



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

**CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA HIDROSIEMBRA CON MULCH DE
REFINACIÓN TÉRMICA, PARA EL CONTROL DE EROSIÓN Y ARRASTRE
DE SEDIMENTOS EN TALUDES DE CORTE Y RELLENO DE PROYECTOS
DE INFRAESTRUCTURA**

Mario Alberto Fong García

Asesorado por el Ing. MSc. Juan Carlos Fuentes Montepeque

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA HIDROSIEMBRA CON MULCH DE
REFINACIÓN TÉRMICA, PARA EL CONTROL DE EROSIÓN Y ARRASTRE
DE SEDIMENTOS EN TALUDES DE CORTE Y RELLENO DE PROYECTOS
DE INFRAESTRUCTURA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y LA ESCUELA DE ESTUDIOS DE
POSTGRADOS
POR

MARIO ALBERTO FONG GARCÍA

ASESORADO POR EL ING. MSC. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López De López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López De López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA HIDROSIEMBRA CON MULCH DE REFINACIÓN TÉRMICA, PARA EL CONTROL DE EROSIÓN Y ARRASTRE DE SEDIMENTOS EN TALUDES DE CORTE Y RELLENO DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA

Tema que me fue aprobado por la Escuela de Estudios de Postgrados, con fecha 16 de abril de 2016.

Mario Alberto Fong García



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
EP
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

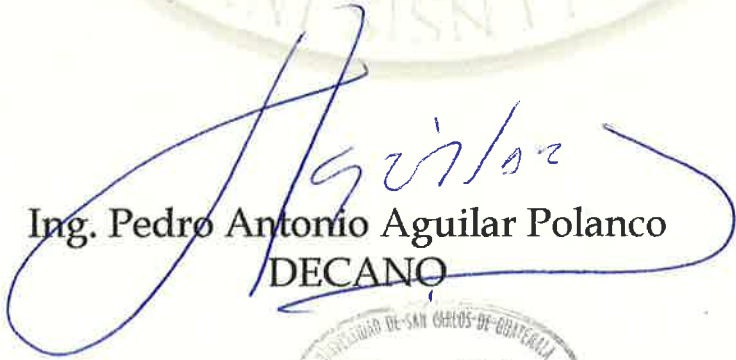
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226

Ref. APT-2016-075

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente titulado: **"CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA HIDROSIEMBRA CON MULCH DE REFINACIÓN TÉRMICA, PARA EL CONTROL DE EROSIÓN Y ARRASTRE DE SEDIMENTOS EN TALUDES DE CORTE Y RELLENO DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA"** presentado por el Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales y Renovables **Mario Alberto Fong García**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
DECANO



Guatemala, noviembre de 2016.

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
EP
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2016-075

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **"CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA HIDROSIEMBRA CON MULCH DE REFINACIÓN TÉRMICA, PARA EL CONTROL DE EROSIÓN Y ARRASTRE DE SEDIMENTOS EN TALUDES DE CORTE Y RELLENO DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA"** presentado por el Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales y Renovables **Mario Alberto Fong García**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

"Id y Enseñad a Todos"



MSc. Ing. *Murphy Olympo Paiz Recinos*
Director
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, noviembre de 2016

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
EP
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2016-075

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente y revisor del Trabajo de Graduación titulado **"CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LA HIDROSIEMBRA CON MULCH DE REFINACIÓN TÉRMICA, PARA EL CONTROL DE EROSIÓN Y ARRASTRE DE SEDIMENTOS EN TALUDES DE CORTE Y RELLENO DE PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA"** presentado por el Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales y Renovables **Mario Alberto Fong García**, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, noviembre de 2016

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. Programas de Maestrías: Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. Especializaciones: Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.

ACTO QUE DEDICO A:

Mi esposa Karla Mancilla y mi hijo André Benjamín, con mucho amor!

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Quien me ha dado todo lo que soy y lo que tengo, quien me ha acompañado en mis días difíciles, en mis alegrías y mis tristezas.
Mi esposa	Karla Mancilla, por su amor y paciencia.
Mi hijo	André Benjamín, quien vino a dar luz a nuestras vidas.
Mis padres	Mario Alberto Fong Véliz y Thelma Iliana García Flores de Fong, por ser un ejemplo a seguir.
Mis hermanos	Mario Roberto y Marlon Ricardo, por el apoyo.
Mi abuela	Ana Flores, quien siempre ha estado al pendiente de mí con sus oraciones.
Mi familia	Débora Morales, Ebilio Mancilla, Alejandra Mancilla y Fabio Troncony.
Mis compañeros	Ivan Salazar, Enrique García, Vinicio Herrera, Lee Hernandez, Ernesto López, con quienes logramos salir adelante juntos en esta etapa.

Mi asesor Ingeniero Juan Carlos Fuentes Montepeque quien aportó su valioso tiempo y conocimientos para asesora adecuadamente esta investigación.

USAC La Universidad de San Carlos de Guatemala en especial a la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería y a todos los maestros que impartieron sus conocimientos y experiencias que servirán para ejercer mi profesión.

GEOCON Empresa que facilitó los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación, en especial a la Ingeniera Andrea Meyer quien aportó a esta investigación con su experiencia y apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	V
GLOSARIO.....	VII
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Erosión.....	1
1.2. Suelos.....	2
1.3. Degradación de los suelos.....	3
1.4. Proceso erosivo.....	4
1.5. Agentes erosivos.....	5
1.6. Factores erosivos.....	7
1.6.1. Erosionabilidad.....	7
1.6.2. Características geométricas del terreno.....	10
1.6.3. Erosividad.....	11

1.6.4. Cubierta vegetal.....	12
1.6.5. Especies vegetales exóticas.....	14
1.7. Tipos de erosión	17
1.7.1. Erosión hídrica.....	17
1.7.2. Erosión por escurrimiento.....	21
1.8. Erosión eólica	22
1.9. Hidrosiembra.....	23
1.10. Erosión y estabilidad de un talud	24
2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
2.1. Sustrato de fibra de madera (mulch).....	27
2.2. Vegetación para el control de erosión.....	29
2.3. Tiempo para el control de erosión.....	32
CONCLUSIONES	35
RECOMENDACIONES	37
BIBLIOGRAFÍA	39
APÉNDICE.....	43

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Control de erosión por medio del sistema de hidrosiembra con mulch de refinación térmica y grama perenne2
2. Análisis de estabilidad de talud por medio del método Morgenstern-Price sin anclajes.26
3. Análisis de estabilidad de talud por método de Morgenstern-Price utilizando anclajes.....26
4. Desarrollo radicular de la planta en talud de relleno 1:1, con mulch de refinación térmica 29
5. Germinación de diversas especies aplicadas con hidrosiembra 31
6. Desarrollo vegetativo de las gramíneas incorporando leguminosas 32
7. Talud de corte relación 3:1, 75 días luego de aplicación de hidrosiembra 33
8. Talud de corte relación 1:1, 35 días luego de aplicación de hidrosiembra 34
9. Talud de corte relación 1:1, si cubierta vegetal con una significativa degradación del suelo. 34

TABLAS

I.	Valores guía, coeficiente de Manning	13
II.	Evaluación de la germinación de hidrosiembra aplicada con mulch de refinación térmica y atmosférica aplicada sobre distintos taludes.....	28
III.	Especies vegetales evaluadas para la hidrosiembra.....	30
IV.	Análisis de suelo para talud de corte y relleno	31

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
m	metros
m ²	metros cuadrados
mm	milímetros
km	kilómetros
ha.	hectárea
%	porcentaje

GLOSARIO

Cespitosas	Que crece en forma de la hierba del césped.
Coefficiente de Mannig	Aplicado a la oposición que ejerce el follaje sobre la velocidad del flujo superficial de agua en un talud por su rugosidad.
Emergencia Radicular	Acción o efecto de emerger de la raíz de la semilla en uno de sus estadíos iniciales.
Erosión en suelo	Degradación del suelo por agentes erosivos.
Estabilidad en suelo	La dirección de las fuerzas resultantes entre rebanadas se define mediante la función predeterminada y se puede variar la orientación, el porcentaje de la función utilizada se resuelva mediante equilibrio de fuerzas y momentos.
Factor de seguridad	Se define el factor de seguridad (FS), como el valor que cuantifica la diferencia entre las condiciones reales que presenta el talud, y las condiciones que llevan a su rotura.
Fibra de madera	Cada uno de los filamentos que entran en la composición de los tejidos orgánicos vegetales
Gramíneas	Dicho de una planta: Del grupo de las

angiospermas monocotiledóneas, con tallo cilíndrico, interrumpido de trecho en trecho por nudos llenos, hojas alternas que nacen de estos nudos y abrazan el tallo, flores muy sencillas, dispuestas en espigas o en panojas.

Hidrosiembra Sistema compuesto por mulch, semilla y fertilizante lanzado de forma hidráulica para vegetar áreas específicas.

Imbibición Es el movimiento de agua por capilaridad hacia el interior de las semillas en germinación que se hinchan como resultado de ello.

Leguminosa Dicho de una planta: Del grupo de las angiospermas dicotiledóneas, semillas sin albumen, y que puede ser hierba, mata, arbusto o árbol.

Morgenstern-Price (1965) Método para el cálculo de fallas que asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas.

Mulch Sustrato que sirve como medio de germinación y establecimiento de una semilla.

Perenne Continuo, incesante, que no tiene intermisión.

Refinación térmica Proceso de refinación que aplica calor para

de madera	separar las fibras de la madera.
Sedimentos	Materia que, habiendo estado suspensa en un líquido, se posa en el fondo por su mayor gravedad.
Suelo	Conjunto de materias orgánicas e inorgánicas de la superficie terrestre, capaz de sostener vida vegetal.
Talud	Inclinación del paramento de un muro o de un terreno.

RESUMEN

La caracterización técnica de la hidrosiembra como una metodología para el control de erosión y arrastre de sedimentos en proyectos de infraestructura, permite conocer todos los aspectos técnicos que cubre a la hidrosiembra como técnica; esto como una herramienta altamente eficaz para la protección y conservación de suelos, sobre todo, aquellos que sufren de una degradación, debido al cambio de uso que se les da; en este caso particular, por una obra de infraestructura civil, disminuyendo con esto la exposición a riesgo de la obra misma.

La hidrosiembra es una técnica aplicada a nivel mundial, que inició en los Estados Unidos de América hace más de 50 años, donde se utilizaba material vegetal seco para proteger la semilla de granos básicos que se sembraba en esos tiempos; luego fue evolucionando con la incorporación de sustratos de fibra de celulosa, madera y mixtos, refinandolos atmosféricamente, hasta llegar recientemente a utilizar la refinación térmica de las fibras de madera que hoy en día se usan para permitir vegetar taludes con pendientes mayores a los 60° de inclinación con respecto a la horizontal.

La utilización de fibras de madera tienen una alta capacidad de retención de humedad, condición necesaria para que una semilla pueda germinar en un medio con poca disponibilidad de agua que es un talud con inclinación variable, según pruebas realizadas por el Texas Transportation Institute en octubre del 2006, la utilización de un mulch de fibra de madera tiene una efectividad del 99.74% en cuanto al control de arrastre de sedimentos en un suelo con una gradiente de 2:1, utilizando un suelo arenoso con una simulación de lluvia de 88 mm/hora. Esta propiedad permite a la semilla desarrollar adecuadamente su proceso de imbibición.

La refinación térmica del sustrato de fibra de madera permite tener fibras más delgadas, las cuales representan una mayor retención de humedad, asegurando así el éxito en el proceso de germinación; además, retiene durante más tiempo los nutrientes aplicados durante el inicio del proceso facilitando la disponibilidad de elementos esenciales a las plantas en su etapa inicial, posterior al establecimiento de la vegetación, dichas fibras se incorporan al suelo como una fuente esencial de materia orgánica.

Existen en el mercado diferentes soluciones para el control de la erosión, siendo los mantos anti-erosión los más abundantes, luego de la hidrosiembra; esta investigación pretende demostrar las características técnicas que hacen de la hidrosiembra la técnica más adecuada para controlar erosión y arrastre de sedimentos, ya que este permite un proceso de sucesión ecológica con el uso principalmente de gramíneas y otras especies endémicas de la región a los suelos que han sufrido un proceso de contaminación y degradación, demostrándolo con bio-indicadores tales como: aves, insectos, ranas y otros seres vivos que interactúan con un medio vegetado.

La vegetación sobre un suelo desnudo actúa como un amortiguador del impacto de la gota de lluvia, disminuye la velocidad del flujo superficial de agua sobre el suelo y su sistema radicular (fibroso en el caso del uso de gramíneas) permite mantener un balance hídrico entre el suelo y el entorno por causa de la evapotranspiración, así como un amarre de la parte superficial del suelo que corresponde de entre 0.30 a 1.00 metros de profundidad.

Durante el desarrollo de la fase experimental en campo, se logró determinar que un sustrato tipo mulch de fibra de madera refinada térmicamente, tiene la capacidad de retener humedad de hasta 13 veces su peso en agua, lo cual lo hizo apropiado para implementarse en los taludes de corte y relleno durante la fase experimental, al retener esta cantidad de agua, es posible que el proceso de imbibición (absorción de agua) en la semilla de lugar a la emergencia

radicular en un corto tiempo (4-6 días), así también se determinó que las plantas más tolerantes a condiciones adversas como deficiencias nutricionales en el suelo, bajo mantenimiento, poca disponibilidad de agua durante su desarrollo, son las gramíneas mezcladas con algunas leguminosas que de cierta manera pueden mantener, a través de su sistema radicular nitrógeno fijado en el sistema radicular de la hidrosiembra.

Sobre el tiempo que toma al sistema controlar la erosión y arrastre de sedimentos, se puede decir que los factores ambientales como el tipo de suelo, radiación solar, precipitación pluvial y temperatura principalmente, pueden influir para acelerar o disminuir el tiempo de adaptación de las plantas, pero se tiene un dato de 75 días para taludes de corte (suelo altamente compactado) y 35 días para taludes de relleno (suelo menos compactado con mayor aireación).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a las condiciones climáticas, la topografía y al tipo de suelos de los distintos proyectos de infraestructura que se llevan a cabo en Guatemala, los taludes que resultan de la apertura de brechas, resultan tener pendientes mayores a los 60° con respecto a la horizontal, motivo por el cual, tienden a sufrir del proceso natural de desgaste ocasionado principalmente por el agua, también conocido como erosión hídrica, así como el causado por el viento o erosión eólica.

En Guatemala, actualmente se están llevando a cabo varios proyectos de infraestructura, en donde las implicaciones ambientales que resultan de dicho proceso erosivo son altas, las medidas de mitigación tomadas por muchas constructoras son de nivel básico a nulo y no son suficientes para mantener los sedimentos dentro del área de influencia directa del proyecto, esto dicho en otras palabras, el área de influencia de un proyecto resulta ser más amplia que la descrita en un estudio de impacto ambiental.

A pesar que el libro azul, por medio del cual se rigen las constructoras, contemplan en tema de control de erosión de suelos, muchas veces no cumplen o carecen de medidas mínimas para mitigar los impactos ambientales generados por el cambio de uso de la tierra, por tal motivo, es necesario establecer y aplicar medidas preventivas que disminuyan dicho problema que inicialmente solo representa pérdida de suelo, pudiendo con el tiempo llegar a provocar un problema mayor como lo es un alud que termine afectando vidas humanas.

Para este motivo existen varias alternativas para el control de erosión de suelos, de las cuales, la hidrosiembra que es la técnica, por medio de la cual se vegeta un talud representa una alternativa económica y accesible en cualquier

proyecto de infraestructura, debido a que la mejor forma de controlar la erosión, es estableciendo vegetación; aún no se ha logrado establecer cuáles deben ser las condiciones adecuadas para el establecimiento de la hidrosiembra, esto considerando cuál es la vegetación ideal, qué tipo de refinación deben llevar las fibras de madera del mulch, cuánta agua y cómo debe regarse la semilla para que germine.

En el presente trabajo se da a conocer qué características técnicas fortalecen el uso de la hidrosiembra como metodología para el control definitivo de la erosión y por consecuencia, el arrastre de sedimentos, para lograr responder a la pregunta principal de la investigación: ¿Cómo funciona la hidrosiembra con mulch de refinación térmica para el control de erosión y arrastre de sedimentos en taludes de corte y relleno aplicado en proyectos de infraestructura?

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuáles son los factores que inciden en la hidrosiembra para establecer vegetación sobre un talud con una inclinación mayor a 60°?
- ¿Qué tipo de vegetación es necesaria para la hidrosiembra en taludes de corte y relleno?
- ¿En cuánto tiempo la hidrosiembra como sistema controla la erosión y el arrastre de sedimentos en taludes de corte y relleno?

OBJETIVOS

General

Caracterizar técnicamente la hidrosiembra con mulch, para el control de erosión y arrastre de sedimentos en taludes de corte y relleno de proyectos de infraestructura.

Específicos

- Identificar las características necesarias para que un sustrato de fibra de madera provea un medio de germinación adecuado para la semilla.
- Determinar el tipo de vegetación que sea altamente tolerante a las deficiencias nutricionales que presentan los taludes.
- Estimar el tiempo necesario para que la vegetación cumpla con su función de protección contra la erosión.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

La identificación de las características necesarias para que un sustrato de fibra de madera provea un medio de germinación adecuado para la semilla, se evaluó con base a dos productos distintos en el mercado, dichos sustratos son a base de fibras de madera; el primero, está compuesto con fibras de madera refinadas con presión atmosférica, el segundo, con calor, se evaluaron los dos tipos de mulch en dos tipos de taludes; el primero con pendiente menor a los 60° respecto a la horizontal, que son los taludes resultantes de un relleno controlado, el segundo talud, con una inclinación mayor a los 60° respecto a la horizontal, que son los taludes resultantes de una estabilización del mismo talud por corte.

La determinación del tipo de vegetación se llevó a cabo con base al uso de gramíneas, agrónomicamente se conoce a este tipo de vegetación como especies pioneras, invasoras y agresivas, altamente tolerantes a condiciones desfavorables para otro tipo de vegetación. La germinación con el uso del mulch de refinación térmica fue muy rápida (5 a 8 días) y su adaptación al medio (suelo) fue buena aunque en algunos casos mostro deficiencias nutricionales que fueron enmendadas con aplicación de fertilizantes foliares.

Para la evaluación del tiempo que tomaba a la vegetación controlar la erosión , se tomó como parámetro el establecimiento de la misma en un 100% del área aplicada a unos 40-50cm. de altura, con la cual la vegetación es capaz de amortiguar el impacto de la gota de lluvia, disminuir la velocidad del flujo superficial del agua y afirmar los primero 10-30 cm. del área aplicada.

Para diferenciar lo que es la erosión y estabilidad en suelos, se pidió ayuda al departamento de geotecnia de la empresa GEOCON, quienes llevaron a cabo un análisis de suelos con base a propiedades físicas y mecánicas para determinar el factor de seguridad de un talud, al llevar a cabo el análisis el talud a través de una simulación de fallas determinó que no era estable pues tenía un factor de seguridad menor a 1, para incrementar el factor de seguridad era necesario introducir anclajes mayores a 4 metros de profundidad y esto se comparó con la altura de la raíz de las gramíneas utilizadas la cual era menor a un metro.

INTRODUCCIÓN

La erosión de suelos es un proceso natural de desgaste que ocurre por acción del agua o del viento, degradando los suelos y sedimentando los ríos, todo a causa del cambio de uso de la tierra y principalmente por la deforestación, por tal motivo, es importante considerar todas aquellas técnicas que permitan conservar los suelos, evitando o reduciendo en gran medida su degradación, a través del proceso erosivo; re-vegetar los suelos intervenidos es una de las opciones más apropiadas para el medioambiente, ya que disminuye en un alto porcentaje el proceso erosivo a través del denso follaje que pueda proporcionar la vegetación disminuyendo el impacto de la gota de lluvia sobre el suelo, su sistema radicular proporciona amarre y firmeza en los primeros centímetros del suelo a la vez que facilita la filtración del agua (reduciendo el caudal superficial) y disminuye en gran medida el impacto visual que se genera al dejar un perfil de suelo sin cobertura o con lanzado de concreto.

Desde hace varios años ha existido una técnica innovadora para la aplicación de vegetación en áreas de difícil acceso como lo son los taludes de corte y relleno, dicha técnica se le conoce como hidrosiembra, que consiste en aplicar semillas de especies vegetales a un área específica con un sustrato de fibra de madera conocido como Mulch, el cual permite a la semilla tener las condiciones básicas para que esta germine, existen varios tipos de Mulch, usar el adecuado en taludes con pendientes mayores a los 30° con respecto a la horizontal garantizará el adecuada establecimiento de la vegetación, motivo por el cual la presente investigación hace énfasis en el uso de un Mulch de refinación térmica para que con sus propiedades físicas se logre el establecimiento de vegetación en un talud cuya pendiente sea mayor a los 30° con respecto a la horizontal.

Aplicado a proyectos de infraestructura vial, el Libro Azul de la Dirección General de Caminos, define el control de erosión como las disposiciones para el control temporal o permanente de la erosión que deben ser planificadas de una manera efectiva, económica y continua, durante todo el periodo de construcción para evitar el daño de la superficie de los taludes. En proyectos de infraestructura, es común ver como los suelos se degradan con el inicio de la época lluviosa perdiendo altas concentraciones de suelos y depositándose en cuerpos de agua, por otra parte, en época seca, los vientos arrastran sedimentos de suelo sin cobertura vegetal alrededor de proyectos contaminando el aire, provocando daños a la salud de los habitantes en regiones cercanas.

El presente trabajo de investigación pertenece a la línea de investigación “complementaria”, en la parte de caracterización y contaminación de suelos, así como la línea de “diseño” en estimación de procesos de erosión y sedimentación, este pretende hacer uso de tecnología aplicada a nivel mundial para la vegetación de taludes de corte y relleno, caracterizando técnicamente sus propiedades con el fin de controlar la erosión y arrastre de sedimentos, y como un valor agregado, mejorar el paisaje de todos los proyectos de infraestructura del país, en donde por muchos años, y a pesar del cambio de uso que se da en la tierra, no se ha protegido con ninguna cubierta vegetal.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Erosión

La erosión es un proceso natural, donde rocas y suelos son degradados por fuerzas erosivas tales como el agua y el viento. Es un proceso lento que puede llevar miles de millones de años, debido a la interacción humana se ha visto acelerado, convirtiéndose en un problema para la humanidad, debido a la disminución de áreas de cultivo y productividad, así como al aumento de zonas de riesgo para la construcción (Tarbuck y Lutgens, 2001).

En áreas donde se han realizado proyectos de construcción la erosión es un problema común, debido al movimiento de tierras realizado, tanto para rellenos como para cortes de material, dejando al suelo sin cobertura vegetal provocando una erosión acelerada que puede provocar problemas de estabilidad en taludes (Tarbuck y Lutgens, 2001).

Si toma en cuenta que la velocidad actual de erosión del suelo se ha convertido significativamente mayor que la de su formación, se puede decir que el ser humano ha convertido un recurso renovable en no renovable (Tarbuck y Lutgens, 2001).

Figura 1. **Control de erosión por medio del sistema de hidrosiembra con mulch de refinación térmica y grama perenne.**



Fuente: elaboración propia.

1.2. Suelos

Los suelos son un conjunto de minerales, materia orgánica, así como agua y aire que ocupan los espacios que se encuentran vacíos entre las partículas. Los suelos se forman de la meteorización de los macizos rocosos; es un proceso lento que actúa de la superficie hacia adentro, lo que provoca que conforme aumenta la profundidad las características del suelo como: su textura, composición, estructura, entre otros. se vayan modificando y que vienen determinado por el clima, la pendiente, vegetación y roca fuente o madre (Tarbuck y Lutgens, 2001).

Los suelos conformados pueden ser, de acuerdo con Tarbuck y Lutgens (2001):

- Pedalfero: Conformado sobre todo de partículas de arcilla con aluminio y óxidos de hierro.
- Pedocal: Son suelos ricos en calcita o carbonato de calcio, son propios de áreas secas y contienen pocos contenidos de arcillas.

- Laterita: tiene altos contenidos de aluminio y hierro, pero poco humus, debido a la alta cantidad de bacterias que actúan en los suelos tropicales y húmedos, de donde estos son característicos.

Las características de un suelo son su tamaño y distribución, gravedad específica, contenido de agua, cohesividad, peso unitario y fricción interna.

1.3. Degradación de los suelos

La degradación ambiental: es un proceso inducido por el comportamiento de las actividades humanas, que daña o altera los recursos naturales y los ecosistemas. Los efectos potenciales son variables y pueden contribuir a incrementar la vulnerabilidad, frecuencia e intensidad de los peligros naturales. La degradación de los suelos, la deforestación, los incendios forestales, la desertificación, la pérdida de la biodiversidad, la contaminación del suelo, aire y agua, el cambio climático, el incremento en el nivel del mar y la reducción de la capa de ozono, son ejemplos de la degradación ambiental (Rivera et al 2005).

La degradación del suelo: es todo aquel proceso que produce disminución parcial o total de su capacidad productiva o salud; afectando sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Rivera *et al* 2005). Existen diferentes factores que causan la degradación del suelo, todos ellos están interrelacionados, lo que dificulta su estudio, como por ejemplo: la erosión causada por el agua o el viento (Rafaelli *et al* 2010).

Según la naturaleza de los procesos, se consideran tres tipos de degradación del suelo:

- Degradación física: que incluye la erosión hídrica y eólica, y el deterioro de la estructura con fenómenos como el sellado, encostrado y la formación de pisos de arado.
- Degradación química: se incluye la pérdida de nutrientes o de fertilidad, acidificación y alcalinización, salinización y contaminación por uso indiscriminado de herbicidas, plaguicidas y fertilizantes.
- Degradación biológica: aquí se considera la pérdida de materia orgánica y la alteración de la flora y fauna del suelo (microflora, lombrices, entre otros.) (Rafaelli, López y Almorox, 2010).

1.4. Proceso erosivo

La erosión consiste en: desprendimiento de partículas de suelo, transporte de las partículas por medio de las fuerzas erosivas y sedimentación de las partículas de suelo desprendidas (Morgan, 1997).

En la mayoría de casos, el proceso comienza cuando el suelo pierde su cubierta vegetal original dejando expuesto el suelo factores erosivos que lo degradarán y separarán sus partículas, aunque el proceso de erosión puede comenzar aún cuando el suelo se encuentre protegido solo que a menor ritmo. Las partículas de suelo son trasladadas a otros sitios y finalmente serán depositadas, muchas veces en cuerpos de agua donde se sedimentarán disminuyendo la capacidad de los mismos y contaminándolos (Morgan, 1997).

En los proyectos de infraestructura desarrollados por el hombre el proceso de erosión se ve acelerado por factores externos proporcionados por el mal uso de los suelos y la pérdida desmedida de la cobertura vegetal, debido a que en la mayoría de los casos no se incluyen planes de mitigación para controlar la erosión de los taludes (Morgan, 1997).

La velocidad del proceso erosivo varía en cada lugar, pero depende tanto de las características del suelo como de los factores erosivos presentes tales como el clima, la pendiente del terreno, el agua y viento y la cubierta vegetal. La severidad de la erosión se ve determinada por la cantidad de partículas de suelo desprendidas y la capacidad de los agentes erosivos para transportarlos (Morgan, 1997).

1.5. Agentes erosivos

Los principales factores que contribuyen para que se presenten los procesos erosivos en los suelos son:

- El agua de lluvia y sus características hidrodinámicas asociadas: como el tamaño de la gota de lluvia y la velocidad de caída terminal, al impactar en el suelo, especialmente aquel que carece de cobertura vegetal, según Hudson (1982), citado por Núñez (2001). También influyen las características de intensidad, o cantidad de milímetros de lluvia caída por unidad de tiempo: el tiempo que dura el evento pluvial desde que se inicia hasta que concluye, y la frecuencia o regularidad con la que se presenta un evento pluvial en una región particular, o número de veces que se repite una tormenta con características similares en intensidad y duración durante un largo período de registro: 10, 20, 50 o más años (Núñez, 2001).
- La pendiente de los terrenos medida en porcentaje: equivale a la tangente del ángulo de la pendiente. Estas medidas permiten calificarlos en terrenos planos, ligeramente ondulados, moderadamente ondulados, ondulados, etc. En la medida en que se incrementa el ángulo de la pendiente, así como su longitud y su conformación fisiográfica

(pendientes simples y complejas), se incrementa la susceptibilidad de las partículas finas del suelo de ser arrastradas por el agua de lluvia, en forma laminar (Núñez, 2001).

- La ausencia de vegetación en los terrenos (cobertura vegetal): favorece el impacto directo de las gotas de lluvia en los suelos, acelerando los procesos erosivos por salpique de agua de lluvia y por escorrentía laminar (Núñez, 2001).
- La condición textural del suelo y su desarrollo estructural: los suelos en los que predomina gran cantidad de partículas finas como limos y arcillas, calificados sobre su base porcentual como franco arcillo limosos, franco arcillosos y franco limosos, son más susceptibles a la erosión hídrica por el impacto de gotas de lluvia que los suelos de texturas gruesas como los arenoso francos o los franco arenosos. A su vez, el desarrollo estructural del suelo ayuda a evitar los procesos erosivos. Si un suelo tiene un buen desarrollo estructural, tiene espacios porosos y grietas que favorecen la penetración del agua de lluvia o del agua de riego por aspersión, en forma vertical descendente (infiltración), y se evita parcialmente el arrastre de las partículas del suelo por erosión laminar hídrica. Pero la compactación de suelos y el deterioro estructural asociado, contribuyen a que se presenten los procesos erosivos (Núñez, 2001).
- El uso de la tierra: algunos cultivos hortícolas favorecen los procesos erosivos. Por ejemplo, las parcelas donde se siembra cebolla requieren que se elimine la cobertura vegetal, para un mejor control fitosanitario de los cultivos. Este sistema de uso de la tierra deja la parte superior del suelo desprovista de la protección que brinda la cobertura vegetal. La

capa superior del suelo se convierte en sujeto pasivo de los procesos ligados a los parámetros de agresividad de las lluvias, que causan erosión (Núñez 2001).

1.6. Factores erosivos

Según Suarez (1982), al estar los suelos expuestos y haber perdido su cobertura vegetal los suelos se encuentran más propensos a ser fácilmente desprendidos por los factores erosivos, que determinan el impacto de la erosión, y transportados.

Entre los factores que determinan la tasa de erosión se encuentran:

- La erosionabilidad del suelo.
- La agresividad de los agentes erosivos.
- Las características geométricas del terreno.
- La cobertura vegetal.

1.6.1. Erosionabilidad

La erosionabilidad es la resistencia del suelo a los procesos de desprendimiento y transporte, que aunque depende en parte de su posición topográfica, pendiente y grado de inclinación, las propiedades de los suelos son las determinantes más importantes. Esto se debe a que las fuerzas de tracción y arrastre ejercidas por el agente erosivo sobre el suelo son resistidas por las fuerzas de inercia y de cohesión entre partículas (Suárez, 1982).

Es por ello que las características de los suelos que determinan su erosionabilidad son:

- Granulometría: contenidos de arenas, arcillas y limos. Tamaño de partículas de suelo.

- Estructura: cohesión de las partículas del suelo, entre menor sea la cohesión mayor la erosión.
- Permeabilidad del suelo: entre mayor permeabilidad tenga el suelo su capacidad de infiltrar agua disminuye el daño que causa la escorrentía.
- Composición química del suelo: determinará la estabilidad de los agregados.

Comúnmente se cree que entre más fino sea un suelo es menos susceptible a ser erodado, pero en realidad el tamaño de las partículas no define la erosión de esta manera. Más bien la define porque los suelos más finos resultan más cohesivos requiriéndose mayor energía para romper la adherencia o enlace de las partículas, y los suelos de mayores tamaños requieren de mayor fuerza para ser erosionados, debido a su peso. Es por ello que los suelos con gravas son menos susceptibles a la erosión por transporte, pero las arcillas (cuyo diámetro es menor a 0.002mm) son menos susceptibles a la erosión por desprendimiento debido a la fuerte atracción entre sus partículas (Suárez, 1982).

De ello resulta que los suelos conformados por partículas más pequeñas con las que no se requería mucha energía para ser desprendidas que tienen menor cohesión son los más susceptibles a la erosión. Los suelos formados por partículas entre 0.063mm y 0.250mm son los que requieren menor cantidad de energía por kilogramo de material para ser desprendidos, rango dentro del cual se clasifican los limos. Es por ello que los suelos con altos contenidos de limos son muy erosionables, esto es apoyado por los estudios realizados por Richter y Negendank (1997), en los que se demostró que los suelos con un contenido entre 40-60% de limos son los más erosionables. Seguido de los cuales vienen los suelos con altos contenidos de arenas finas, con diámetros entre 0.1 y 0.05, que tienden a comportarse como los limos (Suárez, 1982).

La erosionabilidad de un suelo por su contenido en arcillas, que tan cohesivo es, afirmando que los suelos con contenidos de arcilla menores entre 9-30% son los más susceptibles a ser erosionados (Richter y Negendank, 1997).

La permeabilidad de los suelos viene determinada por varias características del suelo, pero una de las principales es el tamaño de las partículas que lo conforman, ya que estos determinan el tamaño de sus poros, y mientras mayores sean estos poros mayor será su capacidad de infiltración, es decir su capacidad de absorber agua.

De acuerdo con Morgan (1997), los suelos con arcillas expansivas tienden a permitir bajas capacidades de infiltración con velocidades de infiltración menores a 5mm/h, mientras que los suelos de partículas mayores como los arenosos tienen capacidades de infiltración mayores debidos al mayor tamaño de sus poros llegando a tener velocidades de infiltración de 200mm/h. Esta velocidad de infiltración puede variar por la estructura del suelo, su grado de compactación, el perfil, su contenido de humedad inicial y la cobertura vegetal (Richter y Negendank, 1997).

También es importante tomar en cuenta que aunque los suelos porosos tienen una mayor capacidad de infiltración, son más susceptibles a la escorrentía superficial, mientras que los menos porosos como las arcillas son menos susceptibles, debido la cohesión que existe entre sus partículas, que por lo mismo dejan escapar más difícilmente el agua que las ha penetrado (Richter y Negendank, 1997).

La composición química del suelo influencia en gran medida la estabilidad de las partículas que conforman un suelo. Los suelos que poseen el

2 % de carbono orgánico o 12 % o 3.5 % de materia orgánica, son erosionables. Algunos estudios realizados por Voroney, Van Veen y Paul determinaron se disminuye la erosionabilidad de un suelo al aumentar sus contenidos en materia orgánicas 0-10 %, pero es importante el origen debido a que la materia orgánica proveniente de desechos animales y restos vegetales sí contribuyen a la estabilidad de las partículas mientras que la proveniente de turba y materia no descompuesta sólo protegen la superficie del suelo, pero no proveen de estabilidad a las partículas del suelo (Richter y Negendank, 1997).

1.6.2. Características geométricas del terreno

Las características geométricas del suelo son importantes en el proceso erosivo, pero sobre todo la pendiente del terreno y su longitud. Esto se debe a que a mayor longitud existirá una mayor área a través de la cual las gotas de lluvia producirán mayor impacto sobre la superficie del suelo, provocando mayor erosión. Mientras que la pendiente del terreno provocará menor erosión por el impacto de las gotas de lluvia, pero será mayor por escorrentía debido al aumento de velocidad con la que fluirá el agua al incrementarse la pendiente (Morgan, 1997).

De acuerdo con Morgan (1997), esta relación entre erosión y pendiente se expresa por:

$$E \propto \text{tgm } \theta \text{ L}^n$$

Donde E es la pérdida del suelo por unidad de superficie, θ ángulo pendiente y L longitud de la pendiente. Zingg demostró en 1940 que esta ecuación podría presentar la siguiente forma en la mayoría de los casos:

$$E \propto \text{tg}^{1.4} \theta \text{ L}^{0.6}$$

Aún así existen ocasiones donde estos valores pueden variar debido a la granulometría del suelo, donde el valor de m puede aumentar hasta 1.7, y

disminuir al reducirse la inclinación. Esto se debe a que la erosión puede aumentar al pasar la pendiente de suave a moderada hasta un valor de 8°-10° y disminuir aunque aumente la pendiente, (Morgan, 1997).

1.6.3. Erosividad

La erosividad se refiere a la agresividad de los agentes erosivos. Estos agentes son principalmente el agua y el viento, ambos producen en mayor o menor forma la pérdida de suelo, debido tanto al impacto de las gotas de lluvia en la superficie de suelo y por escorrentía como por corrientes de aire. En nuestro país, así como en Centroamérica la erosión hídrica es la más significativa, por lo que sólo se hará referencia a la misma (Morgan, 1997).

Se ha comprobado que la erosión debido a la lluvia está relacionada tanto con lluvias intensas de cortos períodos de tiempo como con lluvias poco intensas, pero que duran largos períodos de tiempo que saturan los suelos. Además, las condiciones previas del suelo de saturación afectan la erosión que puede presentar el suelo ante una nueva tormenta, tanto para aumentarla como para disminuirla, dependiendo de las condiciones del suelo y los tipos de tormenta (Morgan, 1997).

La intensidad de la erosión pluvial se puede medir por un índice basado en la energía cinética involucrada en la precipitación, estando relacionada con su duración, intensidad, cantidad y diámetro y velocidad de las gotas de lluvia. De acuerdo con Hudson (1982), las gotas de lluvia aumentan de diámetro hasta 100mm/h, a partir del cual la relación se pierde y comienzan a disminuir de diámetro por la turbulencia, pero pueden aumentar de nuevo después de los 20mm/h al reunirse las gotas de menor tamaño (Morgan, 1997).

1.6.4. Cubierta vegetal

La vegetación que se encuentra sobre la superficie del suelo puede actuar como una cubierta protectora que disminuye la erosión que pueden producir los agentes erosivos sobre el suelo, esto se debe a que la vegetación puede amortiguar el impacto de las gotas de lluvia gracias a sus troncos, ramas y hojas, así como el del viento y el flujo de agua, y las raíces incrementar la resistencia mecánica de los suelos. Esto fue comprobado por Hudson y por Elwell (1982), los cuales mostraron que existe un descenso exponencial en la pérdida del suelo cuando se aumenta el porcentaje de cubierta vegetal del suelo.

La forma en la que la cubierta vegetal puede disminuir la erosión se debe a que disipa la energía del agua que fluye sobre la superficie del suelo al crear oposición al flujo disminuyendo su velocidad. Esta oposición, es expresada como rugosidad expresada como un coeficiente de Manning.

Esta rugosidad vegetal dependerá de su densidad y morfología, Morgan (1997), y serán las vegetaciones más densas y uniformes las que presentarán un mayor efecto reductor.

Tabla I. Valores guía, coeficiente de Manning

Uso del suelo o cobertura	Valores de Manning
Suelo desnudo	
profundidad de la rugosidad < 25 mm	0.01-0.03
profundidad de la rugosidad 25-50 mm	0.014-0.033
profundidad de la rugosidad 50-100 mm	0.023-0.038
profundidad de la rugosidad >100 mm	0.045-0.049
Hierba de Bermuda, espaciada buena cobertura	
profundidad de la rugosidad < 25 mm	0.015-0.04
muy corta <50 mm	0.03-0.06
corta 50-100 mm	0.03-0.085
media 150-200 mm	0.04-0.150
larga 200-600 mm	0.060-0.200
muy larga 200-600 mm	0.300-0.480
Hierba de Bermuda, con cobertura densa	0.390-0.630
Otras formaciones herbáceas densas	0.15
Pastos naturales	0.100-0.320
Pastos segados	0.020-0.240
Mulch de paja de trigo	
2.5 t/ha	0.050-0.060
5.0 t/ha	0.075-0.150
7.5 t/ha	0.100-0.200
10.0 t/ha	0.130-0.250
Trigo	0.100-0.300
Hormígo o asfalto	0.010-0.013
Cubierta de graba	0.012-0.030

Fuente: Tomado de Morgan, Soil and Conservation, 1997.

La vegetación ayuda a controlar la erosión de acuerdo con Gray y Sotir (1996) por:

- **Intercepción:** las plantas y la hojarasca absorben la energía de las gotas de lluvia y previenen el desprendimiento de las partículas del suelo al disminuir el efecto de la salpicadura de las gotas de lluvia.
- **Control:** las raíces unen y restringen las partículas de suelo evitando de esta forma que las partículas sean arrastradas y se acumulen sedimentos.
- **Rugosidad:** tallos y hojas caídas incrementan la rugosidad del suelo disminuyendo así la velocidad de la escorrentía y por tanto del desprendimiento de partículas de suelo arrastradas por éste.
- **Infiltración:** la vegetación incrementa la porosidad del suelo y permeabilidad.

Morgan (1997) indica que la eficacia de la cubierta vegetal para disminuir la erosión por gotas de lluvia depende de su altura y su densidad. Si la altura de la vegetación es mayor de 7 m, las gotas de lluvia al caer alcanzarán más del 90% de su velocidad terminal o unirse a otras gotas de lluvia en las hojas provocando que al caer sean más erosivas al haber incrementado su tamaño, aun cuando la vegetación pueda disminuir la cantidad de agua de lluvia que llegue a la superficie de suelo, esto no significa que disminuya el impacto con el que tocara el suelo, ya que no modifica la energía cinética de las gotas al caer, aumentando incluso la intensidad del desprendimiento, entre 1.2 a 3 mayor que en campo abierto, a menos que exista una capa de hojarasca que proteja la superficie del suelo.

Esto se debe a que las ramas y hojas cambian la distribución con la que normalmente el agua caería al suelo, acumulando en puntos de goteo, provoca que se localicen en puntos y de esta forma aumentando la intensidad del impacto en estos puntos en la superficie del suelo, sobre pasando la capacidad de infiltración y ayudando a la formación de escorrentía (Morgan, 1997).

1.6.5. Especies vegetales exóticas

Una especie exótica es aquella que se introduce a un área geográfica de la cual no es nativa, pudiendo ser de forma accidental o bien por medio de una actividad planificada. A continuación se da una breve descripción de las especies utilizadas durante el desarrollo de la presente investigación.

- *Brachiaria brizantha*: se trata de una gramínea tropical, perenne, de origen africano. Presenta un hábito de crecimiento cespitoso, sin embargo, produce perfilhos semi-decumbentes que pueden o no

enraizar. Dependiendo de las condiciones ambientales y el manejo. Bajo condiciones de libre crecimiento, puede alcanzar hasta 1.8 m de altura.

- *Brachiaria decumbens*: es una gramínea tropical perenne, de origen africano. Planta vigorosa y agresiva, que puede alcanzar hasta 1.2 m de altura cuando no es pasteada. Sus perfilhos son decumbentes pero sus ápices se encuentran erguidos verticalmente y los nudos enraizan con facilidad.
- *Brachiaria Ruzzi*: esta especie presenta un crecimiento rastrero y perenne. Posee un buen sistema radical, con la presencia de rizomas duros, que tienen facilidad de enraizar y producir ramas en los nudos inferiores. Los colmos son glabros, de color verde claro, de ovalados a cilíndricos, con tendencia a formar bulbillos aéreos, con una altura de 25 a 50 cm.
- *Pennisetum clandestinum*: es una especie perenne tropical de Poaceae, posee rápido crecimiento y agresividad, por lo que se lo categoriza como una maleza en algunas regiones. Tiene alta potencia invasiva debido a sus agresivos rizomas y estolones, con los que penetra la tierra, formando rápidamente densas matas, y suprimiendo a otras especies
- *Cynodon dactylon*: planta perenne de 10-30 cm, rizomatosa y estolonífera. Hojas con lígula formada por un anillo de pelos. Inflorescencia digitada, formada por 2-7 espigas patentes, en ocasiones violáceas. Espiguillas sentadas, con 1 flor, dispuestas en dos hileras a lo largo de las ramas.
- *Festuca arundinacea*: es una especie de la familia de las gramíneas (Poaceae). Es nativa de Europa y del norte de África. Es una forrajera de

clima templado muy importante dentro de los sistemas de producción extensivos de ganado Especie microterma, muy usada en tapices herbáceos poco tolerantes al calor, sequedad y sombra. Permanece verde todo el año, y resiste muchas enfermedades, soporta muy bien el corte y persiste aunque haya bajo mantenimiento.

- *Poa pratensis*: es una herbácea perenne, crece de 30 a 60 cm (ocasionalmente hasta 90) de alto. Hoja finas, lineales, de 20 cm de largo y 3-5 mm de ancho, pulidas o ligeramente rugosas, con lígula redondeada a truncada de 1-2 mm de largo.
- *Lolium perenne*: es una gramínea perenne de importancia en la creación de céspedes y en la producción de forrajes en lugares de clima templado y subtropical. Tallos de hasta 80 cm, con hojas de color verde oscuro y brillante, enteras o bilobadas, con limbo de hasta 18 cm de longitud; estriadas y con nervio central marcado.
- *Medicago sativa*: es una especie de planta herbácea perteneciente a la familia de las fabáceas o Leguminosae. Es una planta que se utiliza ampliamente como pasto y con este propósito se cultiva intensivamente en el mundo entero. Tiene un ciclo vital de entre cinco y doce años, dependiendo de la variedad utilizada, así como del clima; en condiciones benignas puede llegar a veinte años.
(CONABIO, 2009).

1.7. Tipos de erosión

La erosión del suelo puede darse de diferentes formas de acuerdo a los diferentes factores erosivos, los más conocidos son:

1.7.1. Erosión hídrica

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación más importantes, que afectan la capacidad de las tierras en pendiente, para la producción de alimentos para el consumo humano o animal; además, la presencia de las plantas y las primeras capas del suelo son imprescindibles para que el agua de las precipitaciones se infiltre, por lo que el aumento en la erosión significa siempre una disminución en la recarga de los acuíferos. Esta erosión hídrica es un proceso erosivo típico de regiones tropicales, causado por la agresividad de la lluvia, debido a las características de intensidad, duración y frecuencia asociadas a los eventos pluviométricos (Nuñez, 2001).

La lluvia y el escurrimiento superficial son los agentes responsables del desprendimiento y movimiento de las partículas de suelo sobre la superficie terrestre. El riesgo de erosión por acción del agua es máximo en períodos de lluvias intensas, en que el suelo se encuentra saturado, con escasa cubierta vegetal, por lo que aumenta el movimiento del agua por la superficie del suelo.

El efecto de la escorrentía resultante, elimina cantidades importantes de suelo. La erosión hídrica es casi siempre, debida a la disminución de la cubierta vegetal del suelo, por el sobrepastoreo de ovinos o a causa de la eliminación de la vegetación para usos domésticos o agrícolas. La erosión provoca un aumento de la carga sólida que arrastran los ríos, disminuyendo sustancialmente la capacidad útil de algunos aprovechamientos hidráulicos. Asimismo, la carga sólida de los ríos, enturbian las aguas costeras de las zonas

donde desembocan. Esta agua deja de ser útil para la pesca, ya que los peces emigran al cambiar las condiciones de su ecosistema y estas zonas, pierden el atractivo turístico que pueden tener. (Rivera *et al* 2005).

La erosión se produce por dos mecanismos. El primero es por el impacto directo de la gota de lluvia sobre la superficie del suelo, que produce la destrucción de los agregados o terrones del suelo cuando éste está desnudo, el material fino separado tapa los poros del suelo y entonces el agua empieza a escurrir por la superficie; es decir, que al separarse en sus componentes elementales, el suelo queda impermeabilizado; por un lado se torna imposible que el agua se infiltre para alimentar a las plantas, mientras que por otro lado, el suelo se sigue deslavando (Rivera *et al* 2005).

El segundo mecanismo, es cuando el agua escurre sobre la superficie del suelo, debido a la pendiente y arrastra partículas del mismo, materia orgánica y nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, entre otros (Escalante, 2005).

De acuerdo con la intensidad de lluvia, tipo de suelo y grado de protección de la superficie se producirá erosión hídrica de distinta gravedad. Así se encontrará erosión laminar, donde el suelo se pierde en capas muy delgadas. Luego puede aparecer la erosión digital, en forma de los dedos de una mano, donde el agua que escurre desde las lomas más altas a los bajos es capaz de cortar el suelo y formar pequeños surcos de menos de 5 a 10 cm de profundidad. Por último, la forma más grave de erosión lo constituye la formación de surcos y canales profundos, llamados cárcavas. Estas cárcavas pueden tener varios metros de ancho y de profundidad, constituyendo pequeños arroyos (Escalante, 2005).

La situación crítica desde el punto de vista de la erosión, lo constituyen los suelos pobres en materia orgánica y con mal estructura, cuando son sometidos a lluvias intensas o cuando están desnudos o con muy escasa protección vegetal. La pendiente del terreno es un factor muy importante en la erosión y con valores mayores al 1 %, se tienen pérdidas considerables de suelo.

Según Núñez (2001), los procesos de la erosión hídrica se clasifican en:

- Erosión pluvial o por salpique
- La erosión laminar
- La erosión en surcos
- La erosión en cárcavas
- La erosión en terracetas

Todos los procesos (excepto la erosión pluvial y en terracetas), ocurren debido al flujo del agua en la superficie de los terrenos. Estos procesos están influenciados por diferentes variaciones en textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo; además de la influencia de la pendiente y las condiciones climáticas. Entre ellas, destaca la agresividad de la lluvia, sumado al manejo de los suelos y al grado de cobertura vegetal.

También se describe la remoción en masa, que se subdivide en soliflucción, deslizamiento y derrumbes, coladas de barro o golpes de cuchara, hundimientos, y desprendimientos o desplomes. La mayoría de estos procesos ocurren por la saturación hídrica de los suelos, en su gran mayoría asociada a procesos geológicos, geomorfológicos y climáticos.

Otros se encuentran ligados a las construcciones de caminos, carreteras, minas, excavación de tajos y flujos de agua subterránea. (Núñez, 2001).

- Erosión pluvial: esta forma de erosión, es consecuencia directa del impacto de las gotas de lluvia en el suelo sin cobertura vegetal (Núñez, 2001).
- Erosión laminar: es el arrastre de partículas de suelo suspendidas en el agua de lluvia, que se desplaza en sentido de la pendiente (Núñez, 2001).
- Erosión en surcos: este proceso erosivo se debe al escurrimiento o flujo concentrado del agua, incluso en terrenos ligeramente ondulados, con 3 a 8 por ciento de pendiente (Núñez, 2001).
- Erosión en cárcavas: es una de las formas de mayor espectacularidad en el proceso erosivo, por las dimensiones que puede alcanzar tanto en longitud como en profundidad, y el volumen de suelo que se pierde. La erosión en cárcavas, es el proceso que sigue normalmente al proceso de erosión en surcos, o procesos combinados de erosión en surcos y en terracetas (Núñez, 2001).
- Erosión en terracetas: es causada por el ganado vacuno que camina en terrenos de ladera. Cuando el ganado es apacentado en estos terrenos, camina en forma intuitiva, siguiendo curvas de nivel. El paso continuo del ganado, sumado a su peso ejercido en el área de desplazamiento por las pezuñas, produce una compactación y genera un modelo erosivo en forma trapezoidal invertida, de diversos tamaños (Núñez, 2001).
- Remoción en masa: el agua ingresa por los poros del suelo, lo satura y causa que el volumen de suelo que ha recibido el agua por infiltración se desplace pendiente abajo, por influencia de la gravedad (Núñez, 2001).

1.7.2. Erosión por escurrimiento

Cuando el agua de lluvia no alcanza a infiltrarse en el suelo, debido a su saturación, pendiente elevada o poca capacidad de infiltración, fluye por la superficie de terrenos pendientes arrastrando el suelo desprendido. Según el grado de pendiente, cantidad de agua, clase y estado del suelo, se presentan diferentes formas de erosión por escurrimiento, así (Prieto, 2004):

- Forma difusa: Consiste en desplazamientos cortos de pequeñas partículas, o en la formación de surquillos temporales, aún en terrenos con buena cobertura vegetal (Prieto, 2004).
- Forma laminar: o arrastre uniforme y casi imperceptible de delgadas capas de suelo por mantos de agua. Esta forma de erosión es una de las más peligrosas o traicioneras, ya que se vienen a notar cuando sólo queda una capa muy delgada del suelo, las raíces de las plantas se ven desnudas o aparece el subsuelo (Prieto, 2004).
- Forma de surcos: Esta es causada por el escurrimiento concentrado de agua en surcos más o menos paralelos, independientes y durables. La formación de surcos es frecuente en suelos susceptibles a la erosión o donde se hacen cultivos en sentido de la pendiente (Prieto, 2004).
- Forma de calva: Esta es causada por el paso continuo de animales, personas o máquinas, las cuales destruyen la cobertura vegetal y por compresión compactan el suelo, para originar por allí, según el grado de pendiente, las otras formas de erosión (Prieto, 2004).
- Forma de zanjas o zanjones (cárcavas): debido a una mayor concentración en el escurriendo, y a las irregularidades o

susceptibilidades del terreno, varios surcos pueden unirse o ahondarse y formar zanjones o zanjas (cárcavas) (Prieto, 2004).

- Forma agresiva: esta forma es debida al desquiciamiento de las paredes de zanjones o derrumbes, por la concentración de aguas que escurren por las paredes o por su base, produce el socavamiento. (Prieto, 2004).

1.8. Erosión eólica

El factor principal en la erosión eólica, es la velocidad del aire. A causa de la rugosidad del terreno, las piedras, la vegetación y otros obstáculos, la velocidad del viento es mínima cerca de la superficie del suelo. Es el proceso de disgregación y transporte del suelo por la acción del viento. Este es favorecido por los vientos fuertes y frecuentes, así como las superficies llanas que están expuestas al viento; otra de las características que favorecen la erosión eólica es el suelo seco, suelo con textura fina y poca materia orgánica, una condición árida y con poca vegetación (Rafaelli, López y Almorox 2010). Esta condición eólico-dinámica hace que el viento desprenda las partículas finas del suelo como arenas gruesas, medianas y muy finas, además de limos y arcillas, y las transporte por mecanismos de suspensión, saltación y deslizamientos paulatinos (Nuñez, 2001).

- En suspensión: las partículas finas (menores de 0.1 milímetros de diámetro) permanecen en la atmósfera, que tiene una capacidad estimada de acarreo de tales partículas de hasta 15 toneladas de suelo por kilómetro cúbico de atmósfera. Estas partículas sedimentan o se acumulan en los sitios hacia los que fueron transportadas, por la dirección predominante del viento, cuando dentro de sus torbellinos eólicos la fuerza de gravedad es mayor que las fuerzas que mantienen las partículas en suspensión (Núñez 2001).

- Por saltación: es un desplazamiento de partículas finas, con tamaños entre 0.1 a 0.5 milímetros de diámetro, que ocurre en trechos muy cortos (Núñez, 2001).
- Por desplazamiento paulatino: es el modelo de transporte más lento, que corresponde a las partículas entre 0.5 y 2 milímetros de diámetro. Esto incluye básicamente las arenas de tamaño mediano y grueso. Estas partículas gruesas se mueven lentamente, a ras de la superficie del suelo (Núñez, 2001).

1.9. Hidrosiembra

La hidrosiembra es un sistema comúnmente utilizado a nivel mundial para la protección contra la erosión y arrastres de sedimentos, así como para vegetar los taludes. La hidrosiembra forma un manto hidráulico, sobre la superficie del talud y se aplica por medio de una manguera y una hidrosebradora. La combinación de estos materiales para la hidrosiembra se le llama Slurry o compuesto acuoso (Profile, 2014).

Los principales compuestos de una hidrosiembra son:

- Mulch
- Semilla
- Fertilizante
- Agua

El mulch es un material orgánico para cubierta protectora del suelo, este es proveniente de cortezas, virutas de madera, paja, conchas, hojas, cascarilla de arroz, etc. El objetivo del mulch es suministrar los nutrientes necesarios al suelo, lentamente a medida que se va descomponiendo (Geocon, 2014). Este protege las semillas de cualquier tipo de amenaza ya sea aves, o cualquier tipo

de roedor que se quiera comer las semillas, aporta materia orgánica biodegradable al suelo, ayuda a conservar la estructura superficial del suelo cuando se utiliza la hidrosiembra y funciona como aislante térmico, reduciendo las altas temperaturas que deshidratan el suelo (Geocon, 2014).

Se utilizan semillas de pastos o de especies nativas del lugar debido a que cada área, y tipo de suelo tiene propiedades no homogéneas. Debido a esto, las semillas tienen que ser propias de su zona ya que estas servirán para la cubierta vegetal del terreno con pendiente o talud (Geocon, 2014).

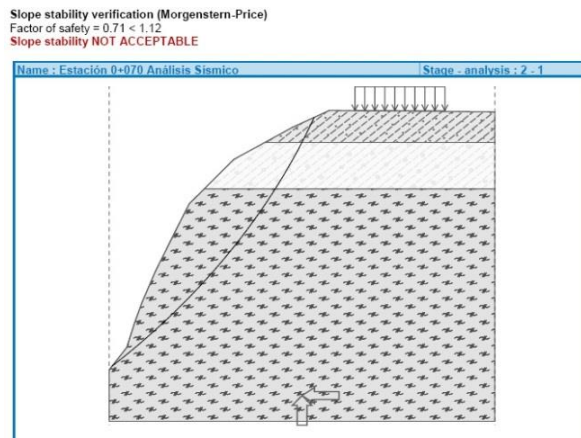
Se utilizan los fertilizantes e insecticidas adecuados para que la germinación de la grama y para que el tiempo que se espera sea el adecuado y frondoso; ya que uno de los objetivos del fertilizante es aportar los elementos y nutrientes necesarios para el desarrollo de las especies utilizadas. Estas pueden ser de orgánicos y minerales para el desarrollo de los micronutrientes, y para así obtener un establecimiento y óptimo desarrollo de la vegetación empleada (Geocon, 2014).

El agua es el principal elemento vital para obtener el crecimiento esperado, por lo que es necesario saber cómo se utiliza este elemento en el sistema de hidrosiembra (Geocon, 2014).

1.10. Erosión y estabilidad de un talud

Por definición entendemos que la erosión en un talud implica una degradación del suelo (parte superficial), causado por agentes erosivos como el agua y el viento; mientras que la estabilidad de un talud depende de la seguridad de una masa de tierra contra falla o movimiento del mismo tal y como se muestra en el siguiente análisis.

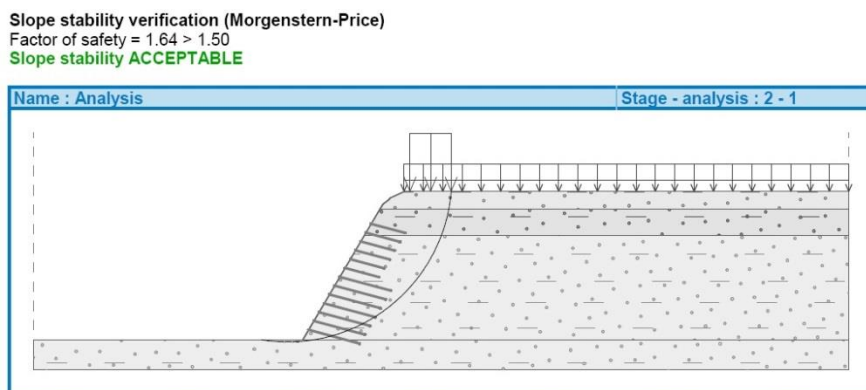
Figura 2. **Análisis de estabilidad de talud por medio del método Morgenstern-Price sin anclajes.**



Fuente: elaboración propia.

Según las propiedades físicas y mecánicas del suelo, este talud no es estable, debido a que tiene un factor de seguridad de 0.71 (menor a 1.12), y la simulación de la falla más probable indica que se corre el riesgo a deslizamiento, para este caso, incrementar el factor de seguridad del talud es necesario introducir anclajes tal y como se muestra en la figura siguiente.

Figura 3. **Análisis de estabilidad de talud por método de Morgenstern-Price utilizando anclajes.**



Fuente: elaboración propia.

Al utilizar anclajes, tal y como se muestra en la imagen anterior, incrementa el factor de seguridad del talud y lo determina como estable. Las raíces de la vegetación utilizadas para controlar la erosión no exceden el metro de profundidad, además, por geotropismo que es la tendencia de las raíces a crecer en la misma dirección de la fuerza de gravedad, estas no tienen la dirección que presentan los anclajes de la figura 3, por ello no es posible con vegetación aportar al factor de seguridad de un talud.

2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. Sustrato de fibra de madera (mulch)

Un sustrato de fibra de madera (mulch) es el medio en el que se desarrolla la semilla plantada desde su etapa de imbibición hasta la emergencia radicular, por tal motivo fue importante tomar en cuenta la retención de humedad que este mulch tenía respecto a otros sustratos. Para ellos se llevaron a cabo pruebas de germinación de semilla de *Brachiaria brizantha* sp. en taludes de corte y relleno con dos distintos tipos de mulch, comparando fibras de madera con refinación térmica (Flexterra) y fibras de madera con refinación atmosférica en un área de 200 m² por cada prueba.

Tabla II. Evaluación de la germinación de hidrosiembra aplicada con mulch de refinación térmica y atmosférica aplicada sobre distintos taludes.

Tipo de mulch (refinación)	Tipo de talud	No. riegos por día	Densidad de semillas (gr/m ²)	Germinación	% de área germinada	No. días hasta germinación
Térmica	Corte 3:1	3	25	Si	90	10
Atmosférica	Corte 3:1	3	25	No	0	0
Térmica	Relleno 1:1	2	16	Si	100	7
Atmosférica	Relleno 1:1	2	16	Si	<30	7

Fuente: elaboración propia.

El área en porcentaje (%) que se cubrió con mulch de refinación térmica es mayor que el utilizado con mulch de refinación atmosférica en ambos taludes; para taludes con pendientes correspondientes a una proporción 3:1, la retención de humedad hizo una diferencia significativa en el mulch de refinación térmica para incrementar la germinación. Al finalizar 60 días de aplicada la

hidrosiembra se obtuvo una densidad de follaje que cubría el 100% del talud aplicado con mulch de refinación térmica, mientras que la densidad de follaje en talud de corte y relleno con mulch de refinación atmosférica fue menor al 40%. Durante el desarrollo vegetativo de la planta se va logrando una cobertura mayor a la inicial, dicha densidad cumple una función importante en el proceso de control de erosión y arrastre de sedimentos, ya que amortigua el impacto de la gota de lluvia, reduce la velocidad del flujo superficial de agua y mejora el proceso de filtración-evapotranspiración del agua, debido a su sistema radicular fibroso.

Figura 4. Desarrollo radicular de la planta en talud de relleno 1:1, con mulch de refinación térmica.



Fuente: elaboración propia.

2.2. Vegetación para el control de erosión

El control de erosión en un talud de corte o relleno se hace a través de especies vegetales altamente tolerantes a entornos desfavorables para la siembra, tales como, una alta pendiente, poca disponibilidad hídrica, un suelo compactado, con pocos nutrientes y bajo mantenimiento, son unas de las condiciones más comunes en estos sistemas, por tal motivo se llevó a cabo pruebas con semillas de gramíneas. En la actualidad se consideran a nivel mundial 750 especies, incluidas en 10,000 géneros, incrementándose notablemente el conocimiento de la flora. (RUIZIA, 1993).

Se tomaron en cuenta plantas perennes, herbáceas, cespitosas, rizomatosas y estoloníferas, dichas plantas habitan los diversos pisos climáticos, desde el nivel del mar hasta las partes más altas en las montañas.

Tabla III. **Especies vegetales evaluadas para la hidrosiembra.**

Especie	Nombre Común	Ubicación de Aplicación	Ciclo de Carbono	Dosis de siembra Recomendada (gr/m²)
Brachiaria brizantha	Brizantha	Suchitepequez	C4	20
Brachiaria decumbens	Decumbens	Suchitepequez	C4	20
Brachiaria ruzzi	Ruzzi	Suchitepequez	C4	20
Pennisetum clandestinum	Kikuyú	Villa Nueva, Guatemala	C4	5
Cynodon dactylon	Bermuda	Villa Nueva, Guatemala	C4	40
Festuca arundinacea	Festuca	Ciudad, Guatemala	C3	40
Poa pratensis	Espiguilla	Ciudad, Guatemala	C3	40
Lolium perenne	Raigras	Tecpán, Chimaltenango	C3	40
Medicago sativa	Alfalfa	Villa Nueva, Guatemala	C3	17

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Germinación de diversas especies aplicadas con hidrosiembra.



Fuente: elaboración propia.

Se llevaron a cabo dos análisis de suelos para determinar cuáles eran las características físico-químicas del suelo, a través de una muestra compuesta para un talud de relleno y otro para talud de corte.

Tabla IV. Análisis de suelo para talud de corte y relleno.

No.	Muestra	--		mg/L	Cmol (+)/ L				%
		Nitrógeno	pH	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio	Al	M.O.
	Niveles Adecuados	0--0	5.5--6.8	10--20	0.2--0.6	4--20	1--5	0--1.2	3--6
1	Talud de Corte	0.01	6.8	0.28	0.25	1.47	0.84	0.07	1.45
2	Talud de relleno	0.01	5.2	7.79	0.55	2.26	0.79	0.62	2.18

No.	Muestra	Porcentaje de Saturación en la CICE								
		Cmol (+)/ L				Equilibrio de Bases				
	Niveles Adecuados	CICE	K	Ca	Mg	Al	CA/K	Mg/K	Ca/Mg	(Ca+Mg)/K
		5--25	4--6	60--80	10--20	0--24.9	5--25	2.5--15	2--5	10--40
1	Talud de Corte	2.63	9.51	55.89	31.94	2.66	5.88	3.36	1.75	9.24
2	Talud de relleno	4.22	13.03	53.55	18.72	14.69	4.11	1.44	2.86	5.55

Fuente: análisis de suelos por ANALAB, ANACAFE.

Todas las gramíneas mostraron deficiencias nutricionales como parte de su sintomatología, sobre todo clorosis que es el amarillamiento del tejido foliar por falta de clorofila. Dichas causas pueden darse por las condiciones del talud tales como, raíces dañadas, raíces compactadas y deficiencias nutricionales en la planta. Para mejorar la salud de la planta fue necesario incorporar un fertilizante foliar que cubre con las necesidades esenciales de la planta, dicho fertilizante puede incorporarse en un inicio junto con la mezcla resultante de la hidrosiembra y las semillas, ya que el mulch retiene estos nutrientes en solución líquida y los incorpora en el suelo durante la etapa inicial de la planta.

Se ha incorporado una planta leguminosa, *Medicago sativa* como una fuente de nitrógeno que fija del ambiente hacia el área de las raíces de momento ha mostrado buenos resultados en cuando al desarrollo vegetativo de las gramíneas que acompañan en la mezcla.

Figura 6. Desarrollo vegetativo de las gramíneas incorporando leguminosas.



Fuente: elaboración propia.

2.3. Tiempo para el control de erosión

El proceso de establecimiento de la hidrosiembra desde que se siembra hasta que el follaje de la planta es suficiente para controlar la pérdida de suelos, puede variar según las condiciones de cada lugar; si bien la pendiente del terreno puede afectar a la disponibilidad de agua, también la temperatura, precipitación, exposición al sol del talud y otros factores propios del suelo puede disminuir o incrementar la velocidad de establecimiento. La vegetación con un follaje denso es capaz de disminuir la pérdida de suelo en un talud, tomando en cuenta los resultados mostrados en la fase experimental podemos decir que la pérdida de suelo se redujo en un 100% con respecto a un suelo sin vegetación.

Figura 7. Talud de corte relación 3:1, 75 días luego de su aplicación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Talud de relleno relación 1:1, 35 días luego de su aplicación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Talud de corte relación 1:1, si cubierta vegetal con una significativa degradación del suelo.



Fuente: elaboración propia.

El tiempo que toma la hidrosiembra para controlar la erosión oscila entre los 30 y 75 días desde que se realiza la siembra, los taludes de corte con una pendiente mayor a los 60° con respecto a la horizontal, pierden por gravedad más humedad cuando se riega o reciben agua de lluvia, mientras que un talud con una pendiente menor ($<60^\circ$) que en general son taludes de relleno, mantienen la humedad más tiempo.

CONCLUSIONES

1. La utilización de un mulch de fibra de madera con refinación térmica representa una mayor retención de humedad de 13.5 veces su peso en agua, lo cual mejora la germinación de la semilla en un talud de corte o relleno cuya pendiente supera los 30° con respecto a la horizontal, disminuyendo costos en riego, por su eficiencia en retención de humedad.
2. Las gramíneas mostraron una buena adaptación a las condiciones adversas que presentan los taludes, su sistema radicular fibroso ejerce una acción mecánica en el suelo, el follaje denso en la parte superior amortigua el impacto de la gota de lluvia mientras reduce la velocidad del flujo superficial del agua, controlando la erosión y el arrastre de sedimentos.
3. El tiempo que toma a la vegetación controlar la erosión de los suelos oscila entre los 35 días para taludes de relleno con una pendiente menor a los 60° con respecto a la horizontal y un suelo con mayor aireación, donde la filtración del agua es favorable, mientras en taludes de corte, donde la inclinación excede los 60°, el suelo está más compactado y se reduce la filtración, por tal motivo el establecimiento de la vegetación incrementa a unos 75 días. Comparado con otras técnicas de control de erosión el uso de hidrosiembra implica menos costos resultando en una solución técnica y económica a la fecha (ver costos en apéndice 6.6).

RECOMENDACIONES

1. Prevenir un desastre ocasionado por fenómenos naturales es la mejor acción para evitar problemas físicos, económicos y humanos, por tal motivo, se sugiere utilizar técnicas preventivas para el control de erosión en taludes de corte o relleno para cualquier tipo de obra civil que se lleve a cabo, la exposición a riesgo puede disminuirse con aplicar preventivamente hidrosiembra sobre un talud.
2. Tomar en cuenta la nutrición vegetal que debe llevar la planta, debido a las condiciones que presentan los suelos productos de actividades civiles, donde se remueve la capa vegetal (top soil) y se deja el suelo sin materia orgánica y con deficiencias nutricionales para la planta.
3. Considerar el adecuado riego durante los primeros días de la aplicación, ya que la semilla ha activado su metabolismo con agua y para llevar a cabo la emergencia radicular es necesario mantener la humedad lo más constante posible sobre el talud.
4. Previo a la aplicación de hidrosiembra en un talud, es recomendable hacer un estudio de suelos, tomando en cuenta las propiedades físicas y mecánicas del mismo, para evitar deslizamientos o fallamientos y proponer una solución geotécnica adecuada para cada talud específicamente.
5. Hacer uso de vegetación para el control de erosión, ya que en el mercado existen mantos de control de erosión temporal y permanente, que solos, no resuelven de fondo el problema, ya que pueden existir filtraciones y tener resultados inesperados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Almorox, A.J. 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación. Murcia, Universidad de Murcia. 384 p.
2. Belmonte, F. y Romero-Díaz, M.A. Evaluación de la capacidad de interceptación de la lluvia por la vegetación y su relación con la erosión de los suelos en el SE semiárido español. 1, 33-43. 1992. Murcia, Sociedad Española de Geomorfología. Estudios de Geomorfología en España.
3. CONABIO. 2009. Catálogo taxonómico de especies de México. 1. In Capital Nat. México. CONABIO, México City.
4. Corominas, J. Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera. Corominas, J. [Estabilidad de taludes y laderas naturales], 1-30. 1989. Zaragoza, S.E.G. Monografías de la SEG, nº 3.
5. Durán, V.H., Suazo, A., Martínez-Raya, A., and Aguilar, J., 2002. Control de la erosión en los taludes de bancales, en terrenos con fuertes pendientes. Edafología, 9(1): 1-9.
6. Escalante, S. 2005. La medición de sedimentos en México. Tabasco, México, IMTA-UJAT. 318 p.
7. Estalrich, E., Hernandez, A.J., Aranbda, L., and Pastor, J., 1997. Estudio de factores edáficos relacionados con la erosión escorrentía en

taludes de fuerte pendiente; ensayos de revegetación. Edafología, 2: 161-167.

8. Fuentes J.C. 2016. La erosión y sus implicancias Ambientales-Energéticas [diapositivas de PowerPoint]. Presentado en conferencias, Escuela de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería. USAC.
9. GEOCON. (2014). Hidrosiembra con mulch de refinación térmica. 2016, de PRECON Sitio web: <http://www.geocon.com.gt/>.
10. González-Cristobal, P., 2005. Tecnología de Regeneración de Suelos en las Grandes Obras Públicas. Hidrosiembra y Lucha contra la Erosión. Montes, 21: 13-17.
11. Hereter, A., Verdu, A.M.C., Ballesteros,., and Josa, R., 2001. Fertilización en la revegetación de áreas degradables en el Pre-Pirineo catalán. Edafología, 8(3): 63-69.
12. Hudson, N. 1982. Conservación de suelos. España, Reverté. 352 p.
13. INAB. (2010). Mapa de Cobertura Forestal de Guatemala. marzo 2016, Instituto Nacional de Bosques Sitio web: <http://www.inab.gob.gt/Documentos/Informes/Cobertura/Presentacionoficialmapa.pdf>.
14. Alvarado, J. Abril 1,975. Análisis de estabilidad y su aplicación en una zona de deslizamientos en Guatemala. Guatemala, Guatemala. : Tesis, Abril 1,975.
15. Prera, J. Enero, 2008. Protección de taludes, utilizando el método de Soil Nailing. Guatemala, Guatemala. : Tesis, Enero, 2008.

16. Marqués, M.J., Jiménez, L., Alonso, N., García, P., Pérez., Díez Mayans, C., and Bienes, R., 2003. Revegetación arbustiva y enmienda orgánica como elementos de protección del suelo y control de la erosión hídrica. Ensayos de lluvia simulada. *Edafología*, 10(2): 117-125.
17. Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento de Perú. Estabilización de suelos y taludes. Perú: <http://www.vivienda.gob.pe/>.
18. Morgan, R.C.P. (1997) *Erosión y conservación del suelo*. Madrid. Mundi-empresa.
19. Núñez, J. 2001. *Manejo y conservación de suelos*. San José, Costa Rica, EUNED. 267 p.
20. Ojeda, G., Alcañiz, J.M., and Ortiz, O., 2003. Runoff and losses by erosion in soils amended with sewage sludge. *Land degradation & Development*, 14: 563-573.
21. Pastor, M. and Castro, J., 1997. Soil management systems and erosion. *Olivae*, 59: 64-74.
22. Prieto, CJ. 2004. *El agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación*. Bogotá, Colombia, ECOE. 277 p.
23. Profile. (2014). Video tutoriales informativos del Hidrosiembra con mulch de refinación térmica y semillas de grama perenne. enero 2016, de Profile products Sitio web: <http://www.profileevs.com/resources/video-gallery>.

24. —. (2014). Solutions for you Enviroment. enero 2016, de Profile products
Sitio web: <http://www.profileproducts.com/>.
25. —. (2014). Stabilizing With Seed (Erosion Control). Profile products enero
2016. Sitio web: <http://www.profileevs.com/article/stabilizing-seed-erosion-control-septoct-2014>. GEOCON. 2014.
26. Rafaelli, S; López, FB; Almorox, AJ. 2010. La degradación de los suelos por
erosión hídrica: métodos de estimación. España, Editum. 384 p.
27. Rivera, F; Gutiérrez López, A; Val Segura, R; Mejía, R; Sánchez, PA;
Aparicio, J. 2005. La medición de sedimentos en México. México,
IMTA. 318 p.
28. Suárez, F. (1982). Conservación de Suelos. San Jose. CR IICA.
29. Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Colombia.
Instituto de investigación sobre erosión y deslizamientos.
30. Tarbuck, Edgard y Lutgens, Frederick (2001). Ciencias de la Tierra, una
introducción a la geología física. España. Prentice Hall.
31. Tobías, H. (1994). Impacto ambiental de las prácticas de conservación de
suelos en la subcuenca del río Pensativo. Tesis Guatemala.
Universidad San Carlos de Guatemala.
32. Voroney, RP, Van Veen, JA, y Paul, EA . (1981). Organic C dynamics in
grassland soils. Canada: Sci..
33. Wolman, Leopold y M.G., Miller J.P. (1964). Fluvial proceses in
geomorphology. Dover Publications, New York.

APÉNDICE

Hidrosiembra vía alterna sur 2015 talud de corte





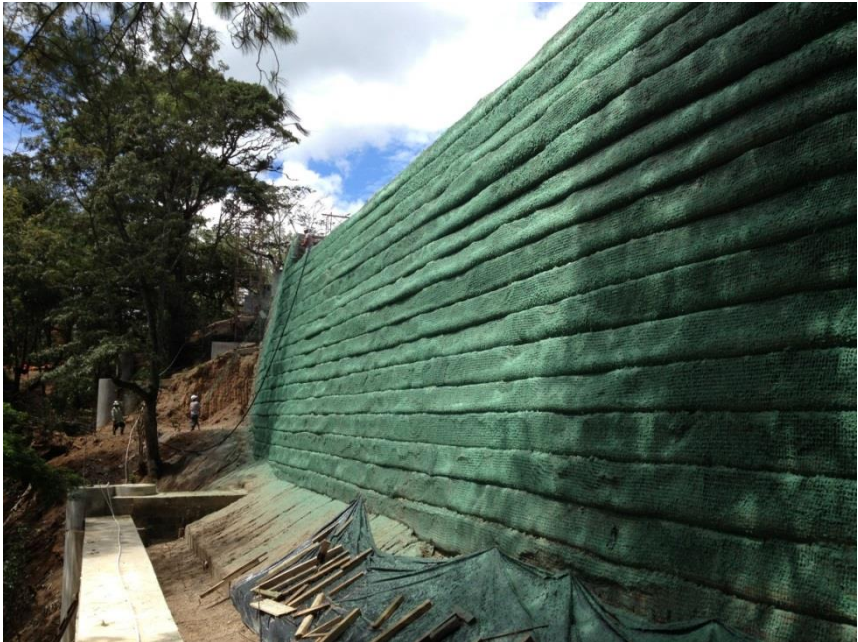
Fuente: elaboración propia.

Hidrosiembra 2015 talud de relleno



Fuente: elaboración propia.

Hidrosiembra proyecto El Encanto 2015 muro sierra



Fuente: elaboración propia.

Hidrosiembra proyecto El Casco San Rafael, talud de relleno



Fuente: elaboración propia.

Erosión en suelos sin cobertura vegetal.



Fuente: elaboración propia.

Costos de aplicación de hidrosiembra y desarrollo de la investigación

Presupuesto general

DESCRIPCION	UNIDAD	AREA	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Hidrosiembra en Taludes de Relleno	m2	500	Q35.00	Q17,500.00
Hidrosiembra en Taludes de Corte	m2	500	Q42.00	Q21,000.00
Sub-total				Q38,500.00
IVA				Q4,620.00
TOTAL (incluye IVA)				Q43,120.00

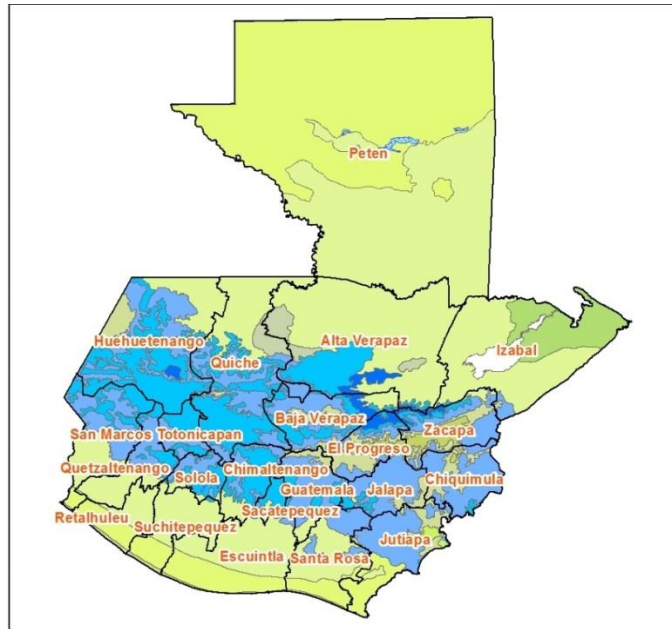
Varios

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Vehículo	días	16	Q350.00	Q5,600.00
Materiales varios	global	1	Q1,000.00	Q1,000.00
Ayudantes y piloto	días	3	Q120.00	Q360.00
Tiempo de trabajo (Mario Fong)	días	20	Q350.00	Q7,000.00
Viáticos	días	16	Q350.00	Q5,600.00
Sub-total				Q19,560.00
IVA				Q2,347.20
TOTAL (incluye IVA)				Q21,907.20















TOTAL GASTOS	PRECIO TOTAL
APLICACIONES	Q43,120.00
GASTOS VARIOS	Q21,907.20
TOTAL (incluye IVA)	Q65,027.20

Fuente: elaboración propia.

Recomendación de especies vegetales gramíneas a sembrar según zona de vida en Guatemala



ZONAS DE VIDA

 Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical	 Bosque muy húmedo Subtropical (frío)
 Bosque húmedo Montano Subtropical	 Bosque muy húmedo Tropical
 Bosque húmedo Subtropical (cálido)	 Bosque pluvial Montano Bajo Subtropical
 Bosque húmedo Subtropical (templado)	 Bosque pluvial Subtropical
 Bosque muy húmedo Montano Bajo Subtropical	 Bosque seco Subtropical
 Bosque muy húmedo Montano Subtropical	 Bosque seco Tropical
 Bosque muy húmedo Subtropical (cálido)	 Monte espinoso Subtropical

Fuente: elaboración propia.

En tonalidades oscuras se encuentran los tipos de climas más templados, en donde la vocación general de las tierras es para uso forestal, en estas áreas se sugiere especies vegetales del ciclo de carbón C3 ya que se adaptan mejor; en tonalidades claras puede utilizarse semillas del ciclo de carbón C4 ya que toleran mejor la luz solar intensa y las sequías, para estas áreas puede utilizarse las *Brachiarias brizantha*, *decumbens* y *ruzzi*, *Pennisetum clandestinum* y el *Cynodon dactylon*.