climático, prácticas inapropiadas de corte y excavación del suelo y mal manejo de escorrentías. Generalmente no son tenidos en cuenta estos problemas, lo cual acelera el desgaste del suelo, pérdida de la capa vegetal y el posterior deslizamiento del suelo. Las obras viales son las más afectadas en el entorno nacional por este problema.

Es importante realizar procesos preventivos para la mitigación y control de la erosión de taludes con el fin de evitar complicaciones a mayor escala que puedan involucrar aspectos como la estética paisajística, daño en la vida útil de las obras, entre otros.

Este estudio revisó los mecanismos de prevención y manejo de la erosión a partir de la elaboración de compost y las biosiembras, partiendo del análisis de las características del suelo, estudiando aspectos ambientales y geotécnicos, para luego realizar un modelo físico en laboratorio donde se recrearon algunas características geotécnicas de un talud y se analizaron procesos que lo influyen como la saturación y la pluviosidad a partir del análisis de hidrológico del talud que se tomó como guía.

Los modelos físicos cumplieron con inclinaciones de 20°, 30° y 45°, en donde cada uno contenía cuatro alternativas de tratamiento: M1 (Compost), M2 (Compost + Biosiembras), M3 (Biosiembras) y el M4 (Suelo desprotegido). Los análisis realizados para cada inclinación fueron: infiltración, escorrentía, arrastre de material, humedad,

desplazamiento del talud, acción de la inclinación y efecto de las biosiembras y el compost.

Durante el estudio se hizo necesaria la elaboración de un mecanismo que simulara las condiciones de precipitación, para lo cual se representó la precipitación media mensual encontrada en la estación UPTC, representativa para la zona de estudio.

ABSTRACT

Slope erosion is a problem that has grown mainly by climate change, inappropriate practices cutting and digging soil and mismanagement of runoff, causing soil instability; in the construction of these embankments are not considered failure mechanisms and quantification of the imbalance of bearing capacity, accelerating soil depletion, loss of topsoil and landslips, where road works are the most affected due to sediment hosted on the roads.

It's important to perform preventive processes for mitigation and erosion control slope in order to avoid complications that may involve larger scale security of the population, is to study mechanisms of prevention and management of erosion from developing compost , from the analysis of soil characteristics of the eroded slope , studying environmental and geotechnical aspects and then make a physical model laboratory where some geotechnical characteristics of the slope are recreated and hydrological processes are analyzed before and after implementation of the compost , showing evolutionary processes of this compound in the control of erosion control through hydraulic parameters.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico surgido en los últimos años en el país, ha traído consigo el surgimiento de grandes obras de construcción dentro de las cuales se destaca la infraestructura vial. En el manejo de los taludes se ha profundizado en el estudio de estructuras y mecanismos de estabilización, dejando a un lado el creciente problema erosivo que a largo plazo puede llegar a causar grandes inconvenientes.

Durante la ejecución de proyectos de construcción los taludes y laderas se ven alteradas en sus condiciones de pendiente, cobertura vegetal, drenaje entre otros aspectos. Por lo anterior, en el diseño de estos taludes debe abarcar el análisis de las condiciones superficiales del suelo debido a que el problema erosivo se presenta en esta zona. Estas condiciones superficiales contemplan parámetros como la vegetación (capa protectora ante la acción climática), manejo de escorrentía (interviene en el desplazamiento del talud, formación de tubulaciones y arrastre de sedimentos) y características geotécnicas (según las propiedades del suelo).

En el desarrollo de esta investigación se pretenden establecer alternativas para el manejo de la erosión a partir de la implementación de compost y las biosiembras, donde se analizan propiedades idóneas en cuanto a la composición del compost; teniendo en cuenta la presencia de nutrientes que faciliten el buen desarrollo de la biosiembra. Se estudian características de un talud erosionado ubicado en la vereda Puente de Boyacá del municipio de Ventaquemada (Boyacá) a 11 Km de la ciudad Tunja, reconociendo las condiciones

geotécnicas superficiales del terreno y aspectos ambientales de la zona.

La realización de modelos físicos en laboratorio con base a las características encontradas en el talud ubicado en la zona de estudio, permiten el análisis de procesos hidrológicos como infiltración y escorrentía, y los efectos que estos producen, como el arrastre de material, desplazamiento del suelo y formación de tubulaciones.

De acuerdo a la información hidrológica encontrada, se elabora una simulación de precipitación capaz de recrear la intensidad de lluvia más influyente según las curvas IDF, con el fin de observar y analizar los parámetros geotécnicos del suelo frente a las alternativas de tratamiento propuestas.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

Aquellos terrenos inclinados, bien sean naturales o artificiales, que se conocen como taludes y laderas, se localizan en vías y en cualquier tipo de construcción en donde sea necesaria algún tipo de remoción de tierras. Es común ver que se presenten diversos problemas debido a dos razones principalmente, por un lado, la erosión ocasionada por el cambio climático (que genera una variación continua en la capa superficial del suelo) y por otro, las malas prácticas de corte y excavación de suelos; entre los inconvenientes encontramos los siguientes: mal manejo de escorrentías, obstrucción en el flujo de la vía, entre otras.

Los procesos de erosión se intensifican en los taludes, al no tener en cuenta las condiciones ambientales a las que se ve expuesta, tales como lluvia, viento, entre otras. Acelerando el desgaste del suelo, que deviene en reptaciones, pérdida de la capa vegetal, problemas paisajísticos, obstrucción de las vías que generan caos de movilidad e incluso inseguridad para los habitantes de las zonas donde se encuentran este tipo de construcciones.

En este caso, las obras viales son las más afectadas, disminuyendo la vida útil del pavimento y obstrucción en el flujo continuo de la vía, por causa de los sedimentos alojados en las carreteras después de un deslizamiento; las zonas erosionadas afectan considerablemente la estética del paisaje y en algunos casos el deterioro continuo de un

ecosistema, provocando el desplazamiento de especies animales y la desaparición de especies vegetales.

En la actualidad, se han formulado diferentes alternativas de corrección a los inconvenientes de erosión presentes en zonas donde se desarrollan obras civiles; obras que pueden tener sitios desprotegidos al lado de las edificaciones y taludes que delimitan las vías altamente deterioradas. Estos tratamientos, buscan en su mayoría solucionar a corto plazo el problema erosivo del suelo, ya que la capa vegetal no es tratada directamente con algún tipo de material y por lo tanto, son paliativos, mas no definitivos o perdurables en el tiempo.

Así mismo, debido a que esto ya es un problema identificado, se tiene que en el control de erosión existen diversos tipos de elementos, tratamientos y procedimientos para mejorar esta problemática, tales como mallas geotextiles y siembras. No obstante, estos son implementados en un porcentaje pequeño, ya que la erosión no genera problemas en el momento de la construcción, sino en periodos posteriores que no interfieren en la ejecución de los proyectos y por ello la magnitud de su utilización es poco significativa.

A pesar de que no existe una reglamentación actual vigente, a cerca del manejo erosivo en los taludes y los terrenos, se han buscado alternativas para erradicar parte de esta problemática. La utilización de compostaje como medida de prevención, mitigación y control, no es una práctica innovadora sino que se ha implementado en diversas partes del mundo como Louisiana, Granada (España) entre otros; en donde se han logrado resultados satisfactorios, demostrados en una serie de parámetros analizados antes y después de la implementación del compostaje.

En este estudio, se pretende analizar los resultados obtenidos en cada modelo físico en donde se aplica el tratamiento de compostaje, cada uno de estos en condiciones diferentes; con el fin de reconocer el proceso evolutivo y los ambientes adecuados en que se crea la capa vegetal en un suelo erosionado.

Así, se enfatiza en la importancia de ahondar esfuerzos en el conocimiento previo de las condiciones del suelo del terraplén, pues es mediante ello y el análisis de aspectos como humedad, temperatura, ph, materia orgánica, conductividad eléctrica, granulometría, clasificación del suelo, entre otros aspectos; que se logran identificar unas características al compostaje, que sirven para ser implementadas en planes para mitigar el problema de erosión en el suelo estudiado.

Para efectos de la presente investigación, es importante tener en cuenta, que se hará énfasis en el tratamiento, prevención y control, de las derivaciones negativas anteriormente mencionadas, la erosión genera en el desempeño de las obras civiles (viales o edificaciones), debido a que como consecuencia de las malas prácticas de adecuación del terreno en los cortes de los taludes; los procedimientos constructivos de las obras pueden verse seriamente afectadas en el tiempo.

De ahí la importancia que en las obras de ingeniería se generen reales obras de control geotécnico, prestando especial atención a los taludes a través aplicación correcta de tratamientos que mejoran considerablemente, el diseño, planteamiento y ejecución de la obra; para de esa forma lograr un exitoso control de la erosión del terreno.

1.2. Preguntas de investigación

¿Es posible reconocer la mejor alternativa de prevención, mitigación y manejo de la erosión, comparando un tratamiento en donde se emplea compost y biosiembras?

¿Se pueden simular las condiciones reales de precipitación encontradas en la zona de estudio en un modelo de laboratorio?

¿Se puede cuantificar la acción de la precipitación como parámetro generador del problema erosivo de los taludes, es decir escorrentía e infiltración?

¿La comparación del estado inicial del talud sin ningún tipo de tratamiento respecto a la utilización de las biosiembras y el compost es posible mediante la toma de datos en modelos físicos?

1.3. Justificación

La condición en la que se encuentra el suelo, ha generado en gran medida los problemas más representativos en las construcciones civiles; esto se ve reflejado en las carreteras, avenidas, viviendas, edificios, estadios y demás proyectos en donde se perciben afectaciones como deslizamientos e inestabilidad por efectos erosivos. Disminuir esto, resulta fundamental, pues no sólo se trata de un problema de obra civil, este tipo de situaciones inminentemente perjudica el patrimonio del país y de los ciudadanos.

La implementación de tratamientos ante el manejo erosivo de los taludes y laderas, actualmente no son utilizados con frecuencia, ya que en un principio, la erosión no genera un inconveniente relevante que afecte las construcciones y que ocasionen los problemas anteriormente nombrados; sino que la erosión es una de las primeras señales para el reconocimiento de la inestabilidad. Debido a que la erosión es un problema desencadenante de complicaciones a mayor escala como deslizamientos en terrenos de grandes y pequeñas pendientes, se busca remediar mediante algún tipo de tratamiento el daño erosivo como medida alternativa a complicaciones de gran magnitud que pueden llegar a involucrar la seguridad de la población.

Desde el punto de vista ambiental, la erosión genera un inconveniente representativo por la pérdida de las diferentes especies que hacen parte de la flora que caracteriza el territorio colombiano y consecuentemente, a estética paisajística se ve impactada de manera negativa.¹En países

¹ SUÁREZ Díaz, Jaime. Control de erosión en zonas tropicales. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.2001. p. 349.

desarrollados existen normas muy estrictas de control de erosión que deben cumplir los constructores para la protección del medio ambiente. En países latinoamericanos se está empezando a trabajar en el control de erosión en construcciones y los ingenieros somos los responsables de su diseño e implementación

Así mismo, la escorrentía como proceso natural generado por la lluvia conlleva a la aparición de diversos problemas que afectan las estructuras y la estética paisajística.

La sociedad se va a ver beneficiada debido a que los taludes aledaños a viviendas u otros proyectos, van a tener una condición de estabilidad, que va a ser percibida por la comunidad brindándoles seguridad.

Las características paisajísticas de la zona al controlarse el problema de erosión propenden un entorno agradable y cómodo, que crea un ambiente de bienestar para la comunidad, puesto que las personas tienen el derecho de gozar de un ambiente sano.

La implementación de residuos sólidos como alternativa de solución ante un problema erosivo, el comportamiento de escorrentía, descripción morfológica del suelo, condiciones de pH, aspectos climatológicos como temperatura, intensidad de lluvia, direccionamiento del viento; son condiciones a analizar en la búsqueda de la solución y por ende aspectos importantes en el campo del conocimiento.

Con la aplicación del tratamiento se mejoran por un lado, las condiciones geotécnicas del suelo, el manejo de la escorrentía tiene un mejor funcionamiento, la condición paisajística de la zona posee un mejor aspecto, la estabilidad de la zona se incrementa de manera

considerable. Por otro lado, entre otros beneficiarios están las empresas constructoras, el Estado y los habitantes cercanos a los proyectos.

Con esta investigación, no solo se pretende analizar la erosión, sino que además se busca dar una mejor disposición y aprovechamiento a los RSU (Residuos Sólidos Urbanos) generados en el municipio de Nuevo Colón; ya que estos son la materia prima para la elaboración del compost que además proporciona un bajo precio tanto en el proceso de elaboración como en su aplicación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar diferentes parámetros geotécnicos del suelo frente a la utilización del compost y las biosiembras como alternativas de tratamiento ante la prevención, mitigación y manejo de la erosión presente en los taludes y laderas de poca pendiente.

1.4.2. Objetivos específicos

- Seleccionar el talud erosionado reconociendo las características más importantes que inducen al problema erosivo con el fin de aplicar el tratamiento propuesto.
- Elaborar modelos físicos comparativos donde se simulen las condiciones de pendiente en el talud estudiado, con el fin de aplicar el tratamiento propuesto en la presente investigación.
- Comparar los avances o retrocesos que se puedan llegar a generar en cada uno de los modelos físicos mediante ensayos de laboratorio analizados respecto al estado inicial del talud.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estado del Arte

La implementación de las biosiembras como medida de control de la erosión en los taludes y laderas, no ha sido una novedad en nuestro país, ya que a menudo se recubre el suelo, con recortes de siembras que habitualmente son pastos. Este método además se realiza para mejorar las condiciones paisajísticas del lugar y evitar el deslizamiento de los materiales con el fin de no interferir en las obras civiles.

Ilustración 1: Colocación de pastos en los taludes de las vías



Fuente: Tomado de Constructora Zerpa

Además de la utilización de la biosiembras como estrategia ante el desprendimiento de la capa de cobertura del suelo, se utilizan otras técnicas como lo son geotextiles, geomantas entre otros tratamientos bioingenieriles que buscan mejorar las condiciones dinámicas del suelo;

pero estas se utilizan con menor frecuencia que los recortes de siembras anteriormente nombrados.²

Aunque la implementación de geotextiles en suelos desprotegidos disminuye el volumen de escorrentía, existen algunos geotextiles que no proporcionan buenos resultados como cuando es utilizado el geotextil de fibra de coco y yute. Jesús ÁlvarezMozosen su investigación en el año 2014 compara geotextiles y siembras, dando una mejor efectividad las siembras, pues la eficiencia de los geotextiles en la reducción de la erosión del suelo está relacionada directamente con la pendiente del talud, puesto que a mayor pendiente menor control de erosión. La utilización de una geomalla es más adecuada que los geotextiles de fibra de coco y productos de yute para la protección de laderas escarpadas.³

Además de los geotextiles, el compost es usado como tratamiento ante el problema erosivo de los taludes y laderas, aunque este no se ha implementado en el país, se ha demostrado su alta efectividad en países como China, Argentina, Estados Unidos (estado de Louisisna), España, entre otros, en donde por medio de diferentes investigaciones se reconoce la evolución del comportamiento dinámico del suelo al ser tratado con el compost.

Yoau-Jun Liu realiza una investigación en el Embalse de las Tres Gargantas Area China (The Three Gorges Reservoir Area, China) más

² <http://www.mlingenieria.com/geomanta.php>

³ Mozos,Jesus Álvarez(2007). Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Sciencedirect10.

exactamente en las provincias de Hubei y Chongqing en 2014, donde el objetivo corresponde a realizar un modelo físico en el cual se simulan condiciones ambientales a las cuales se encuentra sometida una ladera. Dentro de estas se encuentran lluvia, escorrentía y acción del viento, cuando se implementa el compost. Además de esto se realizan ensayos de laboratorio que permitan comparar las circunstancias que va llevando el suelo a lo largo del tratamiento.⁴

El estudio realizado en España por J. De Oña en 2008 se encamina al conocimiento de los efectos causados con el uso de compost y lodos para el control de erosión en los taludes. Igualmente que la investigación anterior, se establece una ponderación en los avances o retrocesos que se puedan presentar respecto a las condiciones iniciales del suelo, en donde además se tienen en cuentas los factores que ocasionan la erosión.⁵

Por otra parte en Louisiana, Noura Bakr en 2012, evalúa el comportamiento del suelo cuando se encuentre sometido a algún tipo de tratamiento, en este caso al emplear el compost como mediada de

⁴Yoaou - Jun Liu, T. W.-F.-X.-B. (2014). Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Science of the Total Environment*, 93-102.

⁵J. De Oña, F. O. (2008). Assessing the effects of using compost-sludge mixtures to reduce erosion in road embankments. *Journal of Hazardous Materials*, 1257 - 1265.

solución en el problema de erosión en unas zonas seleccionadas de este estado.⁶

En España, Cerdà en 2007 desarrolla un análisis de la erosión por la presencia de agua en taludes de carreteras en el este de ese país. La investigación tiene como objetivo analizar las pérdidas de suelo y agua en cinco terraplenes de carretera a través de experimentos de lluvia simulada. La simulación de precipitación en los terraplenes evidencia las altas pérdidas de suelo en carreteras después de la construcción, debido a la baja cobertura vegetal, por ello la importancia de implementar mecanismos para recuperar la vegetación natural reduciendo significativamente las tasas de erosión en los taludes, al no realizar un mecanismo de control a tiempo se presentan sedimentos y pérdida de semillas y nutrientes, en este caso la recuperación del talud es más difícil.

Los experimentos de eventos de lluvia, demuestran las altas tasas de erosión durante periodos húmedos, evidenciando una mayor pérdida de suelo durante el invierno ya que se induce una mayor escorrentía aunque la cobertura vegetal es ligeramente mayor en esta época del año sin representar un factor determinante en el control de la erosión; es importante implementar programas de restauración para evitar el aumento de la producción de sedimentos que provoca el deterioro de ríos y embalses, posibles accidentes de tránsito y daños al paisaje.

⁶Noura Bakr, D. C. (2012). Evaluation of compost/mulch as highway embankment erosion control. *Journal of Hydrology*, 257 - 267.

La pérdida de suelo es otro de los parámetros que se analizaron en el experimento donde se evidenció que a los 45° todos los geotextiles produjeron tasas de pérdida de suelo inferiores a los del control a pesar de las altas tasas de escorrentía que se presentaron en los taludes. Demostrando que los geotextiles ofrecen una mejor función en el control de la pérdida de suelo, principalmente los geotextiles densos como la manta de fibra de coco.⁷

Youssef Ouni en 2014 encamina su investigación a la optimización del crecimiento de plantas en condiciones salinas aplicando cantidades suficientes de nutrientes a partir de fuentes inorgánicas y orgánicas como el compostaje, el cual genera un contenido más alto de nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas y mejorando la producción de biomasa, sin embargo el exceso de compost en el suelo donde crecen las plantas puede causar interferencia en el desarrollo hormonal de las especies al generar un cambio abrupto de las condiciones naturales iniciales; los RSU compostados pueden contener metales pesados los cuales acondicionan el suelo sin efectos fitotóxicos, aunque inhiben el crecimiento de las raíces.

La actividad microbiana es un parámetro regulador en el crecimiento de las plantas, el compostaje de RSU aumenta la diversidad de microorganismos y lombrices de tierra creando una interacción entre ellos que contribuye al mejoramiento del desarrollo de las plantas y del rendimiento.

⁷Cerdà, A. (2007). Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. Science of The Total Environment, 151–155.

El desarrollo hormonal de las plantas debe ser tratado cuidadosamente, controlando posibles patógenos que puedan afectar las especies, dosificando apropiadamente el agua y agregando cantidades moderadas de compost para lograr una interacción adecuada entre microorganismo y los demás componentes del suelo de tal forma que la planta no generen respuestas negativas de defensa debido a modificaciones inadecuadas de su entorno.⁸

Eder De La Peña, en 2012 hace una investigación donde realiza una mezcla de lodos y estéril en diferentes proporciones para reducir significativamente la tasa de erosión hídrica causada por la escorrentía superficial. La erosión del suelo causada por la minería a cielo abierto es la problemática que se pretende atender en esta investigación, pues genera daños en todos los componentes del ecosistema: suelo, vegetación, fauna y recursos hídricos; las geoformas del terreno y las condiciones microclimáticas, adicionalmente factores climáticos como el viento y la precipitación contribuyen aceleradamente al proceso de la erosión.

En los proceso de extracción de material en las canteras, principalmente roca caliza, se generan factores limitantes en el establecimiento de la vegetación tanto de forma natural como a través de restauraciones, pues se acentúan malas condiciones edáficas donde las raíces de las plantas son incapaces de penetrar, pero el factor que más limita la colonización vegetal en taludes de canteras es la fatiga o estrés hídrico.

⁸Youssef Ouni, A. A.-A. (2014). Influence of municipal solid waste (MSW) compost on hormonal status and biomass partitioning in two forage species growing under saline soil conditions. *Ecological Engineering*, 142–150.

Como alternativa para manejar la erosión en los taludes mencionados se plantea el uso de enmiendas o la aplicación de lodos de aguas residuales ya que pueden mitigar las condiciones limitantes, acelerar la colonización vegetal y disminuir la tasa de erosión en suelos degradados por minería; es implementada esta alternativa pues los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales son ricos en materia orgánica, nitrógeno, fósforo, lo cual los hace potencialmente útiles como enmienda orgánica, mejorando las propiedades físicas del suelo como la estructura, la densidad aparente, porosidad y la retención de agua, que puede reflejarse en la restauración de la capa vegetal.

Para el desarrollo de esta investigación se tomaron muestra de suelo de la cantera de la empresa Holcim S.A. en el municipio de Nobsa (Boyacá) y un muestreo del lodo de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Chinavita (Boyacá), donde se caracterizó mezcal de lodo y esteril, teniendo en cuenta parámetros de química agronómica como pH, parámetros físicos, presencia de metales pesados y parámetros microbiológicos.

En laboratorio se adecuo el material seleccionado para la investigación mediante núcleos del mismo con lodo de agua residual, los cuales fueron sometidos a un evento de lluvia producida por un simulador en laboratorio el cual fue calibrado para verificar la intensidad de lluvia, uniformidad en la aplicación de la misma y el tamaño de las gotas.

Después de ser aplicada la simulación de precipitación se analizaron varias características del material como la densidad aparente y la porosidad, estabilidad estructura, estado de agregación, textura y materia orgánica.

De la investigación se pudo concluir que los lodos de aguas residuales del municipio de Chinavita son materiales aptos para su uso en ciertas restricciones en suelos degradados destinados como reserva forestal, desde el punto de vista químico y microbiológico, además hubo un aporte de nutrientes al suelo principalmente fosforo y calcio; hubo un aumento en el pH y en el contenido de materia orgánica condiciones favorables para el manejo de la erosión a causa de la actividad minera.⁹

2.2. Marco teórico

Para el desarrollo de la presente investigación es fundamental entender la definición de talud y ladera, donde el primer término hace referencia a la inclinación del terreno formada a partir de cortes de excavación, mientras que ladera es el terreno de origen natural que posee pendientes de diferente inclinación, los problemas que presentan la estabilidad de estos terrenos han sido asociados principalmente a las actividades de la ingeniería civil.

Los deslizamientos son los movimientos de taludes o laderas formados por diferentes clases de materiales: roca, suelo, rellenos artificiales o combinaciones entre ellos a través de una superficie de falla determinada; es importante reconocer los factores que condicionan la estabilidad de éstas superficies y aquellos que actúan como desencadenantes de los movimientos, de este modo es posible evaluar el peligro existente y a su vez las medidas necesarias para evitar o

⁹Eder De la Peña. (2012). Uso de lodos de aguas residuales para la protección de taludes frente a la erosión. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 62.

corregir los posibles movimientos; la erosión es uno de los principales factores que afectan la estabilidad de taludes y laderas ya que ésta es la eliminación o reducción de la cobertura protectora del suelo, destruyendo y deteriorando la estructura del terreno causando la infertilidad en el mismo y a su vez un incremento en las condiciones de pendiente; el agua es el agente natural de mayor incidencia como factor condicionante de erosión y desencadene en la aparición de inestabilidades, don de la lluvia contribuye a aumentar la acción de factores erosivos como la meteorización y la acción de las aguas subterráneas.

2.2.1. Estabilidad de Taludes

2.2.1.1. Factores causantes de deslizamientos

La susceptibilidad de la generación de movimientos en taludes y laderas está condicionada por la estructura geológica, litológica, condiciones hidrológicas y la morfología propia de un área determinada, el cambio en algunos de éstos condicionantes por causas naturales o por acciones humanas, ocasiona un incremento o disminución del esfuerzo de corte desencadenando la inestabilidad de una masa de terreno, algunos de los factores más importantes que intervienen en la estabilidad de taludes son:

2.2.1.2. Condiciones del terreno

Dentro de estos se encuentran los material de comportamiento plástico, material sensible, material colapsado, material meteorizado, material fallado por corte, material fisurado o con discontinuidades, discontinuidades orientadas favorablemente o desfavorablemente,

contraste en la permeabilidad y sus efectos sobre el agua del terreno y contrastes de rigidez.

2.2.1.3. Procesos geomorfológicos

En ellos se relacionan los movimientos tectónicos, erosión subterránea, actividad volcánica, carga por sedimentación en la cresta del talud, avance y retroceso de glaciares, remoción de la vegetación, socavación de la pata del talud por corrientes de agua o por oleaje, erosión en la pata del talud por glaciares.

2.2.1.4. Procesos físicos

Dentro de estos se encuentran lluvias intensas de corta duración, rompimiento de lagos en cráteres, descongelamiento rápido de nieves perpetuas, deshielo, precipitaciones prolongadas, terremotos, erupción volcánica, desembalse por descongelamiento (deshielo), meteorización por expansión (contracción de suelos).

2.2.1.5. Procesos humanos

Relacionados con la excavación en el pie del talud, escarpes de agua de tuberías, carga en la cresta del talud, remoción de la vegetación (deforestación), explotación minera, inadecuada disposición de rellenos, mantenimiento defectuoso del sistema de drenaje, vibración artificial.

2.2.2. Determinación del tipo de inestabilidad

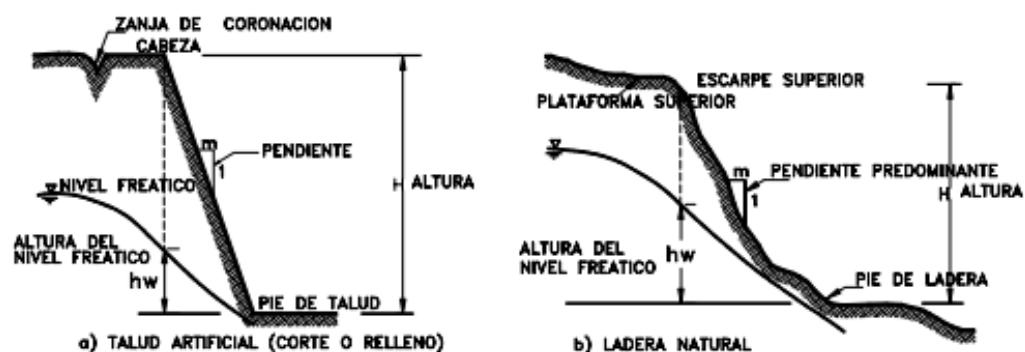
Los movimientos de taludes y laderas tienen una gran relación con el material que los conforma, los terrenos en los que se producen los movimientos pueden dividirse en tres grupos el primero de ellos son los medios rocosos presentando discontinuidades naturales antes de

iniciarse un movimiento, en el segundo grupo están los suelos, los cuales constituyen un agregado de partículas sólidas con diferente grado de consolidación formando una cobertura de los macizos rocosos o haber sufrido algún tipo de transporte, en el tercer grupo están los materiales de relleno, éstos son depósitos acumulados debido a la realización de determinadas obras, generalmente compuestos de materiales heterogéneos; identificando éstos materiales es posible identificar susceptibilidad de cada material.

2.2.2.1. Nomenclatura de un talud o ladera

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. Adicionalmente se puede definir una ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente.

Ilustración 2: Nomenclatura de taludes y laderas



Fuente: Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales (pág. 2)

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

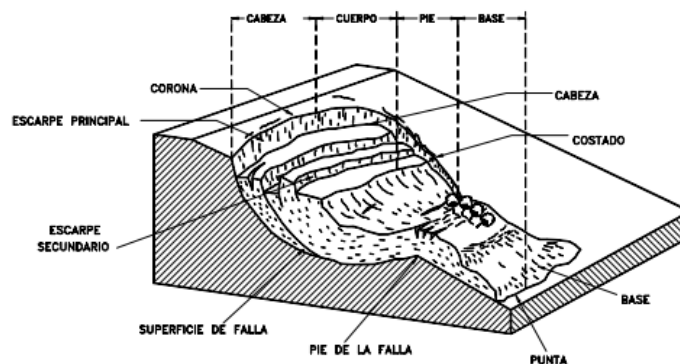
1. **Altura:** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.

2. **Pie:** Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe:** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático:** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
5. **Pendiente:** Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

2.2.2.2. Nomenclatura de los procesos de movimiento

Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos. Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras otros se mueven hacia abajo.

Ilustración 3: Nomenclatura de un deslizamiento



Fuente: Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales (pág. 2)

De la anterior imagen se tiene que:

1. **Escarpe principal:** Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.
2. **Escarpe secundario:** Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
3. **Cabeza:** Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
4. **Cima:** El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

2.2.2.3. Etapas del proceso de falla:

La clasificación de deslizamientos pretende describir e identificar los cuerpos que están en movimiento relativo. Las clasificaciones existentes son esencialmente geomorfológicas y solamente algunas de ellas introducen consideraciones mecánicas o propiamente geológicas. Las caracterizaciones geotécnicas son necesarias y por esta razón, las clasificaciones especialmente topográficas y morfológicas, deben adaptarse a las condiciones verdaderas de los movimientos.

En este orden de ideas se deben considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- a. Etapa de deterioro o antes de la falla donde el suelo es esencialmente intacto.
- b. Etapa de falla caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.

- c. La etapa post-falla que incluye los movimientos de la masa involucrada en un deslizamiento desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.
- d. La etapa de posible reactivación en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.

2.2.2.4. Proceso en la etapa de deterioro:

El deterioro, con el tiempo puede dar lugar a la necesidad de mantenimiento o construcción de obras de estabilización; sin embargo, a éste fenómeno se le da muy poca atención en el momento del diseño y el énfasis se dirige a evitar las fallas profundas, más que a evitar los procesos anteriores a la falla.

Cuando un talud se corta, para la construcción de una vía o de una obra de infraestructura, ocurre una relajación de los esfuerzos de confinamiento y una exposición al medio ambiente, cambiándose la posición de equilibrio por una de deterioro acelerado. El deterioro comprende la alteración física y química de los materiales y su posterior desprendimiento o remoción. Este incluye la alteración mineral, los efectos de relajación y la abrasión. La iniciación y propagación de fracturas es de significancia particular en la destrucción de la superficie que puede conducir a caídos de roca o colapso del talud.

2.2.3. Tipos de movimientos

La inestabilidad de taludes y laderas hace referencias a movimientos que pueden clasificarse de acuerdo a los mecanismos de ocurrencia en distintos materiales y a los intervalos de tiempo en que tienen lugar, el reconocimiento y clasificación del tipo de movimiento es de gran

importancia pues condiciona el análisis en el control y estabilización del terreno.

A continuación se describen los principales tipos de movimiento en taludes y laderas:

2.2.3.1. Caído

En los caídos una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente, a través del aire por caída libre, a saltos o rodando

2.2.3.2. Inclinación o volteo

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material del térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurren en las formaciones rocosas.

Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos. La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes de varios millones de metros cúbicos.

2.2.3.3. Deslizamientos

Son movimientos que se producen al superarse la resistencia al corte del material y ocurren a lo largo de una o varias superficies o a través de una franja relativamente pequeña de material; generalmente las superficies de deslizamiento son visibles, la velocidad con que se

desarrollan estos movimientos es variable, dependiendo de la clase de material involucrado en los mismo, el movimiento puede ser progresivo, produciéndose inicialmente una rotura local que puede no coincidir con la superficie de rotura general causada por una propagación de la primera.

2.2.4. Alternativas de control de erosión en taludes

La erosión es un proceso natural de movimiento de las partículas del suelo de un sitio a otro principalmente por medio de la acción del agua o del viento, la erosión puede clasificarse entre erosión hídrica, eólica y por laboreo; las dos primeras también suceden en condiciones naturales. Sin embargo, el hombre, mediante prácticas, tiende a acelerarla, hasta el punto de que las pérdidas no pueden ser compensadas por las tasas naturales de formación del suelo. Es en estas situaciones en donde se produce un grave problema ambiental. En casos extremos, puede llegar a generar la denominada desertificación, que no es más que la manifestación fenomenológica de la pérdida o degradación del suelo bajo ambientes áridos, semiáridos y seco-subhúmedos. Por el contrario, la erosión por laboreo es un fenómeno genuinamente antrópico, ya que no intervienen directamente las fuerzas naturales (a excepción de la gravedad), sino la intervención humana a través de sus prácticas y tecnologías. La magnitud de este último proceso erosivo tan solo ha comenzado a ser reconocida recientemente.

La erosión hídrica es una de las más importantes en sus diferentes formas ya que es inminente la necesidad de su tratamiento correctivo, pues tras haber comenzado el fenómeno, la tendencia de éste será en la mayoría de los casos, progresiva; este fenómeno es ocasionado por

acción de fuerzas hidráulicas, las cuales actúan sobre las partículas de suelo produciendo su desprendimiento y posterior transporte. La erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza del agua en movimiento. El proceso puede ser analizado iniciando por el despegue de las partículas de suelo, debido al impacto de las gotas de lluvia. Adicionalmente, ocurre el proceso de flujo superficial en el cual las partículas removidas son incorporadas a la corriente y transportadas talud abajo.

Si la velocidad de escorrentía es superior a la velocidad máxima erosionante, se produce erosión superficial. La velocidad de escorrentía depende de la pendiente, la intensidad de la lluvia, la cantidad de agua presente y la rugosidad de la superficie del terreno.¹⁰

2.2.4.1. Clasificación procesos erosivos

Tabla 1: Clasificación procesos erosivos

Impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo	Dispersión de los agregados del suelo en sus partículas elementales. Puede formarse un sello (sellado) que impide una adecuada infiltración del agua generando su pérdida por escorrentía superficial.
Erosión laminar	Pérdida de suelo generada por circulación superficial difusa del agua de escorrentía.

¹⁰Suárez, J. D. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, 1998, Pág. 264.

Erosión en surcos	Suelo arrastrado por el flujo del agua que se canaliza y jerarquiza generando surcos.
Erosión en Cárcavas	Suelo arrastrado por el agua generando cárcavas (estas suelen comenzar en forma de surcos)
Erosión en Badlands	Erosión en cárcavas profundas generalizada, que llega a eliminar toda la capa de suelo dando lugar a un paisaje “abarrancado”
Erosión por sufusión	Desarrollo de una red de drenaje sub-superficial que termina por colapsarse. Suele acompañar a los paisajes de “bandalnds”
Bio-Erosión	Erisión de las capas subsuperficiales del suelo causada por la acción de organismos vivos.
Erosión mecánica	Pérdida de suelo causada por las labores de la labranza.
Nivelación del terreno	Pérdida de suelo debida a la modificación humana del perfil original de una ladera o la construcción de terrazas.
Erosión de los cauces fluviales	Génesis de paisajes fluviales por incisión de las aguas pluviales o por el desplazamiento lateral de los propios cursos (erosión de

	márgenes fluviales)
Erosión costera o litoral	Erosión costera debida al efecto del oleaje y las mareas, por la que el mar gana terreno en detrimento de las superficies emergidas.
Erosión glaciar	Génesis de los paisajes fríos, glaciares y periglaciares a causa de los flujos de hielo. Su avance suele acarrear la pérdida total de los suelos.
Deslizamientos de masa someros	Desplazamiento de suelo y a veces regolito que deja una cicatriz en hondonada y un lóbulo frontal sobresaliente. A menudo, muchos deslizamientos someros evolucionan hacia flujos de clastos (piedras, cantos bloques de rocas). Principalmente, si no actúan otros procesos erosivos se puede hablar más de desplazamiento que de pérdida del recurso.
Erosión eólica o deflación	Pérdida del suelo debido al efecto erosivo del viento.
Erosión eólica: corrosión	Desprendimiento de partículas (abrasión) debido al impacto de partículas previas suspendidas o arrastradas por el viento.

Fuente: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/03/11/15557>

Cuando las manifestaciones del fenómeno erosivo son tímidas en magnitud, o bien cuando su diagnóstico se hace de manera temprana, pueden ser empleadas en su control medidas que no demandan grandes esfuerzos económicos; este es el caso de la implementación de prácticas menores de conservación de suelos que integran sencillas técnicas de intervención del terreno atendiendo adecuadamente los agentes erosivos y los parámetros que imparten resistencia al mismo frente a la erosión. Así, la conservación de suelos si se concentra sobre los efectos producidos por el agua, puede ser desarrollada mediante tres controles: control del suelo, control de la vegetación, y control del agua.¹¹

2.2.4.2. Cubrimiento con vegetación

La vegetación proporciona protección contra la erosión en todos los casos y con todo tipo de vegetación, esta amortigua más eficientemente el golpe de la lluvia; en hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía. En lo referente a control de erosión se ha encontrado que donde hay árboles altos la erosión es menor que en el caso de arbustos. Además, se ha encontrado que las hierbas o maleza protegen generalmente mejor contra la erosión que los pastos.¹²

Se debe proporcionar características deseables en el suelo para el buen desarrollo de las especies a incluir, en tal sentido podrían sugerirse entre otras, medidas como la fertilización del sitio previa inclusión del material vegetal o al momento de la siembra, corrigiendo

¹¹<http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2006/03/11/15557>

¹²Suárez, J. D. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, 1998, Pág. 280

problemas físico-químicos o deficiencias de nutrientes; inclusión de retenedores hídricos en el caso de zonas secas o en períodos poco lluviosos en que se adelanten los programas, de forma que se disminuyan las elevadas mortalidades del material vegetal, derivadas en parte del estrés hídrico, y mayormente sentidas en los períodos de adaptación y establecimiento.

Asimismo, dada la inexistencia de horizontes orgánicos y de suelo como tal, las especies a incluir no sólo deben ser lo suficientemente rústicas para prosperar en tales condiciones, sino, además es recomendable que ellas propicien el mejoramiento de las características del suelo, para lo cual la selección de especies leguminosas puede ser apropiada.

Dentro del grupo de alternativas para mejorar el suelo se destacan aquellas que buscan corregir problemas de acidez usualmente encontrados en taludes de los trópicos y que se conocen genéricamente como enmiendas calizas; su ventaja radica en que además de corregir los bajos valores de pH, disminuyen la toxicidad de metales como Hierro (Fe) y Aluminio (Al); mejoran la disponibilidad de nutrientes para las plantas; e incrementan la eficacia de los fertilizantes posteriormente aplicados. Del grupo de correctores del suelo puede mencionarse el empleo de carbonato potásico y del grupo de fertilizantes los abonos químicos complejos en diferentes presentaciones y compost (hablar de los componentes del compost y las ventajas).

La composición las especies puede ser variada incluyendo a lo largo del talud especies de porte bajo (gramíneas) y de porte medio-bajo (arbustivas); a través de las primeras se puede conseguir una

disminución del efecto que tiene el impacto de las gotas de lluvia, así como una disminución de la velocidad de las aguas de escorrentía, siendo necesario para que este último efecto sea importante, garantizar una cobertura superior al 70% del terreno. Por otra parte, las especies de porte arbustivo en su anclaje en el suelo pueden atravesar en ocasiones potenciales superficies de rotura, dándole a la masa de suelo características de cuerpo unitario, y favoreciendo con ello la estabilidad del talud.

La selección de especies antes que orientarse por listados potenciales para la zona, debe guiarse por la presencia que aquellas hacen en los taludes cercanos así como por recomendaciones de entidades que en el área hayan adelantado ensayos de adaptación y recuperación de sitios con limitaciones edáficas.

De acuerdo a la forma en que se vaya a implantar la vegetación, deben acometerse algunas prácticas que pueden variar de caso a caso; así para el caso herbáceas, las especies de pastos pueden propagarse a partir de semilla por siembra directa, para lo cual se recomiendan surcos transversales a la pendiente del talud; también se pueden introducir al voleo si las condiciones son favorables o por matorros en caso de tenerse pastos rústicos.

2.2.5. Características del Compostaje

Se puede clasificar el compost partiendo de dos puntos de vista:

2.2.5.1. Atendiendo el origen del residuo

Se encuentran diferentes características en las propiedades a partir del tipo de materia prima empleada para llevar a cabo el proceso de

descomposición. Cabe destacar que los residuos de los cuales se puede obtener el compost son:

- Desechos de cocina
- Cartones, papel
- Desperdicios verdes, es decir, pastos.
- Excretas animales
- Material orgánico en general

Algunos residuos como vidrios, plásticos, maderas, materiales ferrosos, pilas, textiles, entre otros. No son utilizables para la realización del compostaje, ya que no proporcionan una descomposición total y efectiva.

2.2.5.2. La etapa de maduración en que se encuentre el compost (Maduración del Compost)

Indicadores de la estabilidad y madurez del compost

- **Estabilidad biológica:** Asociado a una oxidación presente en el suelo, con el fin de evitar problemáticas en las plantas.
- **Humificación :** Mejorar los nutrientes que se encuentran en el suelo
- **Madurez o estabilidad:** Corresponde a la etapa en donde se considera que el material en descomposición ha alcanzado una estabilidad térmica y se encuentra libre de compuestos fitotóxicos. Esto se puede medir con ensayos sobre plantas

2.2.5.3. Importancia de la madurez del compost

Un compost inmaduro tiene un alto contenido de C lábil. Esto tiene tres consecuencias:

- Un aumento de la actividad microbiana que provoca un aumento de la tasa de mineralización de la materia orgánica. No tiene

demasiada transcendencia al menos a medio plazo, ya que se recuperan rápidamente las condiciones iniciales.

- Por otro lado provoca un bloqueo biológico del N asimilable del suelo por las poblaciones de microorganismos, lo que puede generar déficit de N en el suelo. Estas poblaciones de microorganismos, lo que puede generar déficit de N en el suelo. Esta inmovilización es consecuencia de un elevado ratio C/N. Al haber tanto C se incrementa la biomasa microbiana lo que conduce a que aumente la competitividad por el N, no solo entre los microorganismos, sino también con la planta. Esta competencia se extiende a otros macroelementos como el S, P, Ca y Mg.
- Además se produce una disminución del O y del Eh (potencial redox). Esto provoca que disminuya la velocidad de Nitrificación y de pérdida por desnitrificación. Una bajada del pH por la formación de ácido carbónico, da lugar a una mayor disponibilidad de metales pesados. Y un aumento de la temperatura que inhibe la actividad de la planta.

2.2.5.4. Métodos para determinar la madurez

En general los test propuestos para la evaluación del grado de madurez pueden agruparse en 5 tipos: Parámetros sensoriales de madurez, evolución de parámetros de la biomasa microbiana, estudio de la materia orgánica humificada, indicadores químicos de madurez, métodos biológicos (test fitotóxicidad).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Equipos y materiales

3.1.1. Materiales

3.1.1.1. Descripción de los modelos físicos

Los modelos físicos hechos en laboratorio recrean algunas características geotécnicas superficiales del suelo del talud escogido para esta investigación, descritas anteriormente.

Los 3 modelos están constituidos por soportes de madera que presentan 3 tipos de inclinación: 20°, 30° y 45° con el fin de obtener diferentes comportamientos del suelo al ser sometido a una simulación de precipitación media mensual de la zona de estudio.

Ilustración 4: Soporte de madera



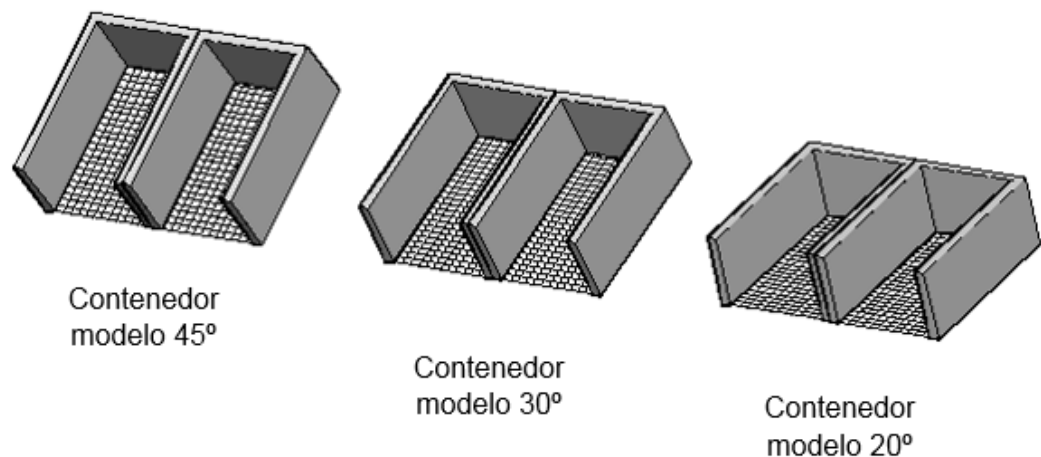
Fuente: Autores.

Los contenedores de suelo son elementos de plástico con una altura de 25cm, ancho: 40cm y longitud: 60 cm. El suelo colocado en estos

contenedores tiene un volumen de 18981 cm^3 (18 cm de alto, 57 cm de largo y 37cm de ancho) en los 3 modelos, donde se genera la compactación del suelo encontrada en el talud analizado y se proporciona una humedad similar a la de la zona de estudio. La densidad del suelo corresponde a $1,028 \text{ gr/cm}^3$.

De la información anterior es posible establecer que el peso total de suelo en cada modelo físico es de 39,024 Kg y a cada sección le corresponde 9,75 Kg.

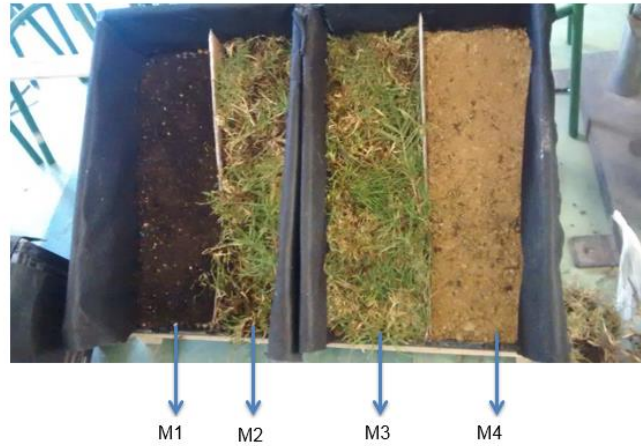
Ilustración 5: Inclinação de los contenedores



Fuente: Autores.

Cada modelo está separado por cuatro secciones, en el primero (M1) se adecua el suelo más una capa de 2cm de compost, en el segundo se encuentra el suelo más una capa de compost de 2cm y una capa de biosiembra (M2), en el tercero está el suelo más una capa de biosiembra (M3) y por último se encuentra el suelo desprotegido (M4).

Ilustración 6: Secciones de los modelos físicos



Fuente: Autores.

Para medir los sedimentos a causa de la escorrentía, se elaboraron unos retenedores con geotextil con separaciones para diferenciar el arrastre de material en cada una de las secciones descritas anteriormente.

Tabla 2: Retenedores de arrastre de material



Fuente: Autores.

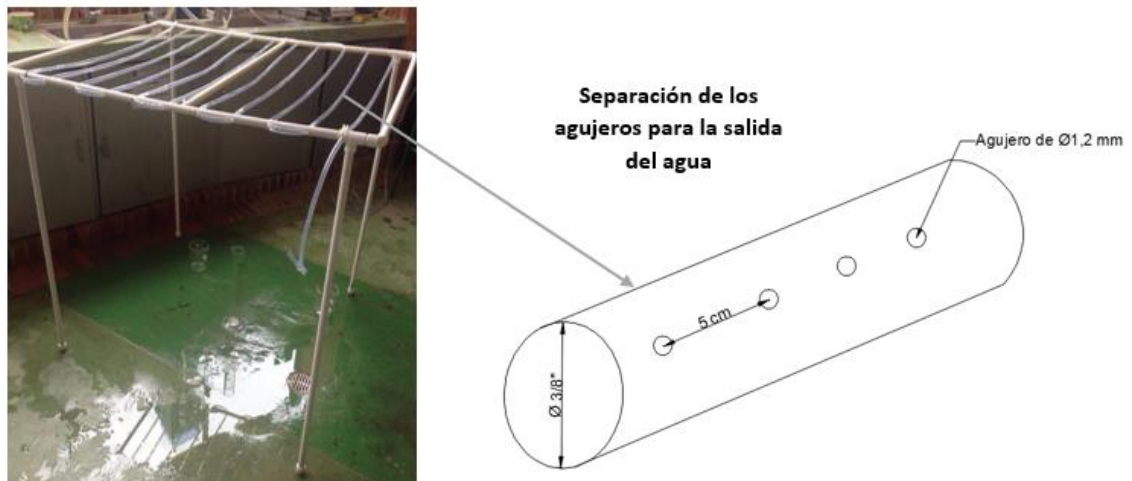
La infiltración generada en cada una de las secciones de los tres modelos físicos es medida por medio de vasos de precipitado ubicados

en la parte posterior de los modelos, los cuales tienen la capacidad suficiente de almacenar el agua que se infiltra en cada sección.

3.1.1.2. Simulador de precipitación

La simulación de precipitación es realizada por medio de un sistema creado en laboratorio a partir de materiales como PVC, manguera con diámetro de 3/8" y manómetro; la estructura del simulador tiene unas dimensiones de 1m de ancho por 1m de largo y una altura de 1,5m; la manguera está dispuesta en la parte superior del simulador con una separación de 10 cm.

Ilustración 7: Simulador de precipitación



Fuente: Autores.

La manguera de 3/8" de diámetro tiene agujeros con un diámetro de 1,2" separados cada 10 cm inicialmente pues durante el proceso de calibración la distancia de separación es reducida a 5cm con el fin de permitir una mejor distribución del agua para la simulación de precipitación; el simulador es ubicado en el centro del área de ensayo sobre los modelos para proporcionar una lluvia uniforme.

Ilustración 8: Perforación de la manguera de 3/8"



Fuente: Autores

3.1.2. Equipos

- Banco hidráulico: suministra el agua necesaria para la simulación de precipitación y permite regular el caudal para mantener la presión adecuada en el sistema.

Ilustración 9: Banco hidráulico



Fuente:

<http://www.edibon.com/products/?area=fluidmechanicsaerodynamics&subarea=fluidmechanicsbasic&lang=es>

- Balanza y horno de secado.

- Para la realización de laboratorios de suelos se emplearon diferentes herramientas y equipos los cuales se describen en los anexos.

3.2. Métodos

Para el desarrollo del presente estudio se tienen en cuenta una serie de procedimientos investigativos, comparativos y prácticos con los cuales se espera sustentar la efectividad de la utilización de la alternativa de control erosivo con biosiembras y compost; los métodos a utilizar son cuantitativos y cualitativos con el fin de realizar una discusión de acuerdo a los parámetros medibles como arrastre de material, infiltración y escorrentía y parámetros no medibles como la afectación de la estética paisajística y la agresión del agua sobre el suelo.

En la investigación se realiza el reconocimiento del terreno antes y después de aplicar el tratamiento, lo cual de manera clara permite realizar el análisis de diferentes parámetros relevantes, en cuanto a la interacción del suelo del talud con el tratamiento de las biosiembras y compost y sin la presencia de estas.

3.3. Labores ejecutadas

3.3.1. Análisis inicial de la zona de estudio

3.3.1.1. Recopilación de información

Para el desarrollo de la investigación se han estudiado algunos proyectos elaborados con características similares a las que se quieren desarrollar. Teniendo en cuenta lo anterior, se toman como referencia principal las investigaciones hechas en el estado de LOUISIANA y la ciudad de TUNJA, mencionadas anteriormente en el estado del arte.

3.3.1.2. Reconocimiento de la zona de estudio

El talud escogido se encuentra en la vereda Puente de Boyacá del municipio de Ventaquemada a 11Km de la ciudad de Tunja en el costado izquierdo de la doble calzada Briceño, Tunja, Sogamoso. La altura estimada en esta zona es de 2825 m.s.n.m. dando por ende la presencia de bajas temperaturas y alta humedad.

El talud en estudio posee un área de aproximadamente 400m², este presenta un alto grado de erosión causado por la ausencia de capa vegetal y por la exposición a fuertes vientos y lluvias continuas. Cabe destacar que este talud no ha sido sometido a ningún tipo de corte o excavación; por lo cual se dice que corresponde a una ladera formada naturalmente.

La inclinación de este talud se encuentra entre 0° y 40°, según la información suministrada por el IGAC. En la siguiente imagen se evidencia físicamente la topografía del talud en estudio.

Ilustración 10: Talud estudiado

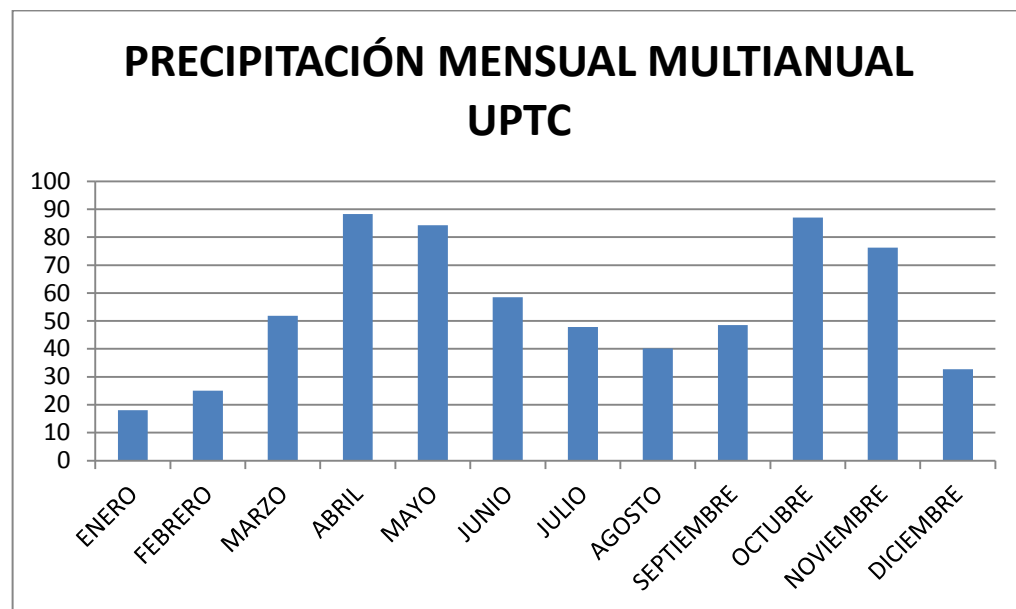


Fuente: <https://maps.google.es/maps?output=classic&dg=brw>

3.3.2. Datos de precipitación

La información de precipitación que describe el comportamiento del talud en estudio es obtenido en la estación UPTC, ya que su ubicación espacial la hace representativa para la zona.

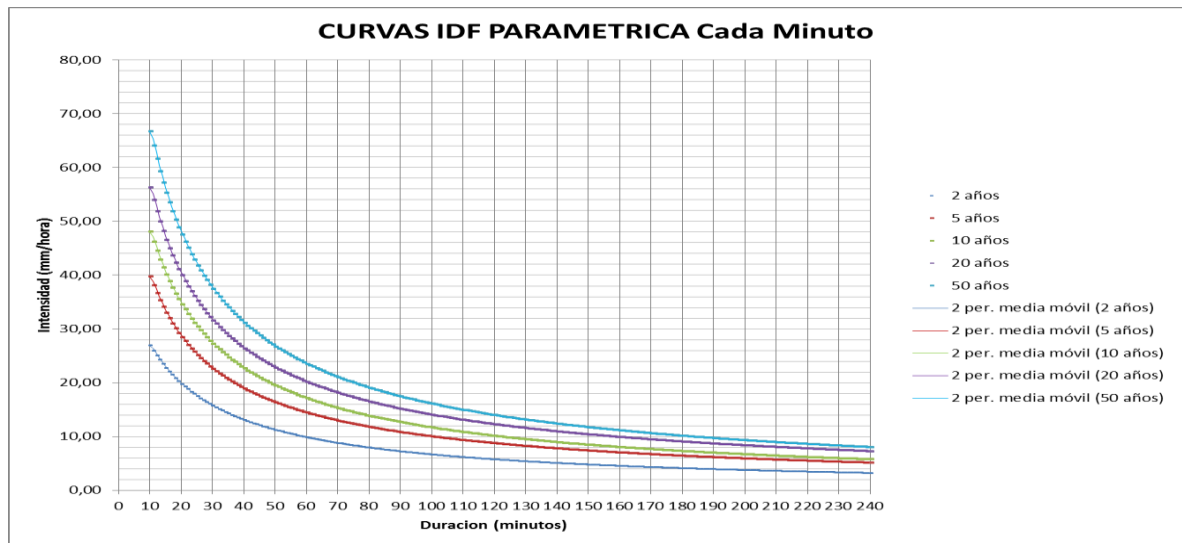
Gráfica 1: Valores totales mensuales de precipitación (mm/mes) para la estación de UPTC año 2011



Fuente: Autores

Teniendo en cuenta la información de precipitación suministrada para diferentes años se encuentra la siguiente información:

Gráfica 2: Curvas IDF para la estación UPTC, de la ciudad de Tunja



Fuente: Autores

El periodo de retorno escogido para la esta investigación es de 5 años. Esto es tenido en cuenta de acuerdo a lo encontrado en el manual de drenajes del INVIAS (Instituto Nacional de Vías), donde se especifica que el periodo de retorno para el diseño de zanjas de coronación es de 10 años cuando se presentan condiciones importantes de inestabilidad. Teniendo en cuenta que el problema de erosión en la zona de estudio no representa un inconveniente en la inestabilidad, se reduce este periodo de retorno a 5 años.

3.3.2.1. Condiciones geotécnicas:

Las características iniciales encontradas en el talud son las siguientes:

- **Clasificación del suelo:** La determinación del tipo de suelo se hizo mediante un ensayo de laboratorio por el método SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), en donde se reconoce que el tipo de material encontrado corresponde a un suelo ML caracterizado por limos orgánicos, arenas muy finas, polvo de roca,

arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad. Posee una estabilidad deficiente, aunque puede utilizarse en terraplenes con control apropiado. Su capacidad de soporte es muy deficiente y susceptible a licuefacción. En cuando al uso en fundaciones se encuentra en un rango de aceptable a bueno.

El análisis detallado de esta clasificación se encuentra en el anexo 1.

- **Humedad:** Para la determinación del contenido de humedad encontrado in situ, se tuvo como referencia dos muestras, en donde para la Muestra A se obtuvo una humedad $W=26,4\%$ y para la Muestra B la humedad de $W= 29,6\%$, de donde se determina un valor promedio de humedad $W_{promedio}= 28,0\%$. Anexo 2.
- **Peso específico:** Este valor se obtiene mediante la densidad húmeda encontrada in situ, para lo cual se tiene dos muestras; la muestra A con un peso específico de $9,123\text{KN/m}^3$ y para la Muestra B con $11046,06\text{KN/m}^3$. Anexo 3.

3.3.3. Reconocimiento de las características del compost

3.3.3.1. Elección del tipo de compost

La clasificación del tipo de compost se hizo teniendo en cuenta la textura, disposición en el mercado, bajo costo, facilidad en el proceso de elaboración y sus ventajas nutricionales. Es por esto, que se determina que la mejor alternativa entre compost granular y liquido es la primera de ellas.

En la siguiente tabla se encuentra la composición nutricional que contiene el compost de tipo granular.

Ilustración 11: Contenido de elementos mayores y menores, compuesto propiedades de abono sólido por un kilo

ELEMENTO Y PROPIEDADES	CANTIDAD
HUMEDAD (%)	25
CARBONO ORGÁNICO (%)	28.9
CAPACIDAD DE INTERCAMBIOCATIÓNICO	50
CAPACIDAD RETENCIÓN DE HUMEDAD (%)	140
C/N	10
PH	7.7
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (DS/M)	16.1
NITRÓGENO (%N ₂)	1.99
FÓSFORO TOTAL (%P ₂ O ₅)	1.78
POTASIO (%K ₂ O)	1.81
CALCIO (%C ₁₀ O)	7.58
MAGNESIO (%MgO)	0.41
AZUFRE (%)	0.47
HIERRO (PPM)	2550
MANGANESO (PPM)	74
COBRE (PPM)	17
ZINC (PPM)	92
BORO (PPM)	20
SODIO (PPM)	4313

Fuente: Alcaldía municipio de Nuevo Colón (Boyacá)

3.3.3.2. Caracterización de los RSU (Residuos Sólidos Urbanos)

La recolección, transporte y disposición de las basuras del municipio de Nuevo Colón está a cargo de la empresa de servicios públicos del municipio, la cual se encuentra registrada como “SERVINUEVOCOLON E.S.P”. Actualmente ésta empresa pone en funcionamiento un plan de separación en la fuente, que consiste en la recolección de los residuos orgánicos los días jueves y los desechos restantes como plásticos, cartones, vidrios etc., el día martes.

En el PGIRS (Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos) del Municipio de Nuevo Colón, hace un reconocimiento cuantitativo y cualitativo de los desechos recolectados en una vivienda de 5 personas

aproximadamente durante una semana. En la siguiente tabla se especifican estos valores promedio obtenidos en la averiguación:

Tabla 3: Caracterización de los RSU en el municipio de Nuevo Colón

Componente	Peso (kg)	Volumen (m3)	Peso volumétrico	% Peso volumétrico
Papel mezclado	0,4	0,013716	29,16	2,3%
Cartón	0,34	0,022647	15,01	1,2%
Embace tetrabrick	0,46	0,00255176	180,27	14,2%
PLÁSTICOS				
Pet (1)	0,6	0,022647	26,49	2,1%
Pet (4)	0,02	0,00191382	10,45	0,8%
Pet (2)	0,8	0,022647	35,32	2,8%
Pet (5)	0,06	0,010526	5,70	0,5%
Pet (6)	0,26	0,022647	11,48	0,9%
Otros	0,1	0,014673	6,82	0,5%
VIDRIOS				
Àmbar	1,16	0,009888	117,31	9,3%
Blanco	0,34	0,003508	96,92	7,7%
Metales no ferrosos	0,24	0,016267	14,75	1,2%
Desechos orgánicos	10,5	0,014673	715,60	56,6%
		Total	1265,30	100%

Fuente: Alcaldía municipio de Nuevo Colón (Boyacá)

3.3.4. Calibración del simulador de lluvia

La calibración del simulador de lluvia consiste en verificar la presión adecuada para garantizar una intensidad de lluvia media mensual de 40 mm/hora según la información de la estación UPTC, debido a que su ubicación espacial la hace representativa para la zona de estudio; se realizan dos simulaciones de lluvia con 3 muestreos en cada una como se presenta a continuación:

- Simulación 1:

Tabla 4: Simulación 1

MUESTREO 1

Nº del vaso	Agua (ml)
1	256,5
2	276,2
3	278,2
4	254,5
Promedio	266,35

Presión	6	Psi
Tiempo	2	min

MUESTREO 3

Nº del vaso	Agua (ml)
1	345,7
2	361,2
3	363,4
4	356,2
Promedio	356,625

Presión	9	Psi	
Tiempo	2	min	

MUESTREO 2

Nº del vaso	Agua (ml)
1	324,6
2	314,8
3	301,6
4	302,4
Promedio	310,85

Presión	6,5	Psi
Tiempo	2	min

Fuente: Autor

Tabla 5: Resumen simulación 1

Simulación	Tiempo (min)	Promedio (ml)	Promedio (L)	Promedio (mm)	Presión (PSI)	mm para 60 minutos
1	2	266,35	0,26635	0,26635	6	7,9905
2	2	310,85	0,31085	0,31085	7,5	9,3255
3	2	356,625	0,356625	0,356625	9	10,69875

Fuente: Autor.

La Tabla 5 muestra los 3 muestreos realizados para determinar la presión adecuada para proporcionar una intensidad de lluvia de 40 mm/hora en intervalos de 2 minutos cada uno, donde se evidencia el promedio de agua acumulada en cuatro diferentes puntos del área de influencia donde cae la lluvia producida por el simulador con una distancia de separación de los orificios de 10 cm.

Se realiza una segunda simulación donde se aumenta la presión en los tres muestreos conservando intervalos de 2 minutos y disminuyendo la separación de los orificios a 5cm para proporcionar una mejor distribución de la lluvia.

- Simulación 2:

Tabla 6: Simulación 2

MUESTREO

1

Nº del vaso	Agua (ml)	
1	543,8	
2	565,7	
3	556,4	
4	512,4	
Promedio	544,575	

Presión	6	Psi
Tiempo	2	min

MUESTREO

2

Nº del vaso	Agua (ml)	
1	628,3	
2	610,45	
3	598,4	
4	604,8	
Promedio	610,4875	

Presión	6,5	Psi
Tiempo	2	min

MUESTREO**3**

Nº del vaso	Agua (ml)	
1	715,4	
2	722,4	
3	726,8	
4	712,4	
Promedio	719,25	

Presión	9	Psi
Tiempo	2	min

Fuente: Autor

Tabla 7: Resumen simulación 2

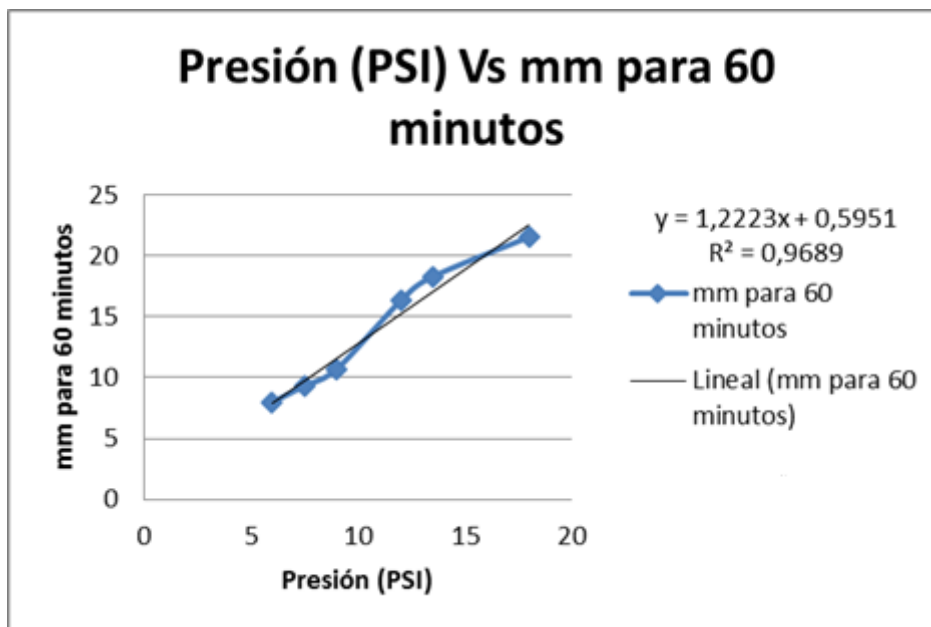
Simulación	Tiempo (min)	Promedio (ml)	Promedio (L)	Promedio (mm)	Presión (PSI)	mm para 60 minutos
1	2	544,575	0,544575	0,544575	12	16,33725
2	2	610,4875	0,6104875	0,6104875	13,5	18,314625
3	2	719,25	0,71925	0,71925	18	21,5775

Fuente: Autor

Después de realizar la segunda simulación, se efectúa la proyección de los datos obtenidos mediante una progresión lineal, donde se obtiene la presión adecuada para proporcionar una intensidad de 40 mm/hora que corresponde a 32.2 PSI. La ecuación lineal es:

$$y = 1,2223x + 0,5951$$

Gráfica 3: Regresión para la determinación de presión



Fuente: Autores

3.3.5. Aplicación del compost

El compost es aplicado en los modelos físicos una vez que se adecue el suelo y se haya compactado en cada una de las secciones, es utilizado un total de 500 g de compost en las sesiones designadas (M1 y M2).

Para cada uno de los modelos físicos, la capa de compost es de aproximadamente 2cm de altura en cada sección distribuido uniformemente sobre toda la superficie del suelo para proporcionar características idóneas para el desarrollo de la biosiembra como nutrientes en todo el terreno. Es necesario mantener la humedad natural del suelo para proporcionar condiciones favorables a la hora de aplicar el compost.

Ilustración 12: Aplicación del compost



Fuente: Autores

3.3.6. Determinación de la biosiembra

La especie vegetal elegida para proporcionar protección al suelo durante la investigación es *Pennisetum Clandestinu* más conocida como Kikuyo, esta es una gramínea perenne muy común y de mejor adaptación a la zona de estudio pues tiene un buen desarrollo en regiones de clima frío con una altura entre los 1500 y 3200 msnm. Esta especie se adapta fácilmente a cualquier tipo de suelo, su desarrollo se extiende superficialmente con raíces gruesas en algunos casos que pueden alcanzar hasta un metro de longitud.

Uriel Pérez y Roberto López en su investigación “Estudio Preliminar De La Erosión Hídrica En Un Inceptisol De Los Andes Venezolanos Bajo Uso Agrícola” para la facultad de ciencias forestales y ambientales de la Universidad de los Andes de Venezuela en el año 2000, estudian el comportamiento del kikuyo para la protección de suelo en condiciones

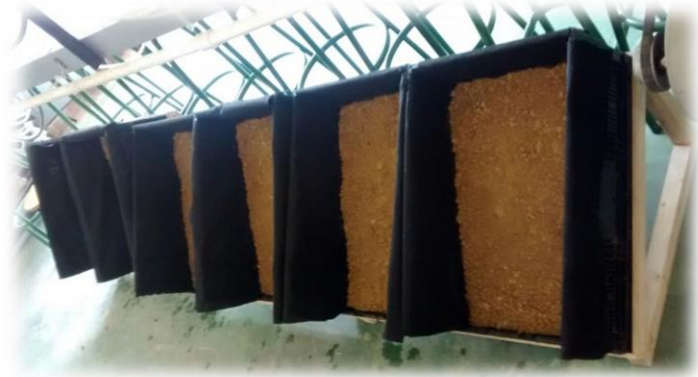
similares a las de la zona de estudio de la presente investigación, observando el buen comportamiento de este tipo de planta aun en tiempos de sequía, igualmente analizan la necesidad de mantener condiciones idóneas para el crecimiento de la vegetación como materia orgánica y nutrientes pues estos componentes se pierden por arrastre en los sedimentos en tiempos de lluvia.¹³

¹³http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/24160/1/articulo44_2_1.pdf

3.3.7. Seguimiento de los modelos

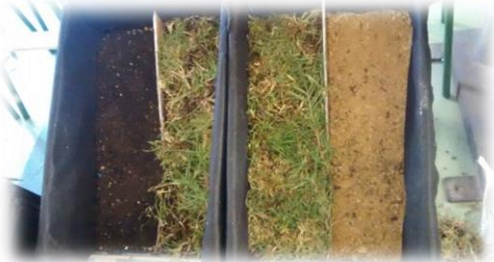
En la siguiente tabla se muestran los avances más importantes tenidos con los diferentes tratamientos. Se omitieron algunas semanas debido a que el avance no era representativo en cuanto a los cambios de las siembras, el compost y el suelo.

Tabla 8: Seguimiento de los modelos físicos

Fecha	Taludes a 20°, 30° y 45°
(12/Sep)	

Fecha	Talud a 45°, 30° y 20°
(26/Sep)	
	- Preparación del material erosionado con la respectiva inclinación, dimensionamiento y peso. - Aplicación de los diferentes tratamientos para cada una de las inclinaciones simuladas, e iniciación del proceso comparativo. - El roseo de dichos taludes se hace homogéneamente es decir, la misma cantidad de agua para cada uno de los tratamientos con su respectiva inclinación.

Fuente: Autor.

Fecha	Talud a 45°	Talud a 30°	Talud a 20°
(3/Oct)			
	M1: Desplazamiento del compost por acción de la pendiente del talud. M2: Crecimiento moderadamente rápido de las siembras. M3: Crecimiento mínimo de la siembra, con espacios secos entre estas. M4: Se evidencia resequedad y pérdida de humedad natural del suelo, con un desplazamiento de	M1: A pesar de la inclinación del talud no se genera desplazamiento del compost. M2: Crecimiento medianamente rápido de las siembras, además de homogeneidad de las mismas. M3: Crecimiento mínimo de la siembra. M4: Se evidencia resequedad y pérdida de humedad natural del suelo en menor proporción que a	M1: No existe pérdida del compost. M2: La siembra se desarrolla homogéneamente sin presencia de espacios secos. M3: El crecimiento de los pastos es más acelerado y homogéneo que los modelos simulados con inclinación de 45° y 30°. M4: Se evidencia resequedad y pérdida de humedad natural del

	0,7cm desde la cabeza del talud.	45°, sin desplazamientos.	suelo.
Fecha	Talud a 45°	Talud a 30°	Talud a 20°
(15/Oct)			
	M1: Desplazamiento del compost debido a la inclinación y a la textura de este tratamiento. M2: Deslizamiento parcial del tratamiento, sin embargo	M1: Caída del compost en mínimas proporciones. M2: Se aprecia un mejor aspecto de las siembras, además que estas tienen una mejor adherencia	M1: Se aprecia una mínima pérdida de compost. M2: En comparación con los demás taludes, éste presenta el mejor resultado en cuanto

	crecimiento de la siembra. M3: Debilitamiento de las siembras M4: Desplazamiento, presencia de pequeñas tabulaciones y desplazamiento del material erosionado.	al suelo. M3: La mayoría de las siembras se encuentran no adheridas al terreno. M4: Desplazamiento y presencia de pequeñas tabulaciones.	adherencia siembra-suelo. M3: Aunque superficialmente se presentan características similares a las encontradas con el tratamiento M2 a 20°; no existe agarre de la siembra y el suelo. M4: Se perciben las características de un suelo con alto grado de erosión.
Fecha	Talud a 45°	Talud a 30°	Talud a 20°
(3/Nov)			
	M1: Desplazamiento del compost debido a la inclinación y a la	M1: Caída del compost en mínimas proporciones.	M1: Se aprecia una mínima pérdida de compost.

	contextura de este tratamiento, además de un deslizamiento del suelo en aproximadamente 1,5 cm. M2: Deslizamiento parcial del tratamiento, sin embargo crecimiento de la siembra. Cabe destacar que el suelo también obtuvo un desplazamiento pero en menor proporción que los demás tratamientos de la misma inclinación. M3: La siembra pierde adherencia con el suelo, por ende debilita la siembra. M4: Desplazamiento, presencia de pequeñas tabulaciones y desplazamiento del material erosionado.	M2: Se aprecia un mejor aspecto de las siembras, además que estas tienen una mejor adherencia al suelo. M3: La mayoría de las siembras se encuentran no adheridas al terreno. M4: Desplazamiento y presencia de pequeñas tabulaciones.	M2: En comparación con los demás taludes, éste presenta el mejor resultado en cuanto adherencia siembra-suelo. M3: Aunque superficialmente se presentan características similares a las encontradas con el tratamiento M2 a 20°; no existe agarre de la siembra y el suelo. M4: Se perciben las características de un suelo con alto grado de erosión.
--	---	--	--

Fuente: Autores

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS

La tabulación de los datos encontrados durante la investigación se encuentra relacionada de acuerdo a cada parámetro. A continuación se describe cada uno de ellos:

4.1.1. Humedad

Los datos registrados en la siguiente tabla corresponden a la humedad inicial a la cual se simuló cada una de las secciones de los modelos físicos. Esto con el fin de dar una homogeneidad en cuanto a las condiciones iniciales en la simulación.

Tabla 9: Humedad inicial en el talud simulado a 20°

Condiciones iniciales del suelo para 20° M1		
Humedad Natural del suelo (gr)	69,6	29,64%
W platón + W suelo húmedo (gr)	234,65	100,00%
W platón (gr)	37	15,77%
W platón+ W suelo seco (gr)	165,1	70,36%

Condiciones iniciales del suelo para 20° M2		
Humedad Natural del suelo (gr)	38,9	26,79%
W platón + W suelo húmedo (gr)	145,34	100,00%
W platón (gr)	36,7	25,25%
W platón+ W suelo seco (gr)	106,4	73,21%

Condiciones iniciales del suelo para 20° M3		
Humedad Natural del suelo (gr)	25,5	27,30%
W platón + W suelo húmedo (gr)	93,4	100,00%
W platón (gr)	36	38,54%
W platón+ W suelo seco (gr)	67,9	72,70%

Condiciones iniciales del suelo para 20° M4		
Humedad Natural del suelo (gr)	67,1	25,24%
W platón + W suelo húmedo (gr)	265,8	100,00%
W platón (gr)	36	13,54%
W platón+ W suelo seco (gr)	198,7	74,76%

Fuente: Autores

Tabla 10: Humedad inicial en el talud simulado a 30°

Condiciones iniciales del suelo para 30° M1		
Humedad Natural del suelo (gr)	32,2	26,27%
W platón + W suelo húmedo (gr)	122,53	100,00%
W platón (gr)	35	28,56%
W platón+ W suelo seco (gr)	90,34	73,73%

Condiciones iniciales del suelo para 30° M2		
Humedad Natural del suelo (gr)	38,2	29,02%
W platón + W suelo húmedo (gr)	131,45	100,00%
W platón (gr)	36	27,39%
W platón+ W suelo seco (gr)	93,3	70,98%

Condiciones iniciales del suelo para 30° M3		
Humedad Natural del suelo (gr)	30,4	27,77%
W platón + W suelo húmedo (gr)	109,56	100,00%
W platón (gr)	39	35,60%
W platón+ W suelo seco (gr)	79,14	72,23%

Condiciones iniciales del suelo para 30° M4		
Humedad Natural del suelo (gr)	41,5	26,96%
W platón + W suelo húmedo (gr)	153,76	100,00%
W platón (gr)	36	23,41%
W platón+ W suelo seco (gr)	112,3	73,04%

Fuente: Autores

Tabla 11: Humedad inicial en el talud simulado a 45°

Condiciones iniciales del suelo para 45° M1		
Humedad Natural del suelo (gr)	34,1	14,55%
W platón+ W suelo húmedo (gr)	234,41	100,00%
W platón (gr)	35,8	15,27%
W platón + suelo seco (gr)	200,3	85,45%

Condiciones iniciales del suelo para 45° M2		
Humedad Natural del suelo (gr)	52,9	31,25%
W platón + W suelo húmedo (gr)	169,3	100,00%
W platón (gr)	36,4	21,50%
W platón+ W suelo seco (gr)	116,4	68,75%

Condiciones iniciales del suelo para 45° M3		
Humedad Natural del suelo (gr)	48,8	27,43%
W platón + W suelo húmedo (gr)	177,9	100,00%
W platón (gr)	36,4	20,46%
W platón+ W suelo seco (gr)	129,1	72,57%

Condiciones iniciales del suelo para 45° M4		
Humedad Natural del suelo (gr)	44,8	28,92%
W platón + W suelo húmedo (gr)	154,76	100,00%
W platón (gr)	36	23,26%
W platón+ W suelo seco (gr)	110	71,08%

Fuente: Autores

4.1.2. pH del suelo

Tabla 12: Valores de pH durante el proceso de seguimiento de los modelos

Modelo Talud 20°			
M1	M2	M3	M4
6,83	7,38	7,51	7,72
Modelo Talud 30°			
M1	M2	M3	M4
6,79	7,35	7,52	7,69
Modelo Talud 45°			
M1	M2	M3	M4
6,81	7,32	7,49	7,75

Fuente: Autores

El valor inicial de pH para todas las secciones de suelo corresponde a 7,89 (suelo alcalino).

4.1.3. Temperatura

Tabla 13: Valores de temperatura promedio durante el proceso de seguimiento

Modelo Talud 20°			
M1(°C)	M2(°C)	M3(°C)	M4(°C)
14,4	14,3	14,5	14,4

Modelo Talud 30°			
M1(°C)	M2(°C)	M3(°C)	M4(°C)
14,5	14,6	14,5	14,6

Modelo Talud 45°			
M1(°C)	M2(°C)	M3(°C)	M4(°C)
14,6	15	14,7	14,5

Fuente: Autores

4.1.4. Inclinação y desplazamiento del suelo

En la siguiente tabla se representa el desplazamiento del material erosionado respecto a la posición inicial a la que se acondicionó:

Tabla 14: Desplazamiento de suelo durante el seguimiento de los modelos físicos

Desplazamiento del suelo (cm)				
	M1	M2	M3	M4
Talud a 20°	0	0	0	0
Talud a 30°	0,7	0,2	0,3	0,8
Talud a 45°	2,8	2,5	2,5	3

Fuente: Autores

4.1.5. Arrastre de material

Los siguientes datos corresponden a la cantidad de material arrastrado para cada sección (M1, M2, M3 y M4) según cada una de las

inclinaciones (20°, 30° y 45°). Estos resultados se registran después de la simulación de precipitación.

Tabla 15: Cuantificación del arrastre de material, talud a 20°

Arrastre de material después de la simulación (Talud a 20°)					
Tratamiento	M1	M2	M3	M4	TOTAL
W soporte (gr)	25,5	24	26	23,6	99,1
W soporte + W suelo húmedo (gr)	38,3	12,8	15	56,7	122,8
W soporte + W suelo seco (gr)	31,3	7,6	9,1	42,8	90,8
W suelo transportado seco (gr)	7	5,2	5,9	13,9	32

Fuente: Autores

Tabla 16: Cuantificación del arrastre de material, talud a 30°

Arrastre de material después de la simulación (Talud a 30°)					
Tratamiento	M1	M2	M3	M4	TOTAL
W soporte (gr)	25,5	24	26	23,6	99,1
W soporte + W suelo húmedo (gr)	68,2	32,3	45,7	78,4	224,6
W soporte + W suelo seco (gr)	54,3	22,6	33,8	62,7	173,4
W suelo transportado seco (gr)	13,9	9,7	11,9	15,7	51,2

Fuente: Autores

Tabla 17: Cuantificación del arrastre de material, talud a 45°

Arrastre de material después de la simulación (Talud a 45°)					
Tratamiento	M1	M2	M3	M4	TOTAL
W kusoporte (gr)	25,5	24	26	23,6	99,1
W soporte + W suelo húmedo (gr)	154,8	116,3	132,9	176,7	580,7
W soporte + W suelo seco (gr)	116,3	87,6	101,4	132,6	437,9
W suelo transportado seco (gr)	38,5	28,7	31,5	44,1	142,8

Fuente: Autores

4.1.6. Infiltración

Los datos de infiltración encontrados para cada uno de los modelos físicos, son tomados después de la realización de la simulación. El análisis de esta se hace teniendo en cuenta la altura en mm de la cantidad de agua, posteriormente se determina el diferencial de altura para finalmente establecer la intensidad de infiltración (mm/h).

En las siguientes tablas se registra la infiltración generada para cada uno de los tratamientos a diferentes inclinaciones.

4.1.6.1. Infiltración para el modelo físico a 20°

4.1.6.1.1 Tratamiento M1 (Compost)

Tabla 18: Resultados infiltración (M1 talud a 20°)

Altura de agua (Talud a 20°)				
Tratamiento M1				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	5	0,4	0,4	22,34
5	25	1,9	1,5	17,88
10	37	2,8	0,9	5,36
15	42,13	3,1	0,4	1,53
20	59	4,4	1,3	3,77
25	65	4,8	0,4	1,07
30	79	5,9	1,0	2,09
40	86	6,4	0,5	0,78
50	98	7,3	0,9	1,07
60	102	7,6	0,3	0,30
PROMEDIO				5,62

Fuente: Autores

4.1.6.1.2 Tratamiento M2 (Compost + biosiembra)

Tabla 19: Resultados infiltración (M2 talud a 20°)

Altura de agua (Talud a 20°)				
Tratamiento 2				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	10	0,7	0,7	44,69
5	35	2,6	1,9	22,34
10	46	3,4	0,8	4,92
15	57	4,2	0,8	3,28
20	87	6,5	2,2	6,70
25	111	8,3	1,8	4,29
30	169,5	12,6	4,4	8,71
40	222	16,5	3,9	5,87
50	253,5	18,9	2,3	2,82
60	297	22,1	3,2	3,24
PROMEDIO				10,69

Fuente: Autores

4.1.6.1.3 Tratamiento M3 (Biosiembras)

Tabla 20: Resultados de infiltración (M3 talud a 20°)

Altura de agua (Talud a 20°)				
Tratamiento 3				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	7	0,5	0,5	31,28
5	15	1,1	0,6	7,15
10	20	1,5	0,4	2,23
15	28	2,1	0,6	2,38
20	42	3,1	1,0	3,13
25	55,5	4,1	1,0	2,41
30	76,5	5,7	1,6	3,13
40	101,85	7,6	1,9	2,83
50	127,5	9,5	1,9	2,29
60	139,5	10,4	0,9	0,89
PROMEDIO				5,77

4.1.6.1.4 Tratamiento M4 (Ningún tratamiento)

Tabla 21: Resultados de infiltración (M4 talud a 20°)

Altura de agua (Talud a 20°)				
Tratamiento M4				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	0	0,0	0,0	0,0
5	10	0,7	0,7	8,9
10	18	1,3	0,6	3,6
15	23	1,7	0,4	1,5
20	32	2,4	0,7	2,0
25	39	2,9	0,5	1,3
30	51	3,8	0,9	1,8
40	61,5	4,6	0,8	1,2
50	72	5,4	0,8	0,9
60	84	6,3	0,9	0,9
PROMEDIO				2,21

Fuente: Autores

4.1.6.2. Infiltración para el modelo físico a 30°

4.1.6.2.1 Tratamiento M1 (Compost)

Tabla 22: Resultados infiltración (M1 talud a 30°)

Altura de agua (Talud a 30°)				
Tratamiento M1				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	3	0,2	0,2	13,4
5	7	0,5	0,3	3,6
10	12	0,9	0,4	2,2
15	23	1,7	0,8	3,3
20	27	2,0	0,3	0,9
25	32,5	2,4	0,4	1,0
30	42	3,1	0,7	1,4
40	61,5	4,6	1,5	2,2
50	72	5,4	0,8	0,9
60	79,5	5,9	0,6	0,6
PROMEDIO				2,9

4.1.6.2.2 Tratamiento M2 (Compost + biosiembra)

Tabla 23: Resultados infiltración (M2 talud a 30°)

Altura de agua (Talud a 30°)				
Tratamiento M2				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	4	0,3	0,3	17,9
5	15	1,1	0,8	9,8
10	30	2,2	1,1	6,7
15	50	3,7	1,5	6,0
20	80	6,0	2,2	6,7
25	102	7,6	1,6	3,9
30	135	10,1	2,5	4,9
40	180	13,4	3,4	5,0
50	205,4	15,3	1,9	2,3
60	238,5	17,8	2,5	2,5
PROMEDIO				6,6

Fuente: Autores

4.1.6.2.3 Tratamiento M3 (Biosiembras)

Tabla 24: Resultados infiltración (M3 talud a 30°)

Altura de agua (Talud a 30°)				
Tratamiento M3				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	2	0,1	0,1	8,9
5	10	0,7	0,6	7,2
10	18	1,3	0,6	3,6
20	39	2,9	0,9	2,7
25	51,5	3,8	0,9	2,2
30	67,5	5,0	1,2	2,4
40	93	6,9	1,9	2,8
50	124,5	9,3	2,3	2,8
60	133,5	9,9	0,7	0,7
PROMEDIO				3,6

Fuente: Autores

4.1.6.2.4 Tratamiento M4 (Ningún tratamiento)

Tabla 25: Resultados infiltración (M4 talud a 30°)

Altura de agua (Talud a 30°)				
Tratamiento M4				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	0	0,0	0,0	0,0
5	0	0,0	0,0	0,0
10	5	0,4	0,4	2,2
20	21	1,6	0,7	2,0
25	31	2,3	0,7	1,8
30	43	3,2	0,9	1,8
40	50	3,7	0,5	0,8
50	57	4,2	0,5	0,6
60	67,5	5,0	0,8	0,8
PROMEDIO				1,2

Fuente: Autores

4.1.6.3. Infiltración para el modelo físico a 45°

4.1.6.3.1 Tratamiento M1 (Compost)

Tabla 26: Resultados infiltración (M1 talud a 45°)

Altura de agua (Talud a 45°)				
Tratamiento M1				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	0	0,0	0,0	0,0
5	0	0,0	0,0	0,0
10	10	0,7	0,7	4,5
20	29,5	2,2	0,6	1,9
25	38	2,8	0,6	1,5
30	47,5	3,5	0,7	1,4
40	52,5	3,9	0,4	0,6
50	61,5	4,6	0,7	0,8
60	67,5	5,0	0,4	0,4
PROMEDIO				1,4

4.1.6.3.2 Tratamiento M2 (Compost + biosiembra)

Tabla 27: Resultados infiltración (M2 talud a 45°)

Altura de agua (Talud a 45°)				
Tratamiento M2				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	0	0,0	0,0	0,0
5	0	0,0	0,0	0,0
10	20	1,5	1,5	8,9
15	42	3,1	1,6	6,6
20	65	4,8	1,7	5,1
25	90	6,7	1,9	4,5
30	115	8,6	1,9	3,7
40	150	11,2	2,6	3,9
50	190	14,2	3,0	3,6
60	226,5	16,9	2,7	2,7
PROMEDIO				3,9

Fuente: Autores

4.1.6.3.3 Tratamiento M3 (Biosiembras)

Tabla 28: Resultados infiltración (M3 talud a 45°)

Altura de agua (Talud a 45°)				
Tratamiento M3				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	0	0,0	0,0	0,0
5	0	0,0	0,0	0,0
10	16	1,2	1,2	7,2
15	24	1,8	0,6	2,4
20	32	2,4	0,6	1,8
25	39	2,9	0,5	1,3
30	50	3,7	0,8	1,6
40	69	5,1	1,4	2,1
50	90,5	6,7	1,6	1,9
60	115,5	8,6	1,9	1,9
PROMEDIO				2,0

Fuente: Autores

4.1.6.3.4 Tratamiento M4 (Ningún tratamiento)

Tabla 29: Resultados infiltración (M4 talud a 45°)

Altura de agua (Talud a 45°)				
Tratamiento M3				
Tiempo de simulación (min)	Altura registrada en los vasos (mm)	Altura registrada en la sección (mm)	Diferencia de alturas (mm)	Velocidad de Infiltración (mm/h)
1	0	0,0	0,0	0,0
5	0	0,0	0,0	0,0
10	0	0,0	0,0	0,0
15	15	1,1	1,1	4,5
20	25	1,9	0,7	2,2
25	31	2,3	0,4	1,1
30	39	2,9	0,6	1,2
40	48	3,6	0,7	1,0
50	52	3,9	0,3	0,4
60	57	4,2	0,4	0,4
PROMEDIO				1,1

Fuente: Autores

4.1.7. Balance hídrico

Este balance se analiza siguiendo el equilibrio de los recursos hídricos que entran y salen de los modelos físicos en estudio. Por lo tanto se tiene en cuenta la siguiente expresión:

$$TP = I + Es - Ar$$

Donde TP: Total precipitación
 I: Infiltración
 Es: Escorrentía
 Ar: Agua retenida en el suelo

Tabla 30: Balance hídrico para el modelo con inclinación de 20°

Talud 20°				
Agua de infiltración (L)				
M1 (L)	M2 (L)	M3 (L)	M4 (L)	TOTAL
0,68	1,98	0,93	0,56	4,15
Agua retenida por el suelo				
M1 (L)	M2 (L)	M3 (L)	M4 (L)	TOTAL
0,82	0,94	0,76	0,63	3,15
Agua de escorrentía				
M1 (L)	M2 (L)	M3 (L)	M4 (L)	TOTAL
3,3	1,88	3,11	3,61	11,9

Fuente: Autores

Tabla 31: Balance hídrico para el modelo con inclinación de 30°

Talud 30°				
Agua de infiltración (L)				
M1 (L)	M2 (L)	M3 (L)	M4 (L)	TOTAL
0,53	1,59	0,89	0,45	3,46
Agua retenida por el suelo				
M1 (L)	M2 (L)	M3 (L)	M4 (L)	TOTAL
0,68	0,86	0,72	0,54	2,8
Agua de escorrentía				
M1 (L)	M2 (L)	M3 (L)	M4 (L)	TOTAL
3,59	2,35	3,19	3,81	21,94

Fuente: Autores

Tabla 32: Balance hídrico para el modelo con inclinación de 45°

Talud 45°				
Agua de infiltración (L)				
M1 (L)	M2 (L)	M3 (L)	M4 (L)	TOTAL
0,45	1,2	0,77	0,38	2,8

Agua retenida por el suelo				
M1 (L)	M2 (L)	M3 (L)	M4 (L)	TOTAL
0,3	0,52	0,28	0,12	1,22

Agua de escorrentía				
M1 (L)	M2 (L)	M3 (L)	M4 (L)	TOTAL
4,05	3,08	3,75	4,3	15,18

Fuente: Autores

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta que la erosión es un efecto relacionado con distintos parámetros; con los resultados encontrados anteriormente, se discute acerca del impacto que éstos crean para cada uno de los modelos físicos.

4.2.1. Condición de humedad

La humedad en esta investigación corresponde a un factor importante, puesto que en principio se busca que las condiciones encontradas en campo puedan ser llevadas a laboratorio. Inicialmente la humedad puesta en los taludes es relativamente igual es decir, se encuentra entre un rango de 25% a 30%, pero teniendo en cuenta que la humedad del suelo varía de acuerdo a la diversidad climática, durante y al final del proceso se hallaron humedades distintas para cada inclinación de talud simulado.

A pesar de que el proceso de riego se hizo con una cantidad igual de agua, la humedad varía considerablemente para cada una de las secciones. Por lo tanto, después de la aplicación de los tratamientos, se percibe lo siguiente:

1. El terreno que no se encuentra protegido con ningún tipo de tratamiento (M4) pierde rápidamente la humedad en comparación con las demás secciones.
2. Las siembras ayudan considerablemente en la retención de agua.

3. El compost en estado sólido por su textura, genera retención de humedad.
4. Al combinar los beneficios 2 y 3, se logra una mayor retención de agua en el talud. Por tanto la mayor eficiencia es para M2 en cuanto a la humedad inicial.

4.2.2. pH del suelo

La comparación entre el pH inicial del suelo y el encontrado en la terminación del proceso, es un factor importante puesto que el pH permite cuantificar diferentes características del suelo que contribuyen al desarrollo de las biosiembras.

Por lo anterior se deduce que la aplicación del material orgánico (compost) proporciona condiciones idóneas al suelo para el desarrollo de vegetación, pues durante el seguimiento de los modelos físicos el pH de las secciones donde es aplicado el compost los valores de pH fueron entre 6.6 y 7.3, es decir neutro los cuales permiten una mejor adaptación de la vegetación en este caso kikuyo ya que el suelo adquiere condiciones de mayor permeabilidad debido a la textura de la materia orgánica.

4.2.3. Temperatura

La temperatura del suelo durante la etapa de seguimiento de los modelos físicos fue constante sin alteraciones considerables como se observa en la tabla 5.

4.2.4. Infiltración

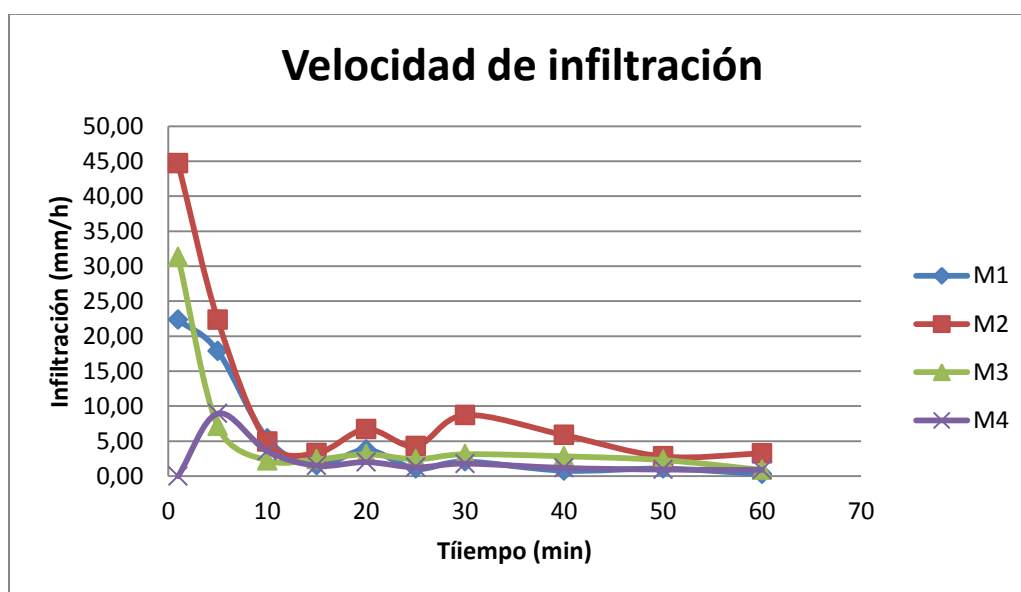
La infiltración final encontrada para cada uno de los modelos físicos se analiza a continuación en las siguientes tablas y gráficas:

Tabla 33: Infiltración para el modelo físico a 20°

Infiltración para un talud de 20°				
Tiempo simulado (min)	Vel Infiltración M1 (mm/h)	Vel Infiltración M2 (mm/h)	Vel Infiltración M3 (mm/h)	Vel Infiltración M4 (mm/h)
1	22,34	44,69	31,28	0,0
5	17,88	22,34	7,15	8,9
10	5,36	4,92	2,23	3,6
15	1,53	3,28	2,38	1,5
20	3,77	6,70	3,13	2,0
25	1,07	4,29	2,41	1,3
30	2,09	8,71	3,13	1,8
40	0,78	5,87	2,83	1,2
50	1,07	2,82	2,29	0,9
60	0,30	3,24	0,89	0,9
Promedio	5,62	10,69	5,77	2,21

Fuente: Autores

Gráfica 4: Velocidad de infiltración modelo físico a 20°



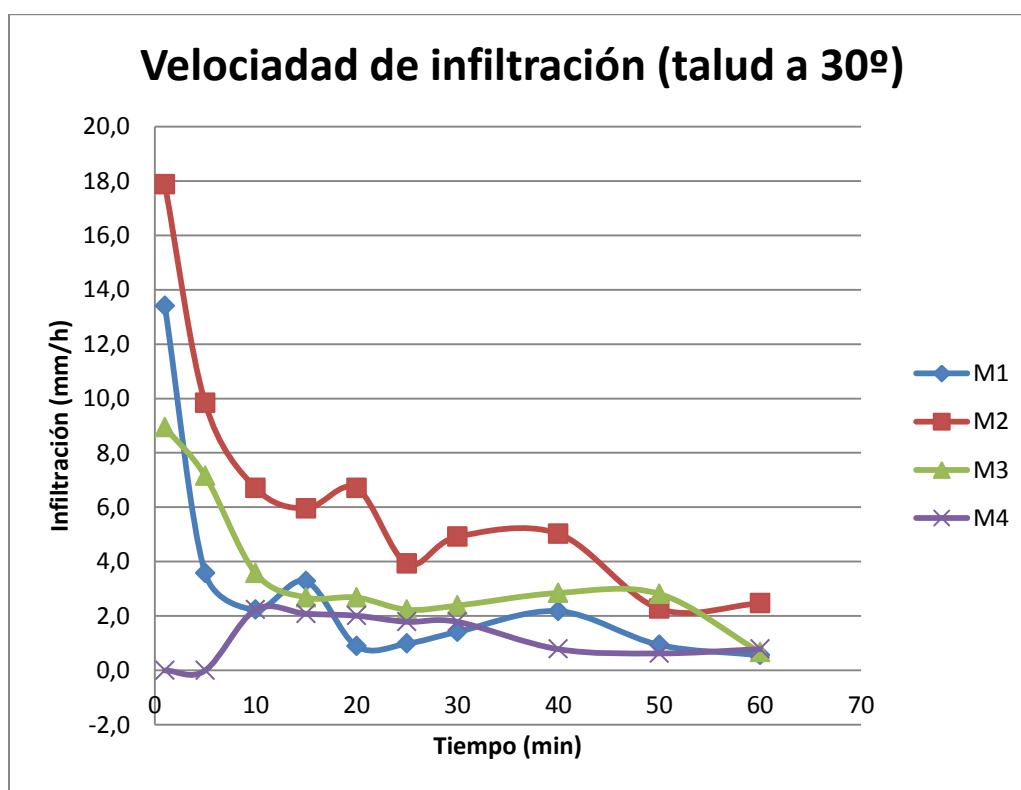
Fuente: Autores

Tabla 34: Infiltración para el modelo físico a 30°

Infiltración para un talud de 30°				
Tiempo simulado (min)	Vel Infiltración M1 (mm/h)	Vel Infiltración M2 (mm/h)	Vel Infiltración M3 (mm/h)	Vel Infiltración M4 (mm/h)
1	13,4	17,9	8,9	0,0
5	3,6	9,8	7,2	0,0
10	2,2	6,7	3,6	2,2
15	3,3	6,0	2,7	2,1
20	0,9	6,7	2,7	2,0
25	1,0	3,9	2,2	1,8
30	1,4	4,9	2,4	1,8
40	2,2	5,0	2,8	0,8
50	0,9	2,3	2,8	0,6
60	0,6	2,5	0,7	0,8
Promedio	2,9	6,6	3,6	1,2

Fuente: Autores

Gráfica 5: Velocidad de infiltración modelo físico a 30°



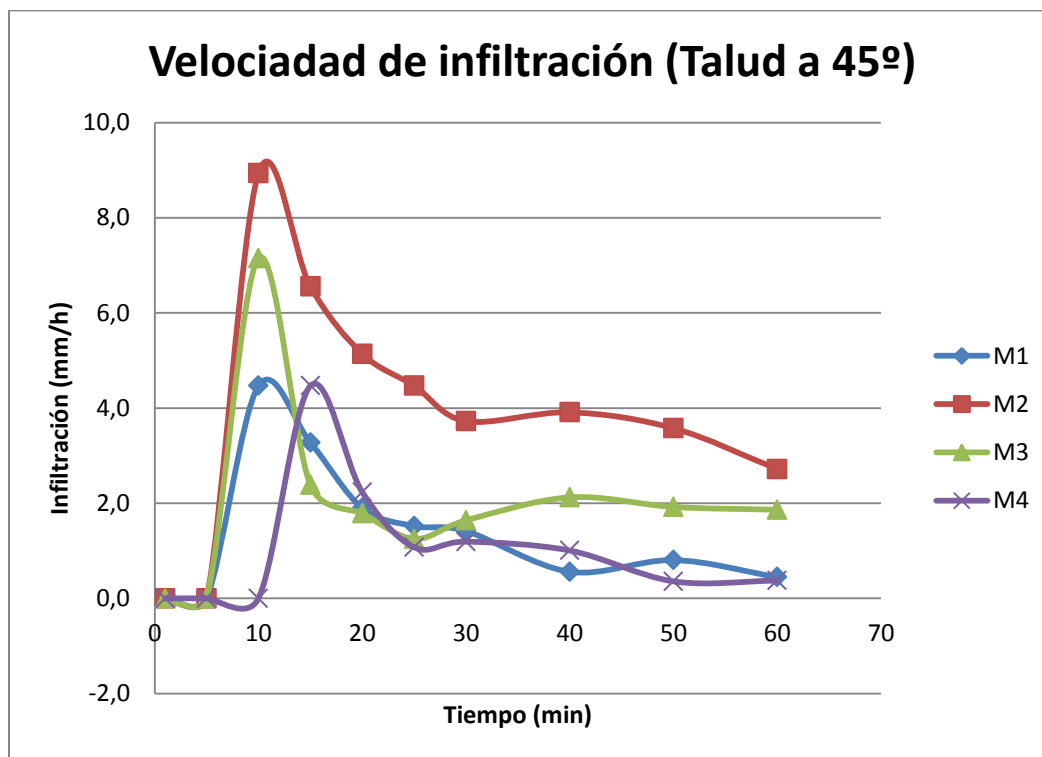
Fuente: Autores

Tabla 35: Infiltración para el modelo físico a 45°

Infiltración para un talud de 45°				
Tiempo simulado (min)	Vel Infiltración M1 (mm/h)	Vel Infiltración M2 (mm/h)	Vel Infiltración M3 (mm/h)	Vel Infiltración M4 (mm/h)
1	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0
10	4,5	8,9	7,2	0,0
15	3,3	6,6	2,4	4,5
20	1,9	5,1	1,8	2,2
25	1,5	4,5	1,3	1,1
30	1,4	3,7	1,6	1,2
40	0,6	3,9	2,1	1,0
50	0,8	3,6	1,9	0,4
60	0,4	2,7	1,9	0,4
Promedio	1,4	3,9	2,0	1,1

Fuente: Autores

Gráfica 6: Velocidad de infiltración modelo físico a 45°



Fuente: Autores

Con lo anterior se puede afirmar que:

- En las secciones de suelo desprotegido (M4) se evidenció menor infiltración independientemente de su inclinación; esto puede ser debido a que la corteza o parte superior del suelo se comprime y se compacta con firmeza, lo cual evita la entrada de agua y genera mayor escorrentía que infiltración.
- La textura del material orgánico (en este caso el compost) mejoró considerablemente la entrada del agua al suelo en las secciones M1 y M2, de las diferentes inclinaciones. La deducción a la que se llega es que, el compost posee una textura que permite la absorción del agua y por tanto al contacto con el material arcillo limoso transmite humedad que acondiciona el proceso de infiltración.
- Las siembras ayudan en el manejo y direccionamiento del agua, por lo tanto al presentarse un mejor desarrollo de la biosiembra se adquiere una mayor capacidad de absorción, retención y por ende infiltración de agua. Esto se evidencia en los tratamientos M2 y M3 de las tablas 24, 25 y 26, donde se genera el mayor volumen de agua infiltrada.
- La compactación del suelo también incide de manera significativa, pues a mayor grado de compactación menor capacidad de infiltración.
- Debido a que el talud a 45° fue el modelo con mayor arrastre de material, la simulación de infiltración se acelera, pues por falta de material se logra acumular una mayor cantidad de agua en los recipientes medidores de infiltración.

4.2.5. Inclínación y desplazamiento del material

En el desarrollo de la investigación, se proponen tres tipos de inclinación (20°, 30° y 45°) con el fin de observar la incidencia de este parámetro en el desarrollo del proceso erosivo. Es posible observar en la tabla 6 que el modelo ubicado a 45° presenta desde el inicio del montaje de los modelos en laboratorio, un desplazamiento del suelo de aproximadamente 3cm, lo cual contribuye a la aparición temprana de sedimentos en este modelo. Esto es evidenciado principalmente en las secciones M1 y M4, pues no cuentan con protección de biosiembra.

La adecuación de la alternativa para el manejo de la erosión (compost y biosiembra) se dificulta a mayor inclinación ya que la superficie del terreno no permite una adherencia rápida de esta.

En los dos modelos restantes se mostró un mejor comportamiento, el modelo de 30° no superó un desplazamiento del suelo mayor a 1cm y la caída de material como suelo o compost fue mínima. Por otra parte el modelo a 20° no presentó desplazamiento del suelo durante todo el seguimiento y la adecuación de la alternativa fue más eficaz que la de los modelos con mayor inclinación pues no hubo pérdida de compost y la aplicación en la superficie del suelo es más sencilla y rápida.

Teniendo en cuenta el análisis anterior se establece que el desarrollo y adaptación de la biosiembra en los modelos demuestra un mejor comportamiento a menor inclinación, pues al no haber pérdida del compost, se proporciona una distribución homogénea de los nutrientes en toda la superficie del suelo, generando un buen desarrollo de la raíz y mayor agarre de esta sobre el terreno.

4.2.6. Arrastre de material

Tabla 36: Resumen arrastre de material después de la simulación de precipitación.

Arrastre de material total (g)				
	M1	M2	M3	M4
Talud a 20°	7	5,2	5,9	13,9
Talud a 30°	13,9	9,7	11,9	15,7
Talud a 45°	38,5	28,7	31,5	44,1

Fuente: Autores

Durante la simulación de precipitación, la inclinación de los modelos representa uno de los parámetros de mayor incidencia en la pérdida de suelo, arrastre y desprendimiento de materiales, pues al igual que en la etapa de seguimiento el modelo ubicado a 45° evidencia una pérdida considerable de suelo y compost como se observa en la tabla 28.

De igual forma los modelos con menor inclinación tienen una menor pérdida suelo y de compost, demostrando que entre menor sea la inclinación del talud la aplicación, adaptación y posterior comportamiento de la alternativa va a ser mejor, pues la pérdida de suelo se reduce en un 21% aproximadamente comparando el modelo ubicado a 20° con el de 45°.

4.2.7. Escorrentía

Uno de los parámetros hidrológicos más representativos en la evolución de la erosión es la escorrentía pues genera un mayor arrastre de suelo y de compost. Por tal motivo, las secciones más afectadas por este parámetro son M1 y M4 donde es posible observar inicialmente una erosión laminar que genera un arrastre principalmente del compost con mayor incidencia en el modelo físico a inclinación 45°; sin embargo,

esta alternativa proporciona protección a la superficie del terreno en cuanto a la aparición de surcos ya que en la sección M4, esta característica erosiva se desarrolla más pronto y con mayor profundidad aproximadamente 4mm.

La protección de la superficie del terreno con biosiembra hace que los efectos de la escorrentía superficial disminuyan considerablemente sobretodo en la sección M2, pues la implementación del compost y la biosiembra impiden un arrastre excesivo del material, únicamente en lugares donde la biosiembra no pudo desarrollarse por la caída del compost durante la etapa de seguimiento de los modelos, principalmente en los de mayor inclinación.

El talud ubicado a 20° en su sección M2 evidencio el mejor comportamiento para contrarrestar los efectos de la escorrentía superficial pues al mantener una homogeneidad del compost en la superficie del suelo durante todo el proceso de la investigación, se permite un buen desarrollo de la vegetación en la mayor parte de la sección, impidiendo un arrastre considerable de suelo, además evita la aparición de surcos y genera buenas condiciones para conducir excesos de agua a zonas apartadas del talud.

4.2.8. Acción de la vegetación

Para analizar los efectos generados por las biosiembras, no existe como tal una medición física que describa la eficiencia o no de estas. Es por ello, que el estudio se basa en las características cualitativas que el pasto kikuyo representó en el tratamiento.

Según lo observado los beneficios con la utilización de las biosiembras como tratamiento de manejo de la erosión del suelo, es alto; esto se

percibe con el progreso encontrado en los taludes simulados en aspectos como mejoramiento de la estética, menor desplazamiento del terreno y mejor direccionamiento del agua.

Aunque la acción de la vegetación sin la aplicación del compost logra cumplir con los beneficios anteriormente nombrados, la combinación del compost y las biosiembras mejoran adicionalmente la adherencia del pasto kikuyo con el terreno; lo acondiciona para que la vegetación se desarrolle rápidamente, con raíces más fuertes y con un color estéticamente más llamativo.

4.2.9. Análisis comparativo de los modelos simulados

En la siguiente tabla se demuestra la eficiencia de cada una de las secciones de los modelos físicos simulados:

Tabla 37: Análisis comparativo de los modelos simulados

	Talud a 20°				Talud a 30°				Talud a 45°			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Humedad (%)	29,64	26,79	27,3	25,24	26,27	29,02	27,77	26,96	23,21	31,4	27,43	28,29
pH	6,83	7,38	7,51	7,72	6,79	7,35	7,52	7,69	6,81	7,32	7,49	7,75
Temperatura (°)	14,4	14,3	14,5	14,4	14,5	14,6	14,5	14,6	14,6	15	14,7	14,5
Desplazamiento (cm)	0	0	0	0	0,7	0,2	0,3	0,8	2,8	2,5	2,5	3
Arrastre de material	7	5,2	5,9	13,9	13,9	9,7	11,9	15,7	38,5	28,7	31,5	44,1
Infiltración (mm)	5,62	10,69	5,77	2,21	2,9	6,6	3,6	1,2	1,4	3,9	2	1,1
Escorrentía	3,3	1,88	3,11	3,61	3,59	2,35	3,19	3,81	4,05	3,08	3,75	4,3

Fuente: Autores

Talud a 20°: Se establece que M2 (Compost + Biosiembras) es la mejor alternativa de tratamiento pues de acuerdo a los resultados generados, cumple con la condición más favorable respecto a las demás inclinaciones simuladas.

Talud de 30° y 45°: Al igual que para el talud a 20°, la sección que demostró un mejor comportamiento fue M2, a pesar de que algunos de sus parámetros no fueron muy beneficiosos, pues el grado de inclinación de estos modelos físicos afectaron la adaptación y desarrollo del tratamiento.

5. CONCLUSIONES

Las características del suelo sin ningún tipo de tratamiento representan menor tasa de infiltración. Debido a la textura del compost y la capacidad de almacenamiento de las biosiembras, se genera una mejor absorción y retención de la humedad, favoreciendo además la estabilidad futura del talud.

La utilización del compost y las biosiembras como medida de protección al problema erosivo del suelo, es una alternativa viable en el sentido técnico, económico y estético; por lo cual, se puede establecer que la implementación de esta alternativa es funcional en zonas de condiciones climáticas similares a las de esta investigación.

La temperatura encontrada en el terreno estudiado y el simulado en laboratorio, no generó cambios representativos. Esto demuestra que este parámetro no interviene en modificaciones que interfieran en el desarrollo de la siembra, ni en la aceleración de la erosión.

En cuanto al pH del suelo, se establece que mejora con la adición del compost. Pues el cambio de suelo alcalino a neutro favorece notoriamente el desarrollo de las biosiembras, permitiendo en estas un crecimiento más resistente de las raíces y una mayor adherencia al suelo.

La inclinación de los taludes incide en la erosión del suelo. Por esto, a mayor inclinación del terreno, mayor es el desplazamiento y arrastre de material, además se presenta mayor dificultad para situar el tratamiento de control.

La condición de humedad representa aspectos importantes en el talud; cuando se encuentra menor humedad en este la erosión es más significativa, en porcentajes de humedad moderada se fortalece el crecimiento de las biosiembras y en condiciones de humedad excesiva la biosiembra se descompone.

La textura granular del compost favorece la absorción de agua y transferencia de la misma al suelo erosionado; pero no se adhiere fácilmente a la superficie del terreno lo cual acelera el arrastre del tratamiento en los episodios de lluvia.

El direccionamiento del agua de escorrentía en suelos desprotegidos interviene en la aparición de surcos y más adelante en la formación de socavaciones internas, lo cual desmejora la estabilidad del suelo. Para terrenos con protección vegetal este problema desaparece o disminuye considerablemente, pues el follaje de las biosiembras disipa la velocidad de las gotas de lluvia, evitando así un impacto abrupto de estas en el suelo y una moderada evacuación de la escorrentía.

El comportamiento del modelo físico con inclinación a 20° en su sección M2 demuestra ser el mejor comportamiento respecto a la interacción del suelo con la alternativa de control de erosión pues se logra una mejor adherencia del compost en el terreno y un mejor desarrollo de las biosiembras. Además como se observa en la tabla 15 el arrastre de material es inferior a las demás secciones evidenciándose condiciones favorables para mantener el suelo protegido de agentes erosivos.

En la simulación de precipitación, el espaciamiento a 5cm genera una mayor homogeneidad en la caída de las gotas de agua. Lo cual favorece a una toma de datos certeros, puesto que la cantidad de agua

debe llegar a cada uno de los taludes de forma equitativa y con igualdad de presión.

6. RECOMENDACIONES

Para continuar con el proceso investigativo, es recomendable implementar la alternativa de control de erosión en campo, donde se puedan encontrar condiciones de pendiente variables y eventos de precipitación reales de acuerdo a la zona de estudio.

Para futuras investigaciones se propone la utilización de otro tipo de vegetación con características radicales diferentes a las del kikuyo, con el fin de reconocer un control, mitigación y prevención de la erosión superficial, y donde además se pueda analizar la estabilidad del talud.

La realización de un mayor número de simulaciones tanto de los modelos físicos como de lluvia, puede contribuir a una medición más exacta de los parámetros generadores de la erosión superficial.

Se recomienda la utilización de un fertilizante líquido con el fin de comparar las ventajas y desventajas que se pueden llegar a generar en el proceso de control de la erosión respecto a la implementación de un fertilizante granular, en este caso el compost.

Para lograr una comparación del comportamiento de la alternativa de control de erosión es recomendable implementar diferentes tipos de suelo como arenas.

La simulación de precipitación en el presente estudio maneja una intensidad constante, es importante para próximas investigaciones realizar simulaciones con diferentes intensidades de precipitación con el fin comparar el comportamiento del suelo y de la alternativa de control de erosión frente a este parámetro.

7. GLOSARIO

Arcillas: Granos de suelo que tienen un diámetro inferior a 2 μ m. Un suelo formado por una mayor parte de partículas con tamaño inferior a este diámetro se dice que está formado por minerales arcillosos.

Balance hídrico: Se refiere al cálculo de la disponibilidad existente del agua recibida en el suelo y la pérdida de esta debido a la evapotranspiración o evaporación según sea el caso.¹⁴

Capacidad de infiltración: Las capacidades de infiltración varían de dos a dos mil quinientos milímetros por hora, dependiendo de la cobertura vegetal, pendiente, textura del suelo, humedad natural y práctica de agricultura. Los suelos más permeables como las gravas y arenas poseen una capacidad mayor de infiltración. Las gravas y arenas son mucho más permeables que las arcillas.¹⁵

Ciclo hidrológico: El agua es un elemento natural esencial para la existencia de la vida, y esta se encuentra en la naturaleza de diferentes formas, generalmente en continuo movimiento; de acuerdo a un ciclo que incluye las nubes o vapor de agua, la precipitación en forma de lluvia granizo o nieve, la infiltración, la evapotranspiración, la escorrentía, las corrientes subterráneas, los acuíferos, los ríos y quebradas, los mares y los lagos. El agua continuamente está cambiando de forma de acuerdo a un ciclo natural denominado ciclo hidrológico.¹⁶

¹⁴<http://www.inameh.gob.ve/glosb.php>

¹⁵Suárez, J. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, 1998. P.24.

¹⁶Suárez, J. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, 1998. P.16.

Dispersividad: Los suelos dispersivos se erosionan mediante un proceso en el cual las partículas individuales son liberadas a suspensión en aguas prácticamente quietas mientras en los suelos corrientes se requiere considerable velocidad del agua erosionante.

Erosión laminar: pérdida de suelo generada por la circulación superficial difusa del agua de escorrentía.

Erosión en surcos: suelo arrastrado por el flujo del agua que canaliza y jerarquiza generando surcos.

Erosionabilidad: Es la susceptibilidad de un suelo a sufrir procesos de erosión y tiene relación con las propiedades físico-químicas del suelo y su estructura, la cual es compleja en los suelos tropicales; la aparición del fenómeno de la erosión en un suelo varía de acuerdo con las características geológicas, mineralógicas del suelo y del perfil de meteorización de la formación, la topografía y la cobertura vegetal.¹⁷

Escorrentía: es la proporción de lluvia que fluye sobre la superficie del terreno. El camino y el tiempo que toma el agua desde que cae en forma de lluvia hasta que alcanza una cañada o río depende de las características físicas de la cuenca, particularmente de las pendientes del terreno, textura del suelo y vegetación. El agua corre laminarmente al comienzo, luego en concentraciones pequeñas, las cuales van creciendo ladera abajo.¹⁸

¹⁷Suárez, J. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, 1998, P.265.

¹⁸Suárez, J. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, 1998. P.22.

Fertilizante: Cualquier material mineral que se agrega al suelo para suministrar uno o más nutrientes para las plantas.

Geología y tipos de suelo: Las características geológicas y el suelo tienen un gran efecto en la infiltración. La geología caracteriza las propiedades del subsuelo y otros factores geotécnicos que pueden ser significativos como la posibilidad de deslizamientos, los cuales a su vez afectan la ocurrencia de caudales extraordinarios, flujos hiperconcentrados y avalanchas.¹⁹

Germinación: es el proceso en el cual el crecimiento emerge desde un estado de reposo. El ejemplo más común de la germinación, es el brote de un semillero a partir de una semilla de una planta floral o angiosperma.

Infiltración: El agua de la lluvia al caer sobre el suelo trata de infiltrarse, desplazando el agua existente hacia abajo por macro poros, formando una especie de onda de presión de agua dentro del suelo, la cual produce un frente húmedo de infiltración.²⁰

Intensidad de la lluvia: La intensidad de la lluvia se puede determinar con las curvas de intensidad - duración – frecuencia, de aguaceros equivalentes en función del período de retorno.²¹

¹⁹Suárez, J. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, 1998. P.28.

²⁰Suárez, J. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, 1998. P.24.

²¹Suárez, J. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, 1998. P.34.

Mecánica de suelos: Aplicación de los principios de la mecánica y de la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan de la naturaleza y el comportamiento de los suelos, sedimentos y otras acumulaciones de partículas sólidas. Estudio detallado y sistemático de las propiedades físicas y la utilización de los suelos, especialmente en relación con la ingeniería de carreteras y de cimentaciones y con el estudio de los problemas asociados a la estabilidad de taludes y laderas.

Modelo físico: Es una representación que se hace del prototipo con el propósito de estudiar detalladamente el comportamiento una estructura, o parte de ella, bajo ciertas circunstancias pre-establecidas.²²

Nutriente: Sustancia que contiene alimento. Se emplea sobre todo en relación con los elementos del suelo y el agua que las plantas y animales toman. *Compuestos de nitrógeno (N) o fósforo (P) que favorecen en las aguas y suelos el desarrollo de la vida.²³

Pendiente: Cuesta o declive de un terreno.

Peso específico: Relación entre el volumen total de la muestra y su peso.²⁴

Ph: Es una medida de la concentración del ión hidrógeno en el agua. Se expresa la concentración de este ión como pH, y se define como el logaritmo decimal cambiado de signo de la concentración de ión hidrógeno.²⁵

²²http://fluidos.eia.edu.co/fluidos/modelos/modelo_fisico.html

²³<http://www.monografias.com/trabajos70/glosario-terminos-agronomia/glosario-terminos-agronomia2.shtml#ixzz3Q3RpQArW>

²⁴<http://pendientedemigracion.ucm.es/info/petrosed/rc/por/>

²⁵<http://www.monografias.com/trabajos70/glosario-terminos-agronomia/glosario-terminos-agronomia2.shtml#ixzz3Q3SPdddk>

Procedimiento: Conjunto de acciones conducentes a la ejecución de operaciones o funciones específicas o a la identificación y evaluación de materiales, productos, servicios o sistemas, cuyo resultado no se expresa cuantitativamente.

Precipitación: Es cualquier producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra. Ocurre cuando la atmósfera (que es una gran solución gaseosa) se satura con el vapor de agua, y el agua se condensa y cae de la solución (es decir, precipita). El aire se satura a través de dos procesos: por enfriamiento y añadiendo humedad.²⁶

Presión: Término utilizado en forma laxa como sinónimo de esfuerzo. Estrictamente este término debe restringirse para designar la fuerza por unidad de área generada o transmitida por los fluidos.²⁷

Simulación: Es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso real y conducir experimentos con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de límites impuestos por un criterio o conjunto de criterios) para la operación del sistema.²⁸

Talud: Superficie inclinada en una excavación o en una explanación. Fragmentos de roca y desuelo, de cualquier tamaño y forma (normalmente angulares y grueso granulares) derivados de y acumulados al pie de un escarpe o de una pendiente rocosa empinada sin intervención de agua en el proceso de transporte. También la acumulación de tales fragmentos de roca, considerados

²⁶ <http://www.ciclohidrologico.com/precipitacin>

²⁷ http://www.academia.edu/1329261/GEOTECNIA_DICCIONARIO_B%C3%81SICO

²⁸ <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060010/lecciones/Capitulo1/simulacion.htm>

como una unidad y formados principalmente por la caída, deslizamiento y rodadura de fragmentos de roca.

Textura: Característica del suelo definida por la proporción de arena, limo y arcilla que contenga. La textura se define por la fracción, o combinación de fracciones, de suelo predominante. La textura se califica como franca en caso de que las tres fracciones sean aproximadamente iguales.

Velocidad de infiltración: Es el tiempo que se demora el agua en atravesar un suelo.

8. BIBLIOGRAFÍA

(1987). Manual de Ingeniería de Taludes. En A. Caicedo, *Serie: Guías y Manuales N° 3* (pág. 456). Madrid: INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO DE ESPAÑA Ríos Rosas, 23 28003.

Cerdà, A. (2007). Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. *Science of The Total Environment*, 151–155.

Eder De la Peña. (2012). Uso de lodos de aguas residuales para la protección de taludes frente a la erosión. *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*, 62.

George Tchobanoglous, H. T. (1998). Gestión Integral de Residuos Sólidos. Aravaca (Madrid): MCGRAW-HILL INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.

(1998). En H. T. Gerege Tchobanoglous, *Gestión Integral de Residuos Sólidos (Volumen I)* (pág. 1087). Madrid: Mc-GRAW - HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A.

J. De Oña, F. O. (2008). Assessing the effects of using compost–sludge mixtures to reduce erosion in road embankments. *Journal of Hazardous Materials*, 1257 - 1265.

Mozos, Jesús Alvarez. (2007). Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. *Sciencedirect*, 10.

Noura Bakr, D. C. (2012). Evaluation of compost/mulch as highway embankment erosion control Evaluation of compost/mulch as highway embankment erosion control. *Journal of Hydrology*, 257 - 267.

P. Castaldo^a, M. D. (13 de June de 2014). *ScienceDirect*. Recuperado el 02 de Julio de 2014, de ScienceDirect: <http://bdatos.usantotomas.edu.co:2057/science/article/pii/S0267726114001092>

Pheeraphan, C. K. (7 de March de 1996). *science direct* . Recuperado el 21 de January de 1997, de science direct: www.sciencedirect.com

Suárez, J. D. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales . En *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (pág. 541). Bucaramanga - Colombia: Instituto de Investigaciones sobre la Erosión y Deslizamientos .

Yoau - Jun Liu, T. W.-F.-X.-B. (2014). Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Science of the Total Environment*, 93-102.

Youssef Ouni, A. A.-A. (2014). Influence of municipal solid waste (MSW) compost on hormonal status and biomass partitioning in two forage species growing under saline soil conditions. *Ecological Engineering*, 142–150.

http://eias.usalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/c_modulo_curva_infiltracion.pdf

ANEXO 1

LABORATORIO N°1: CLASIFICACIÓN DEL SUELO (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS) SUCS

LOCALIZACIÓN: Talud del Km 11 doble calzada Bogotá Briceño

MUESTRA: A

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (I.N.V.E 125-07)

El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.

- **Equipo y materiales:**
 - Recipiente de porcelana.
 - Espátula.
 - Cazuela de bronce.
 - Ranurador.
 - Balanza.
 - Horno.

- **Preparación de la muestra:** se toma una muestra que pese aproximadamente 100 g. de una porción de material completamente mezclado que pase por el tamiz N° 4.

- **Procedimiento:**

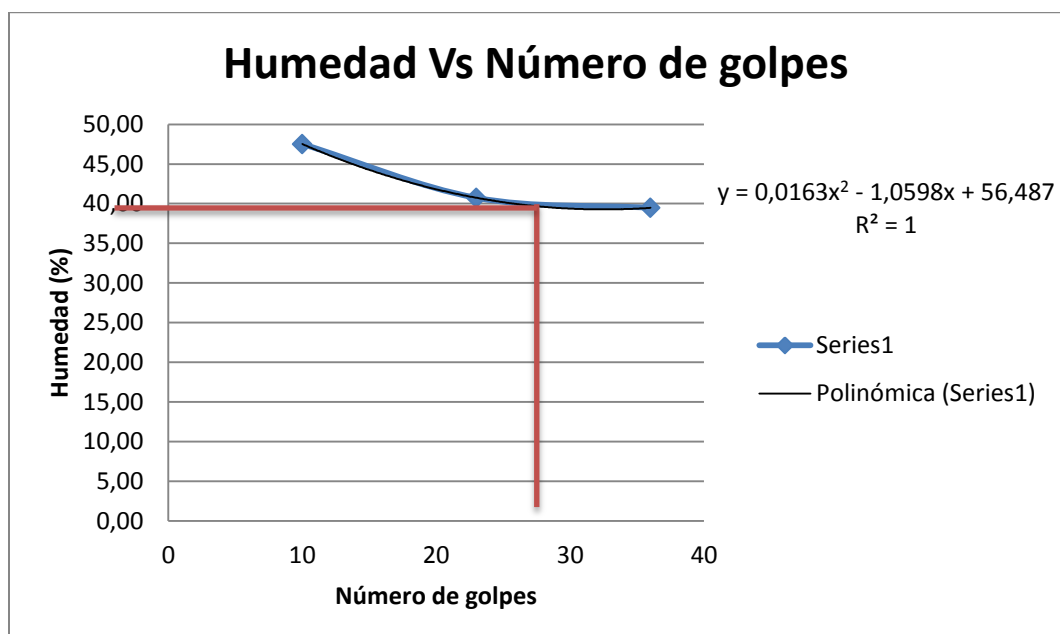
1. Se coloca la muestra de suelo en un recipiente y se mezcla con 15 a 20 ml de agua destilada, se realizan más adiciones de agua en incrementos de 1 a 3 ml. Se mezcla completamente cada incremento de agua con el suelo como se ha descrito previamente, antes de cualquier nueva adición.
2. Cuando se logra formar una pasta uniforme, se coloca una cantidad adecuada en la cazuela encima del punto donde esta descansa en la base y se comprime y extiende con la espátula para nivelarlas, el suelo excedente es devuelto al recipiente.
3. Se divide el suelo de cazuela con una firme pasada del ranurador, formando una línea limpia.
4. Se levanta y golpea la cazuela girando la manija a una velocidad constante, hasta que las dos mitades de la pasta de suelo se pongan en contacto en el fondo de la ranura. Se anota el número de golpes requeridos para cerrar la ranura.
5. Se toma una porción de suelo y se coloca en un recipiente adecuado. Se pesa y se anota el valor, se coloca el suelo con el recipiente en el horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante y se vuelve a pesar. Se anota esta masa, así como la pérdida de masa debida al secamiento y la masa de agua.
6. Se repite la operación anterior por lo menos en dos ensayos adicionales con el suelo restante, al cual se le agrega agua suficiente para ponerlo en un estado mayor fluido. El objeto

de este procedimiento es obtener muestras de tal consistencia que al menos una de las determinaciones del número de golpes requeridos para cerrar la ranura del suelo se halle en cada uno de los siguientes intervalos: 25-35; 20-30; 15-25, de manera que la oscilación entre las 3 determinaciones sea de, por lo menos, 10 golpes.

- **Datos obtenidos:**

Número de golpes	10	23	36
Número del recipiente	33	47	44
Peso recipiente, (gr)	12,4	12,1	12,8
Peso recipiente + suelo húmedo, (gr)	48,10	38,70	44,60
Peso recipiente + suelo seco, (gr)	36,60	31,00	35,60
Contenido de Humedad (%)	47,52	40,74	39,47

- **Cálculos:**



$$LL = W \left(\frac{N}{25} \right)^{Tan\beta}$$

Dónde: LI: Límite líquido
 W: Humedad
 N: Número de golpes
 Tan B: Valor constante

De acuerdo a lo anterior se tiene:

Número de golpes	23
Peso suelo húmedo	26,60
Peso suelo seco	18,90
Peso del agua	7,70
Humedad	0,40740741
Tan B	0,121

$$LL = 0,40740741 \left(\frac{23}{25} \right)^{0,121} = 0,4033177$$

$$LI = 40,33\%$$

LIMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELO (I.N.V.E 125-07)

El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la

masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.

- **Equipo y materiales:**

- Espátula.
- Recipiente de porcelana.
- Balanza.
- Horno.
- Tamiz.
- Agua destilada.
- Superficie lisa.

- **Preparación de la muestra:** se toma aproximadamente 20 g de la muestra que pase por el tamiz N° 4, se amasa con agua destilada hasta que pueda formarse con facilidad una esfera con la masa del suelo. Se toma una porción de unos 6 g. de dicha esfera como muestra para el ensayo.

- **Procedimiento:**

1. Se toma una porción de 1.5 a 2 g. de la masa de suelo y se forma una masa elipsoidal.
2. Se forman rollos de masa de suelo de 3 mm De diámetro, luego se divide en seis u ocho trozos, luego se forma una masa uniforme de forma elipsoidal y se enrolla de nuevo. Se repite este procedimiento hasta que el rollo de 3 mm de diámetro se desmorone bajo la presión requerida para el enrollamiento.

3. Se unen las porciones de suelo desmoronado y se colocan en un recipiente previamente pesado. Se tapa el recipiente inmediatamente.
4. Se repiten las operaciones descritas hasta que el espécimen de 8 g. quede completamente ensayado. Se determina el contenido de humedad del suelo en los recipientes y se anotan los resultados.

- **Datos obtenidos:**

Número recipiente	14	2
Peso recipiente, (gr)	12,7	12,0
Peso recipiente + suelo húmedo, (gr)	33,7	35,4
Peso recipiente + suelo seco, (gr)	29,3	30,6
Contenido de Humedad (%)	26,51	25,81

- **Cálculos:**

Promedio limite plástico

$$Lp = \frac{26,51 + 25,81}{2}$$

$$Lp = 25,66\%$$

Índice de plasticidad: Límite en donde el material se comporta como un material plástico.

$$Ip = Ll - Lp$$

Donde Ll: Límite líquido
 Lp: Límite plástico

$$Ip = 40,33\% - 25,66\%$$

$$Ip = 14,67\%$$

- **Análisis**

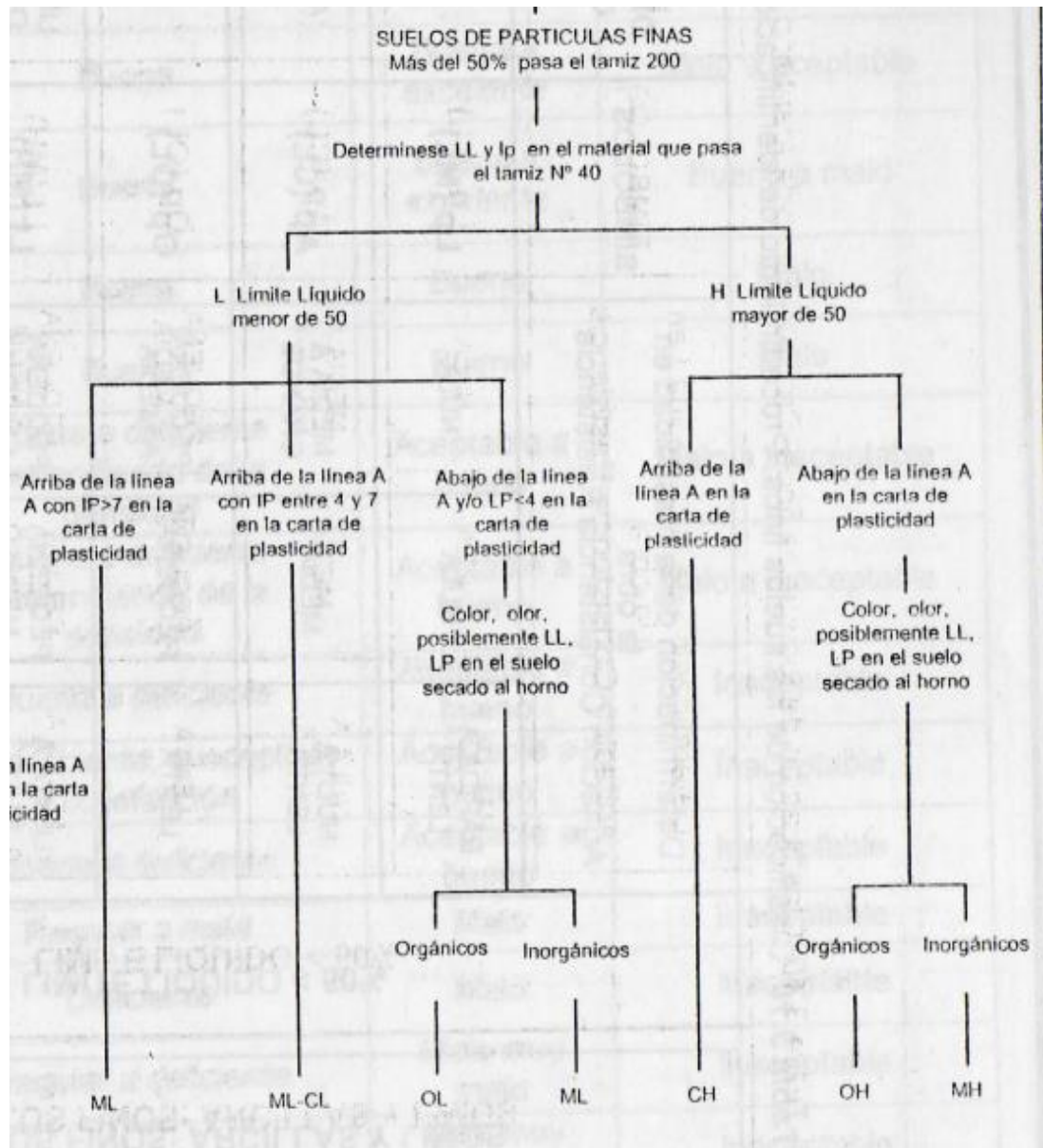
De acuerdo a lo anterior se tiene las siguientes condiciones para el tipo de suelo analizado mediante el sistema unificado de clasificación de suelos:

- Posee un valor de limite líquido menor a 50%

SUELO FINO-GRANULARES	ARCILLAS Y LIMAS	CON $L_L < 50\%$	ML	Limos orgánicos, arenas muy finas, polvo de roca. Arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad.
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
			OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
		CON $L_L > 50\%$	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos, finos micáceos o diatomáceos, limos elásticos.
			CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.
			OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta.

- El límite líquido es menor al 50%
- Arriba de la línea A con $IP > 7$ en la carta de plasticidad

Por lo tanto corresponde a un suelo tipo ML correspondiente a Limos orgánicos, arenas muy finas, polvo de roca. Arenas finas limosas o arcillosas con ligera plasticidad. Posee una estabilidad deficiente, aunque puede utilizarse en terraplenes con control apropiado. Su capacidad de soporte es muy deficiente y susceptible a licuefacción. En cuando al uso en fundaciones se encuentra en un rango de aceptable a bueno.



ANEXO 2

Laboratorio N°2: Ensayo de Crumb

MUESTAS: A y B simultáneamente

- **OBJETO DEL ENSAYO:** Reconocer el grado de dispersión del suelo, mediante una inspección visual. Estos grados se clasifican de la siguiente manera:
 - Grado 1: Ninguna reacción
 - Grado 2: Reacción ligera
 - Grado 3: Reacción moderada
 - Grado 4: Reacción fuerte

- **Herramientas**
 - Probeta
 - Agua destilada

- **Procedimiento:**
 - Colocar un trozo de suelo en el agua
 - Observar la dispersión del suelo al igual que el grado de nubosidad del agua
 - Anotar lo observado

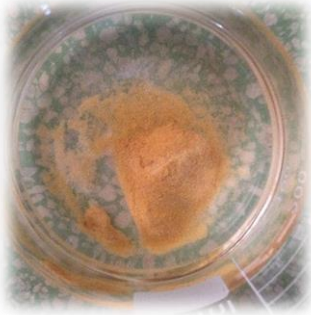
- **Datos obtenidos**

Tiempo	Características suelo A (limo)	Características suelo B (Arena)
1 min	Desprendimiento de partículas y moderada nubosidad del agua.	Dispersión de la muestra de suelo y gran nubosidad del agua.
2 min	Se desprenden algunas partículas de suelo y leve nubosidad del agua.	Dispersión de la muestra de suelo y moderada nubosidad del agua.
5 min	Se desprenden algunas partículas de suelo.	Desprendimiento de algunas partículas de suelo y moderada nubosidad del agua.
15 min	Dispersión de algunas partículas sueltas en agua, baja nubosidad del agua.	Dispersión de las partículas de suelo en el agua, se mantiene la nubosidad en el agua.
30 min	Desplazamiento de las partículas de suelo al fondo del recipiente, no hay nubosidad del agua.	Desplazamiento de las partículas de suelo al fondo del recipiente, nubosidad leve del agua.
24 horas	Las partículas de suelo que se han desprendido permanecen en el fondo del recipiente, no se observa nubosidad del agua.	Se observa la dispersión de algunas partículas de suelo en el agua, leve nubosidad del agua.
48 horas	Las partículas de suelo que se han desprendido permanecen en el fondo del recipiente, no se observa nubosidad del agua.	Las partículas de suelo que se han desprendido permanecen en el fondo del recipiente, no se observa nubosidad del agua.

- **Registro fotográfico:**

Fotografía	Observaciones
	Muestras de suelo para la realización de este ensayo poseen un volumen semejante, el peso para arcillas es de 10,1g para la arcilla y de 9,8 para la arena.
	Agua destilada
	Muestra de arena un minuto después de iniciar el ensayo

	Muestra de arcilla un minuto después de iniciar el ensayo
	Muestra de arena 15 minutos después de iniciar el ensayo
	Muestra de arcilla 15 minutos después de iniciar el ensayo

	Muestra de arena 24 horas después de iniciar el ensayo.
	Muestra de arcilla 24 horas después de iniciar el ensayo.
	Muestra de arena 48 horas después de iniciar el ensayo.

	Muestra de arcilla 48 horas después de iniciar el ensayo.
---	--

- **Análisis y conclusiones:**

De acuerdo a las observaciones realizadas de las muestras de suelo, es posible establecer el grado de dispersión de estas, en primer lugar se encuentra la muestra de arena, la cual presento un grado 3, el cual indica una reacción moderada debido a la pronta dispersión de sus partículas en poco tiempo y la constante nubosidad del agua; en segundo lugar se encuentra la muestra de arcilla, esta evidencio un grado de dispersión de 2, indicando una reacción ligera, esto debido al moderado desprendimiento de sus partículas y a la leve nubosidad del agua.

ANEXO 3

Laboratorio N°3: Método del cono de arena densidad masa unitaria del
suelo en el terreno
I.N.V.E. – 161 -07

PROCEDIMIENTO:

1. Se obtienen los pesos del cono, con la arena a utilizar, y de todos los recipientes.
2. Se localiza el cono en el lugar de prueba, es decir en campo.
3. Ubicación de la placa base en el suelo.
4. Delimitación del suelo con el cincel, a través de la placa, para obtener la muestra a trabajar.
5. Se remueve la muestra sin perder material.
6. Se abre la llave del cono para dar paso a la arena, posteriormente al llenado se procede a cerrarla.
7. El cono se retira del sitio para llevar a tomar su peso de nuevo.
8. Se repite el proceso de pesado al equipo con la arena que quedo en el depósito.
9. La muestra de suelo extraída fue pesada, horneada y nuevamente pesada.

EQUIPOS Y MATERIALES:

- Molde Próctor
- Equipo Primordial (compuesto de un frasco, un cono metálico y arena de
- Base metálica para el cono
- Balanza de aproximación de 1 gramo
- Balanza de aproximación de 0,1 gramos
- Capsula de Aluminio
- Brocha y un Cordel
- Estufa
- Un cincel y un martillo

DATOS ENCONTRADOS

- Muestra 1

DENSIDAD

Profundidad (cm)	10,9
$W_{\text{frasco}} + W_{\text{Cono}} + W_{\text{Arena I}} \text{ (g)}$	7400
$W_{\text{frasco}} + W_{\text{Cono}} + W_{\text{Arena F}} \text{ (g)}$	4235,9
Constante del cono	
Densidad Arena g/cm^3	1,5
$W_{\text{Material extraído}} \text{ (g)}$	3334,2

HUMEDAD

Número de la Cápsula	44
Peso Cápsula	191,2
Peso Cápsula + Suelo húmedo (g)	2547,5

Peso Cápsula + Suelo seco (g)	2024,1
-------------------------------	--------

- **Muestra 2**

DENSIDAD

Profundidad (cm)	10,1
$W_{\text{frasco}} + W_{\text{Cono}} + W_{\text{Arena I}} \text{ (g)}$	7400
$W_{\text{frasco}} + W_{\text{Cono}} + W_{\text{Arena F}} \text{ (g)}$	4742,3
Constante del cono	
Densidad Arena g/cm^3	1,5
$W_{\text{Material extraído}} \text{ (g)}$	3847,5

HUMEDAD

Número de la Cápsula	3
Peso Cápsula	185,7
Peso Cápsula + Suelo húmedo (g)	2580,3
Peso Cápsula + Suelo seco (g)	2032,5

CÁLCULOS REALIZADOS:

Muestra 1:

- Volumen del hueco:

$$V_{\text{hueco}} = \frac{\text{Masa de la arena en el hueco}}{\text{densidad de la arena}}$$

$$V_{\text{hueco}} = \frac{3334,2 \text{ gr}}{1,5 \text{ gr/cm}^3} = 2222,8 \text{ cm}^3$$

- Densidad húmeda del suelo

$$\rho = \frac{\text{Masa del suelo húmedo}}{\text{Volumen del hueco}}$$

$$\rho = \frac{2503,5 \text{ gr}}{2222,8 \text{ cm}} = 1,126 \text{ gr/cm}^3$$

Muestra 2:

- Volumen del hueco:

$$V_{\text{hueco}} = \frac{\text{Masa de la arena en el hueco}}{\text{densidad de la arena}}$$

$$V_{\text{hueco}} = \frac{3847,2 \text{ gr}}{1,5 \text{ gr/cm}^3} = 2564,8 \text{ cm}^3$$

- Densidad húmeda del suelo a

$$\rho = \frac{\text{Masa del suelo húmedo}}{\text{Volumen del hueco}}$$

$$\rho = \frac{2394,6 \text{ gr}}{2564 \text{ cm}^3} = 0,93 \text{ gr/cm}^3$$

- Promedio de densidades:

$$\rho_{\text{promedio}} = \frac{\rho_{\text{muestra 1}} + \rho_{\text{muestra 2}}}{2}$$

$$\rho_{promedio} = \frac{1,126gr/cm^3 + 0,93gr/cm^3}{2} = 1,028gr/cm^3$$

PESO ESPECÍFICO:

- **Muestra A:**

$$\rho = 0,93 \text{ gr/cm}^3$$

Por lo tanto:

$$0,93 = 0,00093Kg$$

$$1cm^3 = 0,000001m^3$$

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{m \cdot g}{V}$$

$$\gamma = \frac{0,00093Kg \times 9,81m/s}{0,000001m^3} = 9123,3 \frac{KN}{m^3}$$

- **Muestra B:**

$$\rho = 1,126 \text{ gr/cm}^3$$

Por lo tanto:

$$1,126gr = 0,001126Kg$$

$$1cm^3 = 0,000001m^3$$

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{m \cdot g}{V}$$

$$\gamma = \frac{0,001126Kg \times 9,81m/s}{0,000001m^3} = 11046,06 \frac{KN}{m^3}$$

ANEXO 4

Fotografías

Foto 1	Foto 2
	
Proceso de secado de muestras, para el ensayo de clasificación	Adecuación del material para la realización del ensayo de clasificación
Foto 3	Foto 4
	
Determinación del límite líquido	Capsulas de material generado para la clasificación
Foto 5	Foto 6
	
Adecuación de la plaza de base	Funcionamiento del cono de arena de arena

Foto 7	Foto 8
	
Recolección del material erosionado	Adecuación de los modelos físicos
Foto 10	Foto 10
	
Recolección de la arena de densidad 1,5 gr	Toma de peso ensayo cono de arena
Foto 11	Foto 12
	
Toma de datos de PH	Recolección del agua infiltrada