

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte en suelos

Informe de Trabajo de Graduación

Para obtener el Grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Andrés Quirós Castegnaro

Director del Proyecto de Graduación:

Ing. Sergio Sáenz Aguilar

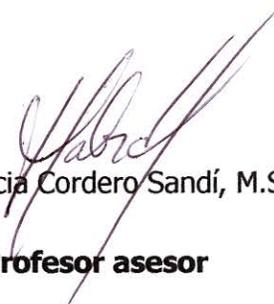
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

"Este trabajo final de graduación fue aceptado por la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Civil"



Ing. Sergio Sáenz Aguilar, M.Sc.

Profesor director



Ing. Marcia Cordero Sandí, M.Sc.

Profesor asesor



Ing. Agrónomo Steven Brenes Prendas, M.Sc.

Profesor asesor



Andrés Quirós Castegnaro

Sustentante

DERECHOS DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

El suscrito, Andrés Quirós Castegnaro, cédula 1-1325-0515, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A54428, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación: Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte en suelos, bajo la dirección de M.Sc. Ing. Sergio Sáenz Aguilar, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Andrés Quirós Castegnaro

//2012, mayo, 07

DEDICATORIA

A mis padres, que me dieron su apoyo y amor incondicional a lo largo de este proceso sin importar las decisiones tomadas.

A mis abuelos, que me acompañaron, aconsejaron y me enseñaron el valor del trabajo duro, la humildad y la honestidad.

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor director del proyecto el Ing. Sergio Sáenz Aguilar por todo el apoyo y palabras sabias en los momentos de duda, así como toda la asesoría brindada a lo largo de todo el trabajo.

Al Ing. José Rodríguez Barquero, por todo su apoyo en la concepción inicial del proyecto, así como su aporte de buenas ideas para el desarrollo del mismo.

Al Ing. Agrónomo Steven Brenes Prendas, por todo su apoyo y ayuda en la parte botánica y agronómica del proyecto. Así como su gran ayuda en las giras realizadas para la correcta caracterización de las plantas utilizadas.

A la Ing. Marcia Cordero Sandí, por su apoyo a lo largo del proyecto y por el aporte de buenas ideas para el mismo.

A Yorleny Cruz, Coordinadora de la Red Internacional del Vetiver para Costa Rica, por todo su apoyo en el desarrollo de este proyecto y por brindarme la materia prima necesaria para la realización de los ensayos experimentales. Así como por su ayuda en contactar a los miembros internacionales de esta red.

A Don Francisco Cruz, por toda su hospitalidad y amabilidad así como toda su ayuda en la obtención de las muestras inalteradas para la realización de los ensayos de laboratorio.

A Don Oscar Madrigal, por todo su apoyo a lo largo de este trabajo y por proporcionarme la materia prima necesaria para la realización de los ensayos experimentales.

Al Ing. Oscar Valerio Salas, director del Laboratorio de Suelos del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), por toda su ayuda en la realización de los ensayos de laboratorio, así como su asesoría en los momentos de duda.

A la Ing. Ana Monge Sandí, Coordinadora del Laboratorio de Infraestructura Civil del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), y al Ing. Guillermo Gonzalez Beltrán, por su ayuda en la prueba de falla a tensión de raíces.

A Manrique Vargas, Reiner Molina y a todos los técnicos del Laboratorio de Suelos, así como a todo el personal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) por su gran interés y apoyo a lo largo de la realización de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE CUADROS	12
1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Tema o título	15
1.2 Justificación.....	15
1.2.1 El Problema Específico.....	15
1.2.2 Importancia.....	16
1.2.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	17
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 Marco teórico e hipótesis	18
1.5 Delimitación del problema.....	43
1.5.1 Alcances	43
1.5.2 Limitaciones	44
1.6 Descripción de la metodología a usar	45
2 VEGETACIÓN E INGENIERÍA	48
2.1 Generalidades.....	48
2.2 Métodos de mejoramiento de suelos con vegetación	55
2.2.1 Estaquillado.....	56
2.2.2 Fajinas	58
2.2.3 Escalones de matorral	60
2.2.4 Paquetes de matorrales.....	62
2.2.5 Esteras de matorral	63
2.2.6 Estaquillado de revestimientos porosos de piedra (<i>"Riprap"</i>).....	64

2.2.7 Muros de gaviones con vegetación	66
2.2.8 Mini barreras vivas de control.....	67
2.2.9 Sampeado de piedra con vegetación	69
2.3 Proceso de selección de especies de plantas para estabilización de taludes y control de erosión	70
2.4 Algunas especies nativas del país e introducidas con usos para estabilización de suelos	72
2.4.1 <i>Bambusa vulgaris</i> (mejor conocido como bambú común)	74
2.4.2 <i>Cynodon dactylon</i> (mejor conocido como pasto bermuda o grama)	75
2.4.3 <i>Gliricidia sepium</i> (mejor conocido como Madero Negro).....	77
2.4.4 <i>Panicum maximum</i> (mejor conocido como pasto guinea)	78
2.4.5 <i>Pennisetum purpureum</i> (mejor conocido como pasto elefante)	79
2.4.6 <i>Psidium guajava</i> (mejor conocido como árbol de guayaba).....	80
2.4.7 <i>Chrysopogon zizanioides</i> syn. <i>Vetiveria zizanioides</i> (mejor conocido como pasto vetiver) .	82
2.4.8 Otras plantas y árboles importantes en Costa Rica para la estabilización de taludes	83
3 ENSAYOS EXPERIMENTALES	86
3.1 Descripción de los suelos	86
3.1.1 Sitio de muestreo No. 1	86
3.1.2 Sitio de muestreo No. 2	87
3.1.3 Sitio de muestreo No. 3	89
3.2 Descripción de los ensayos de caracterización y del muestreo	91
3.2.1 Análisis Granulométrico.....	92
3.2.2 Límites de Atterberg.....	93
3.2.3 Clasificación del suelo.....	96
3.3 Resultados de los ensayos de caracterización	97
3.3.1 Ensayos de caracterización: Sitio de Muestreo No. 1.....	97

3.3.2 Ensayos de caracterización: Sitio de Muestreo No. 2.....	99
3.3.3 Ensayos de caracterización: Sitio de Muestreo No. 3.....	101
3.4 Ensayos para determinar la resistencia en laboratorio.....	103
3.5 Resultados de los ensayos para determinar la resistencia en laboratorio	105
3.5.1 Resultados de ensayos de corte directo	105
3.5.2 Resultados de ensayos de falla a tensión de raíces.....	112
3.6 Ensayos para determinar la resistencia en campo.....	113
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	114
4.1 Ensayos de corte directo, sitio de muestreo No. 1	114
4.2 Ensayos de corte directo, sitio de muestreo No. 2	116
4.3 Ensayos de corte directo, sitio de muestreo No. 3	118
4.4 Falla a tensión de haces de raíces de vetiver, sitio de muestreo no. 3	120
5 APLICACIONES	121
5.1 Procedimiento de diseño y análisis de taludes con vegetación	121
5.2 Diseño preliminar de taludes	122
5.2.1 Análisis de taludes utilizando el Software Prati Armati.....	122
5.2.2 Análisis de taludes utilizando el Software Slope/W	132
5.2.3 Análisis de sensibilidad de ϕ y c en la estabilidad con vegetación.....	141
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	145
6.1 Conclusiones.....	145
6.2 Recomendaciones	147
BIBLIOGRAFÍA.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de máquina para ensayo de corte directo.....	21
Figura 1.2 Diagrama de desarrollo del ensayo de corte directo.....	22
Figura 1.3 Estado de esfuerzos en el momento de falla ensayo de corte directo, y su círculo de Mohr.....	23
Figura 1.4 Coeficiente K_s y K_p contra ángulo de fricción.....	24
Figura 1.5 Corrección de área para las distintas formas de caja de corte.....	25
Figura 1.6 Idealización de deformación contra deformación real en la caja de corte ...	26
Figura 1.7 Diagrama del ensayo de veleta.....	27
Figura 1.8 Tipos de deslizamiento.....	28
Figura 1.9 Tipos de deslizamiento en suelos residuales.....	30
Figura 1.10 Crecimiento de las raíces luego de su plantación al sur de China.....	34
Figura 1.12 Incremento del esfuerzo cortante en el suelo para distintas densidades de raíces de vetiver.....	37
Figura 1.14 Geometría de raíces deformadas y sin deformar.....	41
Figura 1.15 Ejemplo del método de elemento finito para modelar taludes con inclusión de raíces de árboles.....	43
Figura 1.16 Diagrama de flujo para la metodología.....	45
Figura 2.1 Formas de crecimiento de plantas.....	52
Figura 2.2 Foto de un muro de criba (<i>crib wall</i>).....	55
Figura 2.3 Estaquillado.....	58
Figura 2.4 Fajinas.....	60
Figura 2.5 Escalones de matorral.....	62
Figura 2.6 Paquetes de matorral.....	63
Figura 2.7 Esteras de matorral.....	64
Figura 2.8 Estaquillado de revestimientos porosos de piedra (" <i>rip rap</i> ").....	65
Figura 2.9 Muros de gaviones con vegetación.....	67
Figura 2.10 Mini barreas vivas de control.....	69
Figura 2.12 Bambusa Vulgaris.....	74
Figura 2.13 Cynodon Dactylon.....	76
Figura 2.14 Gliricidia Sepium.....	77

Figura 2.15 Panicum Maximum.....	78
Figura 2.16 Pennisetum Purpureum.....	80
Figura 2.17 Psidium Guajava.....	81
Figura 2.18 Planta de vetiver floreada (izquierda), talud sembrado con vetiver.....	82
Figura 3.1 Sitios de muestreo seleccionados.....	86
Figura 3.2 Fotografía de un talud con problemas de erosión y movimiento de masa en la calle entre sitios de muestreo 1 y 2.....	88
Figura 3.3 Sitios de muestreo 1 y 2.....	89
Figura 3.4 Sitio de muestreo no. 3.....	90
Figura 3.5 Talud del cual se obtuvieron los especímenes del sitio de muestreo no. 3.....	91
Figura 3.6 Carta de plasticidad.....	95
Figura 3.7 Carta de plasticidad y ubicación de minerales arcillosos dentro de la misma.....	96
Figura 3.8 Análisis granulométrico para sitio de muestreo no. 1.....	97
Figura 3.11 Análisis granulométrico para sitio de muestreo no. 2.....	99
Figura 3.14 Análisis granulométrico para sitio de muestreo no. 3.....	101
Figura 3.18 Moldes de CRB modificados en el LANAMME.....	103
Figura 3.19 Envoltente de falla sitio de muestreo no. 1.....	106
Figura 3.21 Curva de esfuerzo vs. deformación, suelo sin raíces, sitio de muestreo indicado.....	107
Figura 3.22 Curva de esfuerzo vs. deformación, suelo con raíces, sitio de muestreo indicado.....	107
Figura 3.23 Envoltente de falla sitio de muestreo no. 2.....	108
Figura 3.25 Curva de esfuerzo vs. deformación, suelo sin raíces, sitio de muestreo indicado.....	109
Figura 3.26 Curva de esfuerzo vs. deformación, suelo con raíces, sitio de muestreo indicado.....	109
Figura 3.27 Envoltente de falla obtenido sitio de muestreo no. 3.....	110
Figura 3.29 Curva de esfuerzo vs. deformación, suelo sin raíces, sitio de muestreo indicado.....	111

Figura 3.30 Curva de esfuerzo vs. deformación, suelo con raíces, sitio de muestreo indicado.....	111
Figura 3.31 Montaje de los haces de raíces en la máquina MTS (izquierda), espécimen de raíces listo para la falla.....	112
Figura 5.1 Pantalla inicial del software Prati Armati.....	123
Figura 5.2 Pantalla de introducción de datos del software Prati Armati para el suelo limo arcilloso inorgánico.....	124
Figura 5.3 Pantalla de introducción de datos del software Prati Armati para el suelo arena limosa.....	125
Figura 5.4 Gráfico del factor de seguridad para el suelo limo arcilloso inorgánico.....	126
Figura 5.5 Gráfico del factor de seguridad para el suelo arena limosa.....	127
Figura 5.6 Gráfico de área de raíces contra profundidad del suelo, para el limo arcilloso inorgánico.....	128
Figura 5.7 Gráfico de área de raíces contra profundidad del suelo, para la arena limosa.....	129
Figura 5.8 Gráfico de incremento de resistencia al corte contra profundidad del suelo, para el limo arcilloso inorgánico.....	130
Figura 5.9 Gráfico de incremento de resistencia al corte contra profundidad del suelo, para la arena limosa.....	131
Figura 5.10 Geometría del talud imaginario utilizado.....	132
Figura 5.11 Geometría del talud imaginario utilizado reforzado con vetiver.....	134
Figura 5.12 Superficie de falla medianamente superficial del talud sin presencia de raíces.....	135
Figura 5.13 Superficie de falla medianamente superficial del talud con presencia de raíces.....	136
Figura 5.15 Superficie de falla más profunda del talud sin presencia de raíces.....	137
Figura 5.16 Superficie de falla más profunda del talud con presencia de raíces.....	138
Figura 5.18 Superficie de falla superficial del talud sin presencia de raíces.....	139
Figura 5.19 Superficie de falla superficial del talud con presencia de raíces.....	140
Figura 5.21 Superficie de falla más crítica.....	141
Figura 5.22 Superficie de falla más crítica en talud reforzado con raíces.....	142
Figura 5.23 Superficie de falla con un F.S cercano a 1,5.....	143

Figura 5.24 Superficie de falla con un F.S cercano a 1,5 ahora con raíces.....	144
--	-----

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.11 Diámetro promedio y resistencia a la tensión promedio de raíces de varios pastos.....	36
Cuadro 1.13 Incremento de los parámetros de resistencia del suelo ensayado con distintas densidades de raíces de vetiver.....	38
Cuadro 2.11 Características de las plantas que determinan su adecuación a funciones de bioingeniería de suelos.....	73
Cuadro 2.19 Plantas utilizadas comúnmente en la estabilización de taludes.....	85
Cuadro 3.9 Valores obtenidos para el límite líquido, límite plástico e índice plástico de sitio de muestreo no. 1.....	98
Cuadro 3.10 Valores importantes para la clasificación del suelo para sitio de muestreo no. 1.....	98
Cuadro 3.12 Valores obtenidos para el límite líquido, límite plástico e índice plástico de sitio de muestreo no. 2.....	99
Cuadro 3.13 Valores importantes para la clasificación del suelo para sitio de muestreo no. 2.....	100
Cuadro 3.15 Valores obtenidos para el límite líquido, límite plástico e índice plástico de sitio de muestreo no. 3.....	101
Cuadro 3.16 Valores importantes para la clasificación del suelo para sitio de muestreo no. 3.....	102
Cuadro 3.17 Comparación de los grupos de suelo en los sistemas AASHTO y SUCS.....	103
Cuadro 3.20 Humedades de ensayo sitio de muestreo no. 1.....	106
Cuadro 3.24 Humedades de ensayo sitio de muestreo no. 2.....	108
Cuadro 3.28 Humedades de ensayo sitio de muestreo no. 3.....	110
Cuadro 3.32 Resistencia a tensión de haces de raíces de vetiver.....	113
Cuadro 3.33 Resistencia promedio a la tensión de haces de raíces de vetiver.....	113
Cuadro 4.1 Efectos de las raíces sobre la cohesión y ángulo de fricción para sitio de	115

muestreo no. 1.....	
Cuadro 4.2 Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte para el suelo del sitio de muestreo no. 1, para las distintas cargas normales.....	115
Cuadro 4.3 Efectos de las raíces sobre la cohesión y ángulo de fricción para sitio de muestreo no. 2.....	116
Cuadro 4.4 Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte para el suelo del sitio de muestreo no. 2, para las distintas cargas normales.....	117
Cuadro 4.5 Efectos de las raíces sobre la cohesión y ángulo de fricción para sitio de muestreo no. 3.....	118
Cuadro 4.6 Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte para el suelo del sitio de muestreo no. 3, para las distintas cargas normales.....	119
Cuadro 4.7 Humedades de falla de muestras de suelo con y sin raíces.....	119
Cuadro 5.14 Factores de seguridad y sus incrementos para casos con y sin raíces de la superficie de falla medianamente superficial.....	136
Cuadro 5.17 Factores de seguridad y sus incrementos para casos con y sin raíces de la superficie de falla más profunda del talud.....	138
Cuadro 5.20 Factores de seguridad y sus incrementos para casos con y sin raíces de la superficie de falla más superficial.....	140

Quirós Castegnaro, Andrés
Efectos de las raíces sobre la resistencia al corte en suelos
Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:
A. Quirós, C., 2012
xiv, 139 [0]h; ils. Col. – 48 refs.

RESUMEN

Se realiza un análisis del incremento en la resistencia al corte en suelos proporcionado por las raíces de las plantas, para el posterior desarrollo de una metodología de diseño de taludes tomando en cuenta los efectos de dichas raíces.

El desarrollo de la metodología de diseño, se basó en el uso de información experimental, obtenida a partir de la realización de distintos ensayos de laboratorio; así como de modelos matemáticos que reflejen el comportamiento mecánico del suelo con presencia de raíces.

A partir de una extensiva revisión bibliográfica y la realización de ensayos experimentales en el laboratorio, se logró encontrar un método de bajo costo y sencillo para evaluar el efecto de las raíces en la estabilidad de taludes. Esto se consigue mediante la realización de ensayos de resistencia a la tracción de raíces de la planta que se desea evaluar. Además, se desarrolló un procedimiento de diseño conciso que permite incluir los efectos de la vegetación en la resistencia al corte a lo largo de una superficie de falla de un talud. Finalmente, se propone una metodología para introducir los efectos de las raíces en la estabilidad de taludes mediante el uso del método de equilibrio límite. A.Q.C.

BIOINGENIERÍA, BIOTÉCNIA, ESTABILIDAD DE TALUDES, MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE, RESISTENCIA A TRACCIÓN DE RAÍCES, CORTE DIRECTO, SISTEMAS DE RAÍCES.

Ing. Sergio Sáenz Aguilar, M.Sc.

Escuela de Ingeniería Civil

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Tema o título

Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte en suelos.

1.2 Justificación

1.2.1 El Problema Específico

La creciente preocupación por el medio ambiente ha hecho que la búsqueda de soluciones ingenieriles amigables con la naturaleza tanto para la construcción en general, como para la mitigación de desastres naturales, se vuelva una actividad imprescindible para el desarrollo sostenible de todo país.

Por la búsqueda de nuevas opciones para vivir así como por el crecimiento desordenado de la población, la deforestación se ha generalizado en los alrededores de la GAM (sin nombrar la que ya se ha dado extensivamente en los cantones más desarrollados económicamente), convirtiendo así suelos que antes eran estables en suelos problemáticos.

En el transcurso de los últimos años, se han presentado una amplia gama de problemas en relación con la estabilidad de los taludes ubicados en distintas rutas nacionales de gran importancia. Las soluciones propuestas para estos problemas no siempre son las más adecuadas en materia ambiental; esto se debe a que estos taludes no fueron bien construidos por diversas razones. Sin embargo de haberse aplicado a tiempo métodos preventivos en vez de correctivos, tal vez el problema no hubiera sido tan grave. Es aquí donde entra el tema del reforzamiento de suelos con vegetación, como una alternativa que ha sido usada ampliamente, aplicando conocimientos tanto de una manera empírica como a través de la experiencia.

En Costa Rica hay una abundancia de suelos arcillosos y limosos tanto en el valle central como en las afueras del mismo. Por esta razón, el estudio de alternativas más atractivas en términos económicos así como sostenibles es muy importante para tratar de lograr una generalización en el uso de métodos alternativos para el mejoramiento de suelos como lo es la vegetación.

Este proyecto tiene como finalidad obtener analizar la influencia de las raíces en la resistencia de suelos. Para ello se obtienen valores de resistencia al corte para suelos arcillosos de alta plasticidad, así como suelos limosos arenosos para su posterior comparación con los mismos suelos pero reforzados con vegetación. Se estudiarán los efectos del pasto Vetiver (*Chrysopogon Zizanoides*). Una de las variedades más comunes de poáceas utilizadas en la estabilización de taludes. Con estos datos se podrá evaluar el efecto de este tipo de vegetación sobre la resistencia del suelo.

1.2.2 Importancia

Los movimientos de tierra en todo proyecto deben ser realizados con especial cuidado debido a las implicaciones que la resistencia del suelo tiene sobre todas las estructuras que se cimentan sobre este, en especial cuando los suelos son finos y de resistencias bajas.

En ocasiones los constructores de un proyecto tienen dificultades de espacio para poder reducir la pendiente de los taludes según lo que dicen las leyes básicas de la mecánica de suelos. Muchas veces inclusive estos taludes no fallan inmediatamente, pero después de un tiempo lo hacen y generan grandes pérdidas al país y a las empresas constructoras, así como a las familias que se vean afectadas por el deslizamiento o desprendimiento.

Generalmente, los taludes fallan de manera superficial y no de manera profunda. Esto se debe en gran parte a la meteorización o degradación de los mismos, a factores externos como la lluvia o la forma inadecuada en que escurre el agua en el terreno alterado. También fallan como consecuencia de efectos sísmicos o de múltiples alteraciones realizadas por el hombre (Porrás, 2000).

La deforestación es un factor que incide directamente en la erosión, desestabilizando los suelos. Además, no siempre es necesario diseñar obras masivas o muy complejas para corregir estos taludes. Una manera de prevenir la falla, es diseñando refuerzos utilizando vegetación y así contar con el aumento de resistencia en los suelos cuando exista este tipo de refuerzo.

“Cuando es apropiadamente instalada y preservada, la vegetación puede proteger taludes al reducir la erosión, reforzar el suelo e inhibir los deslizamientos, lo cual incrementa la estabilidad de los taludes. El uso de la vegetación para controlar la erosión y proteger los taludes es relativamente barato, no requiere maquinaria pesada sobre el talud, restablece los

hábitats naturales y mejora la calidad estética del mismo.” (fuente: <http://www.ecy.wa.gov/programs/sea/pubs/93-30/index.html>)

También es importante tomar en cuenta que la ubicación privilegiada del país en cuanto a clima y fertilidad de los suelos, favorece el crecimiento de la vegetación por lo que la alternativa de mejorar las características de los suelos con vegetación es muy atractiva tanto en términos de costos como en términos de belleza en las obras.

En el país hay dos tipos de vegetación que han sido ampliamente utilizados y que por lo general han dado buenos resultados, estos son el pasto Vetiver y el pasto Estrella. Dos especies de gramíneas con propiedades radicales aptas para la estabilización superficial de laderas. Ambos han sido escogidos para la realización de este estudio, debido a la importancia que tendrían los datos obtenidos para futuros diseños de refuerzos de taludes o de suelos en general con estos pastos.

1.2.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

En el país se han hecho relativamente pocos estudios sobre el tema del uso de la vegetación para reforzar suelos y en general han sido más que todo, documentos descriptivos.

Porras (2000) en su proyecto de graduación denominado “Uso de la vegetación para la estabilización de taludes”, establece un marco teórico adaptado a la situación de Costa Rica en relación con las técnicas de mejoramiento y conservación de suelos, basados en el uso de vegetación. Además realiza una evaluación de la aplicabilidad de los sistemas de protección y estabilización de taludes haciendo uso de técnicas de bioingeniería de suelos y sistemas biotécnicos. También plantea una metodología general para la selección de sistemas de bioestabilización para la corrección de problemas de estabilidad y erosión en los taludes.

Más adelante, Fernandez (2011) en su proyecto de graduación denominado “Guía práctica para control de erosión superficial en taludes usando vegetación nativa de Costa Rica” investiga las posibles especies de vegetación nativas de Costa Rica y sus usos para el control de la erosión. También, realizó el trabajo de clasificar las especies vegetativas según las Zonas de Vida del país en las que crecen y realizó pruebas de campo para comparar varias técnicas de control de erosión de taludes utilizadas en Costa Rica. Además creó una guía de uso práctico para diseñar, ejecutar y mantener proyectos de control de erosión superficial.

En el presente trabajo se determina el aumento en la resistencia del suelo causado por el uso de la vegetación, en específico evaluando la efectividad de pasto vetiver.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar de manera experimental el aumento de la resistencia al corte en suelos limosos y arcillosos de alta compresibilidad así como en suelos limosos arenosos causado por las raíces del pasto vetiver.

1.3.2 Objetivos específicos

- Investigar la bibliografía existente tanto en lo referente a los aspectos teóricos como prácticos en el uso de vegetación para reforzar los suelos.
- Definir sitios adecuados para el muestreo de suelos que cumplan con los requisitos de esta investigación.
- Determinar los parámetros de resistencia al corte (ángulo de fricción y cohesión) de los suelos analizados tanto con la presencia como sin la presencia de raíces.
- Comprobar la eficiencia del reforzamiento de suelos con vegetación en términos de los parámetros de resistencia al corte.
- Realizar un diseño teórico de un talud utilizando los datos obtenidos en las pruebas y el análisis.

1.4 Marco teórico e hipótesis

Es muy importante clasificar los suelos, pues teniendo idea de sus propiedades físicas; así como de su composición química, se puede conocer de manera preliminar el comportamiento esperado para los distintos tipos de suelo. También, sus características de resistencia o sus propiedades de deformabilidad.

Los suelos se caracterizan tanto por la composición del tamaño de las partículas; así como por su micro y macro estructura mineral. Los tamaños de las partículas que componen los suelos varían en un amplio rango. En general los suelos se pueden clasificar como gravas, arenas, limos y arcillas; siendo estos últimos los que poseen menor tamaño de partículas.

Los minerales arcillosos son una parte importante de los suelos de grano fino y en ocasiones hasta de los de grano grueso. Están formados por silicatos de aluminio complejos que a su vez están compuestos por dos unidades básicas un tetraedro de silicio y un octaedro de aluminio. Cada tetraedro está constituido por cuatro átomos de oxígeno que rodean un átomo de silicio y cada octaedro está formado por seis hidroxilos rodeando un átomo de aluminio, algunas veces el aluminio es reemplazado por átomos de magnesio (Das, 2006).

Un parámetro de suma importancia a la hora de caracterizar un suelo es su resistencia al corte. Toda modelación del fenómeno de falla debida al cortante de un suelo se obtiene a partir de las teorías básicas de la resistencia de materiales. Según las teorías establecidas por Coulomb a finales de los años 1700, que luego fueron mejoradas por Terzaghi y Fredlund, se establece la ecuación generalizada de Coulomb tanto para suelos saturados como parcialmente saturados cuyas expresiones son:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan\phi' \text{ (Suelos saturados)} \quad \text{Ec. 1-1}$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan\phi' + (\mu - \mu_a) \tan\phi'' \text{ (Suelos no saturados)} \quad \text{Ec. 1-2}$$

Donde:

τ : Esfuerzo de resistencia al corte.

c' : Cohesión efectiva.

σ : Esfuerzo normal total.

μ : Presión de poro causada por el agua.

μ_a : Presión intersticial causada por aire.

ϕ' : Ángulo de fricción interna del material.

ϕ'' : Ángulo de fricción interna del material no saturado.

La "cohesión" es debida a la cementación o atracción que se genera tanto por las fuerzas intermoleculares entre las partículas de suelo; así como la interacción de las mismas con las partículas de agua. Este parámetro varía de acuerdo al contenido de humedad del suelo. En suelos eminentemente granulares no existen materiales cementantes por lo que la cohesión es considerada nula.

El ángulo de fricción interna del material es causado por fuerzas internas de fricción presentes en el suelo inherentes a la rugosidad, tamaño y forma de las partículas del mismo; así como a la densidad de la configuración de estas partículas y la granulometría.

Un concepto importante para tomar en cuenta es el de esfuerzos efectivos, debido a que en suelos saturados la presencia del agua entre los poros toma cierta parte de las fuerzas que son aplicadas sobre el suelo. Lo cual quiere decir que la micro estructura del suelo no se lleva toda la carga. Los esfuerzos tomados por el esqueleto de suelo son los esfuerzos efectivos. A estos ya se les ha restado la influencia del agua presente en los poros del suelo, que genera una resistencia aparente del suelo mayor a la real.

Existen varias maneras para determinar la resistencia al corte en un suelo, tanto en campo como en laboratorio. A continuación se comentará uno de los ensayos más comunes para determinarla en laboratorio y que servirá a lo largo de este trabajo para obtener estos parámetros.

El ensayo de corte directo es uno de los más comunes para obtener la resistencia al corte de los suelos. Esto se debe a la simpleza y economía con que se puede realizar este ensayo, que da la posibilidad al investigador de realizar una gran cantidad de pruebas en tiempos relativamente cortos.

Sin embargo, presenta varios inconvenientes debido al poco control que se tiene sobre las condiciones de drenaje del suelo así como la dificultad para medir las presiones de poro. Además la misma estructura mecánica de las maquinas a veces genera problemas.

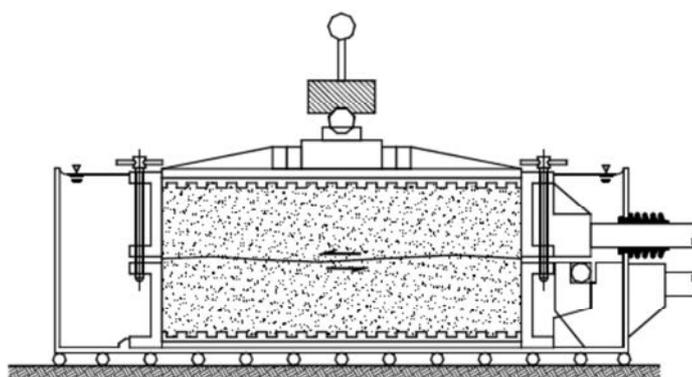
“El ensayo de corte directo es de uso obligatorio cuando se trabaja a niveles bajos de esfuerzos o cuando se desea obtener la resistencia a lo largo de discontinuidades.” (Suarez, 1998)

El ensayo posee también la desventaja de que la superficie de falla es predeterminada y no necesariamente se da en el plano más débil del suelo. Por esta razón los valores de la resistencia obtenidos tienden a ser mayores que a los obtenidos en pruebas triaxiales que tienden a representar la realidad del suelo de manera más fiel.

Este ensayo consiste en colocar la muestra de suelo en una caja compuesta por dos anillos uno encima del otro que pueden desplazarse horizontalmente con respecto al otro al recibir

la aplicación de una fuerza cortante. Se presenta una dificultad para saturar las muestras completamente, sin embargo si las muestras son sumergidas por largo tiempo antes de la realización del ensayo, se puede obtener un alto grado de saturación. Según Suarez (1998), se debe tener mucho cuidado en los efectos de saturación sobre algunos materiales, en especial los materiales expansivos. En la figura 1.1 se muestra una figura esquemática de la caja para ensayo de Corte Directo.

Figura 1.1 Esquema de máquina para ensayo de Corte Directo



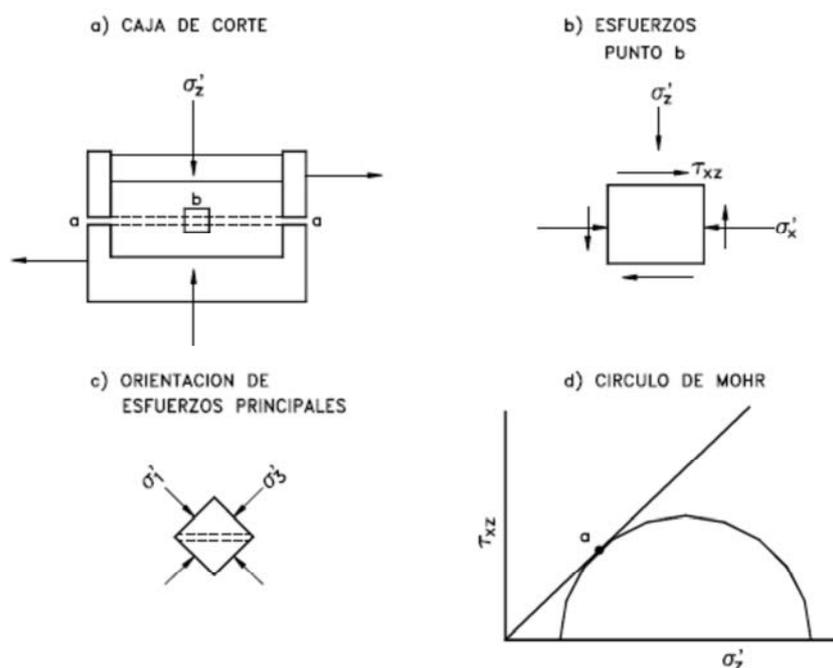
Fuente: Suarez, 1998.

La tasa de corte o velocidad con que se aplica la carga en la prueba es muy importante y depende de las condiciones de drenaje a las que se quiera realizar la prueba así como de la permeabilidad de la muestra. Por la naturaleza de este ensayo, se dificulta la realización del mismo en condición completamente drenada o completamente no drenada en un ensayo de tasa constante de corte. Sin embargo y según Suarez (1998), en la práctica se pueden seleccionar distintas tasas de corte para que la desviación de las condiciones reales del suelo no sea tan significativa. Por ejemplo Head (1982) recomienda un tiempo de falla para un ensayo de corte drenado $t_f = 12,7t_{100}$, donde t_{100} es el tiempo correspondiente al 100% de consolidación primaria. La norma ASTM D 3080 recomienda $t_f = 50 t_{50}$, donde t_{50} corresponde al 50% de la consolidación primaria.

En este trabajo se analizarán suelos finos (limos y arcillas). Para este tipo de suelos se recomiendan velocidades máximas de 0,08 mm/minuto para ensayos drenados y velocidades máximas de 1,6 mm/minuto para ensayos no drenados.

En la figura 1.2 se presentan los diagramas del desarrollo del ensayo de corte directo.

Figura 1.2 Diagrama del desarrollo del ensayo de Corte Directo.

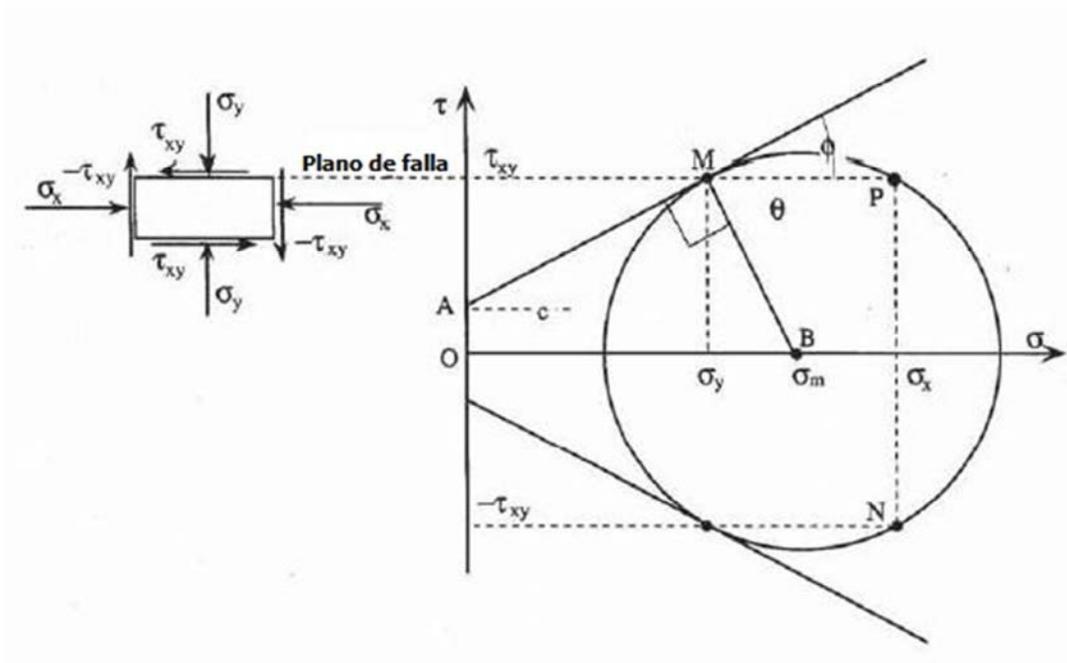


Fuente: Suarez, 1998.

Durante el ensayo de corte directo, el estado de esfuerzos no está completamente definido ya que " σ " y " τ " solo pueden ser medidos en la superficie horizontal, mientras que son indeterminados en otras superficies. Por esta razón el círculo de Mohr se dibuja en el momento de la falla, asumiendo que el plano de falla es horizontal y el estado de esfuerzos es uniforme. Como se muestra en la siguiente figura, el punto M, representa el esfuerzo en la superficie horizontal, mientras que el punto N el esfuerzo en la superficie vertical.

En la figura 1.3 se presenta el estado de esfuerzos en el momento de la falla para el ensayo de corte directo y su círculo de Mohr.

Figura 1.3 Estado de esfuerzos en el momento de falla, ensayo de corte directo, y su círculo de Mohr.

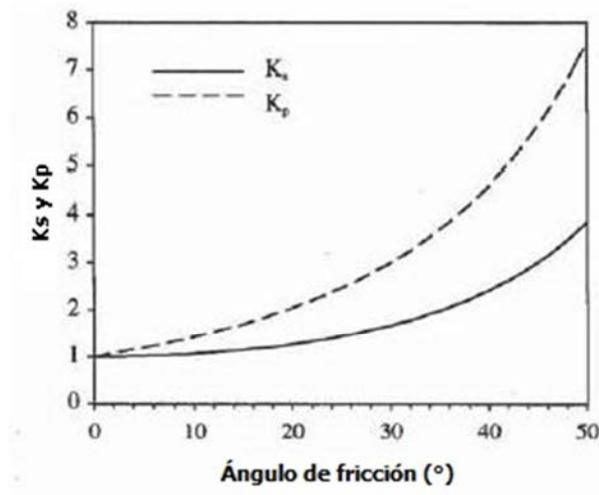


Fuente: Modificada de Bardet, 1997.

El polo P es en la misma línea horizontal que el punto M cuando el plano de falla es horizontal. El círculo de Mohr en el punto de falla es tangente a AM, y su centro está en B y es dado por la línea MB que es perpendicular a AM. Por lo tanto los esfuerzos normales σ_x y σ_y actuando en la superficie vertical y horizontal respectivamente, se relacionan mediante:

$$\sigma_x = 2c \tan \phi + K_s \sigma_y \text{ y } K_s = 1 + 2 \tan^2 \phi \quad \text{Ec. 1-3}$$

Como se aprecia en la siguiente figura, K_s es mayor a 1 e incrementa conforme aumenta el valor de ϕ , pero se mantiene menor al coeficiente K_p de la teoría de Rankine para el empuje pasivo de suelos ($K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$). En la figura 1.4 se puede apreciar como varían los coeficientes K_s y K_p contra el ángulo de fricción.

Figura 1.4 Coeficientes K_s y K_p contra ángulo de fricción

Fuente: Modificada de Bardet, 1997.

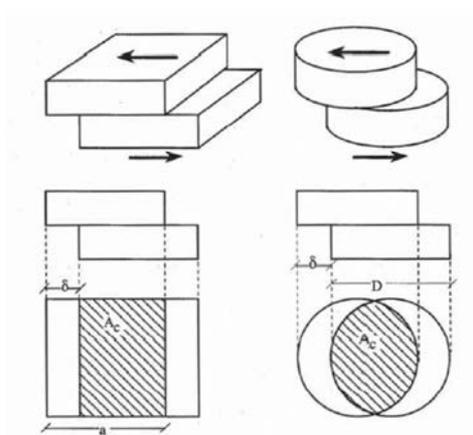
Es posible notar que el área entre las dos mitades del espécimen va variando de acuerdo con el desplazamiento relativo δ entre las partes de arriba y de abajo de la caja de corte. Por lo que se debe corregir el área, en este caso para la investigación se utilizó una caja de corte de sección circular, por lo que la corrección de área es la siguiente (ver figura 1.5):

$$A_c = \frac{D^2}{2} \left(\theta - \frac{\delta}{D} \text{sen}\theta \right) \quad \text{Ec. 1-4}$$

Donde $\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\delta}{D} \right)$ en radianes.

En la figura 1.5 se observa la corrección de área que se debe hacer para para calcular los esfuerzos en el ensayo de corte directo, para las distintas formas de caja de corte.

Figura 1.5 Corrección de área para las distintas formas de caja de corte.



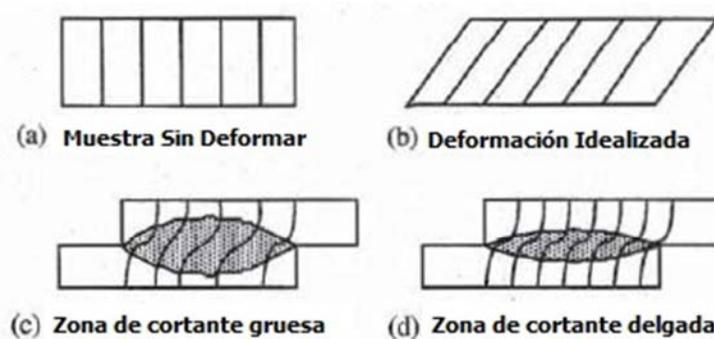
Fuente: Bardet, 1997.

Por lo tanto $\sigma = N/A_c$ y $\tau = T/A_c$ y el error asociado al esfuerzo resultante por efectos del error en el área de contacto sería para la caja de corte circular de:

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{A - A_c}{A} = 1 - \frac{2\theta}{\pi} + \frac{2\delta}{\pi D} \text{sen}\theta \text{ ya que } A = \frac{\pi D^2}{4}$$

En el ensayo de corte directo, la respuesta del material es reportada con respecto al desplazamiento debido al cortante en vez de a la deformación debida al cortante. Esto se debe a que no es posible conocer la deformación a cortante. Como se puede apreciar en la figura 1.6, en este ensayo, la deformación nunca es uniforme, ya que esta se concentra en las zonas de cortante en la interface entre la caja superior y la inferior. Además el suelo falla en los bordes de la caja de corte antes de que falle el centro.

Figura 1.6 Idealización de deformación contra deformación real en la caja de corte



Fuente: Modificada de Bardet, 1997.

Para la realización de este trabajo se decidió trabajar con ensayos de corte directo no consolidado, no drenado, esto debido a que para las aplicaciones en las que se enfoca esta investigación (estabilidad y protección de taludes), los suelos no deberían presentar altos niveles de consolidación. Por otro lado al ser la época lluviosa la más propensa a generar desestabilidades y posibles deslizamientos en las masas de suelo se decidió no realizar ensayos drenados. Por esta razón se escoge una velocidad de corte de 1,6 mm/min que no le permite al suelo drenar el agua contenida en él. En realidad, el parámetro de la velocidad de corte es secundario. Lo interesante en este caso, es mantener la velocidad constante para todas las muestras y determinar el aumento en la resistencia que generan las raíces.

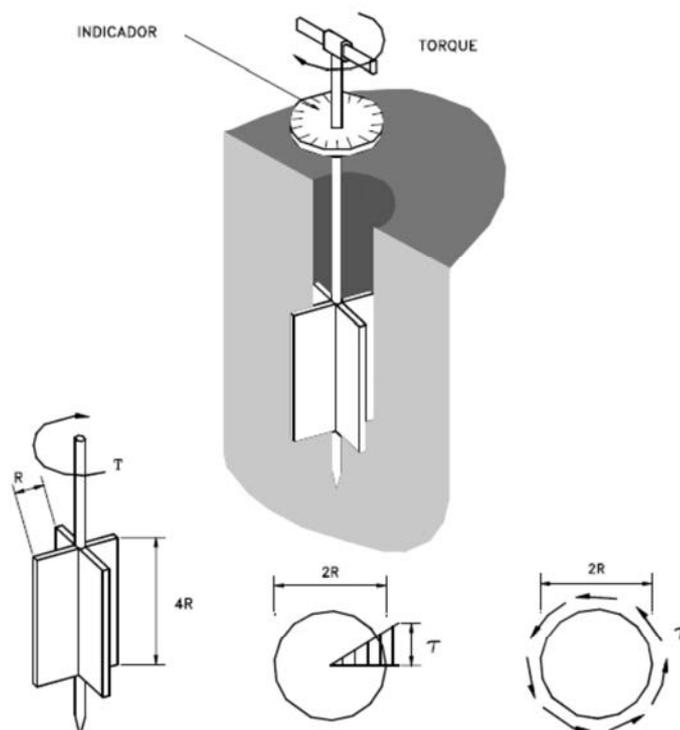
Lo anterior es la base para el modelado utilizado para analizar tanto la estabilidad de los taludes o laderas como los deslizamientos. Por otro lado, otra prueba importante para el desarrollo de esta investigación es el ensayo de veleta. Este es un ensayo de campo mediante el cual se puede determinar la resistencia al corte de un suelo esencialmente arcilloso. La prueba consiste en insertar una veleta en el suelo y luego aplicarle un torque para producir la falla a lo largo de una superficie cilíndrica. Luego la resistencia al corte se obtiene igualando el torque al momento producido por los esfuerzos de cortante sobre dicha superficie cilíndrica.

La desventaja del ensayo de veleta es que su aplicación está limitada a suelos cohesivos lo suficientemente blandos como para permitir el hincado y rotación de la veleta. A pesar de esto, para la presente investigación resulta un instrumento conveniente para medir la

resistencia al corte en las condiciones naturales del suelo. Este ensayo puede ser realizado en excavaciones pre-perforadas o empujando la veleta hasta la profundidad deseada.

En la figura 1.7 se presenta un pequeño diagrama que ejemplifica el ensayo de veleta.

Figura 1.7 Diagrama del ensayo de veleta.



Fuente: Suarez, 1998.

A este nivel, es importante introducir el concepto de estabilidad de taludes, que se refiere a los análisis teóricos para determinar las fuerzas que actúan sobre un talud, para evaluar la posibilidad de movilización de la masa de suelo o roca.

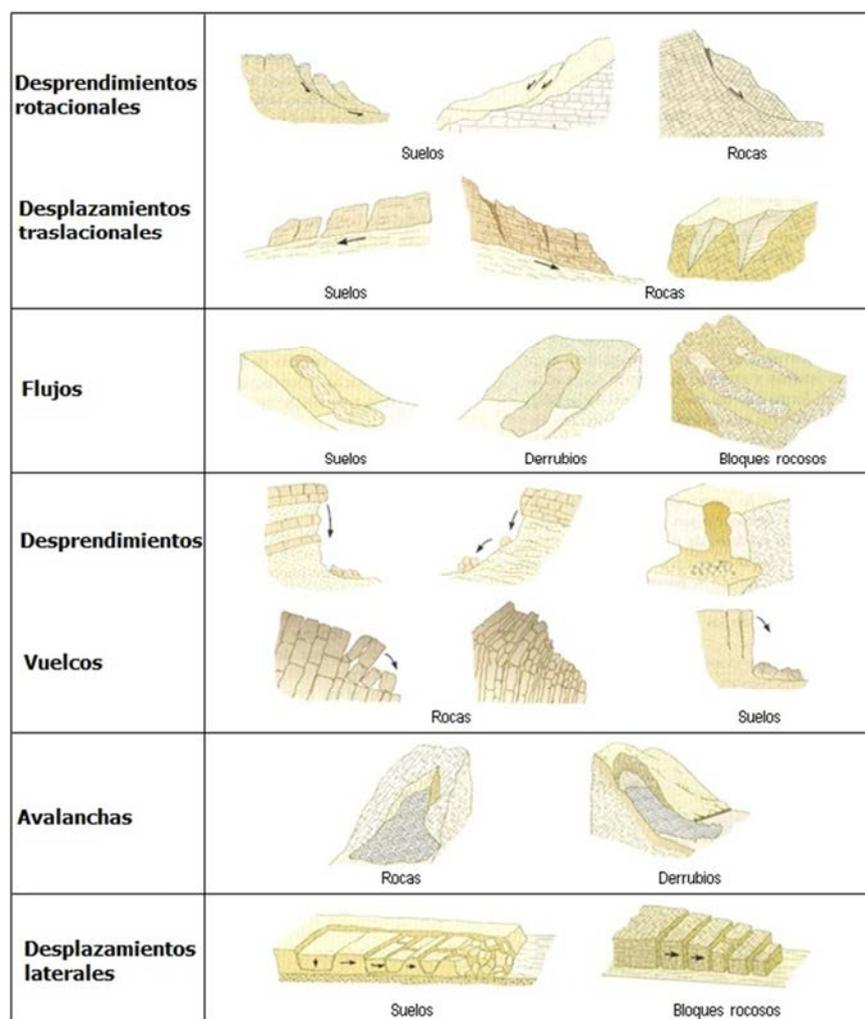
Existen dos tipos de fuerzas que pueden intervenir en este análisis, las fuerzas resistentes y las desestabilizadoras.

A la hora de realizar dicho análisis es muy importante identificar muy bien las fuerzas que están actuando sobre el talud. Por ejemplo, las fuerzas resistentes por lo general son la fricción o la resistencia al corte del suelo o el mismo peso de la masa de suelo que bajo

ciertas circunstancias puede llegar a equilibrar el suelo. Por otra parte, las fuerzas desestabilizadoras pueden ser causadas por sobrecargas externas, masas de tierra en posiciones desfavorables, esfuerzos hidrostáticos o bien por efectos de sismo.

Antes de realizar un enfoque específico a los suelos del país, se deben enumerar los tipos de deslizamientos que se pueden dar en las diferentes masas de suelo y roca. Estos se muestran en la figura 1.8.

Figura 1.8 Tipos de deslizamientos.



Fuente: Modificado de Vallejo, et al., 2002.

Para el desarrollo de este trabajo es muy importante tomar en cuenta que existen diferentes tipos de suelos según su origen geológico. En este trabajo se analizaron los suelos residuales.

Los suelos residuales difieren considerablemente de los suelos transportados ya que por su origen y consistencia pueden variar muchísimo sus propiedades. Las propiedades de estos suelos son controladas por la micro y macro fábrica; así como las juntas existentes y otros detalles estructurales.

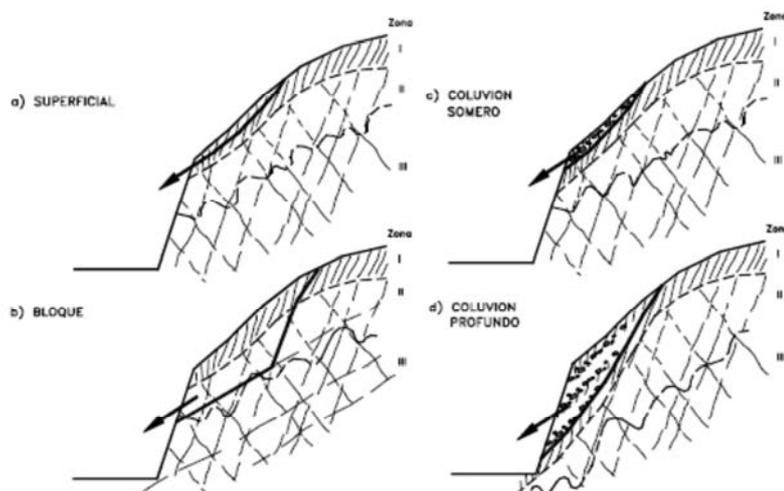
En el valle central de Costa Rica, debido a su condición climática y geográfica, la gran mayoría de los suelos son finos. El cálculo de la estabilidad de taludes en estos suelos es complicado debido a la amplia gama de factores que influyen, tanto por la variabilidad de las precipitaciones como la del régimen hidrológico y las altas temperaturas. Se suman a esto los factores topográficos generalmente desfavorables por pendientes escarpadas así como la variabilidad geológica.

La dificultad se acentúa, debido a que las teorías más populares de estabilidad han sido desarrolladas en zonas no tropicales de mayor desarrollo, que tienen en general suelos de mejor calidad por lo que la aplicabilidad de tales teorías es cuestionable. Esto se debe a la extensa meteorización que se da en todos los estratos de los suelos tropicales.

Es importante analizar los tipos y mecanismos de falla específicos para los suelos residuales. Este trabajo se centrará en los deslizamientos superficiales que son los que pueden ser evitados y controlados por los efectos de las raíces en de la vegetación. Sin embargo existen otros tipos de falla que se dan en estos tipos de suelos como deslizamientos profundos o deslizamientos de grandes bloques de suelo que no serán estudiados en este trabajo.

La figura 1.9 ejemplifica los tipos de falla más comunes en suelos residuales. En ella se pueden observar los tipos de falla superficial, profunda y de bloque mencionadas arriba.

Figura 1.9 Tipos de deslizamientos en suelos residuales.



Fuente: Deere y Patton, 1971.

Además de estos movimientos existen dos adicionales. El primero es la reptación o *creep* que está relacionado con el flujo plástico del suelo a largo plazo. Es un movimiento muy lento y continuo, y afecta a la capa más superficial del terreno o talud. Es el resultado de dos movimientos, el de expansión por hidratación y retracción por deshidratación.

La reptación se puede observar en la zona de Puriscal y los cerros de Escazú y Santa Ana así como en las partes altas de San Carlos. Se evidencia porque produce arqueamiento en los árboles así como inclinaciones en cercas divisorias de propiedades o en los postes de tendido eléctrico. En la parte baja de los taludes o laderas se produce una acumulación de material, con el paso del tiempo se hacen evidentes hondas del flujo en la superficie del zacate.

El segundo movimiento es la colada de barro, en que materiales blandos con altísimos contenidos de agua se desplazan en favor de la pendiente. Se caracterizan por presentar un flujo continuo y rápido. Pueden ser ocasionados por erupciones volcánicas o movimientos sísmicos que fluidifican la tierra.

En nuestro país y en general en todos los países el desarrollo económico y social no sostenible tiene como secuela un deterioro ambiental. Este surge a partir de las necesidades siempre crecientes de vivienda para las poblaciones. Esto genera deforestación generalizada en zonas antes boscosas u ocupadas por cultivos extensivos, que antes protegían al suelo de los efectos de la erosión y es aquí donde comienzan los problemas de estabilidad. Las raíces

de los distintos tipos de vegetación tienen efectos positivos tanto como negativos en la prevención de deslizamientos.

Antes de entrar en específico en el tema de la vegetación se deben introducir algunos conceptos importantes.

Por erosión se entiende, el proceso desprendimiento, transporte y depósito de materiales del suelo o roca por la acción de un agente externo. Las tierras sin cobertura vegetal son más propensas a sufrir alteraciones por efectos de la erosión. Estas alteraciones nunca son favorables en cuanto a la estabilidad o resistencia del suelo.

En nuestro medio, uno de los agentes erosivos más importantes es el agua, ya sea agua que escurre o fluye sobre las laderas, o agua en forma de precipitación que golpea la superficie libre de los suelos. El problema de la erosión no se da a profundidad sino que se da a nivel muy superficial y comprende las fuerzas que están actuando en la superficie. Un factor de gran influencia es la geometría y localización de las partículas expuestas, estas son soltadas y separadas unas de otras por procesos electroquímicos.

La erosionabilidad es el nombre con que se denomina la susceptibilidad del suelo a ser erosionado y tiene relación tanto con las propiedades físico-químicas del suelo como con sus estructuras inter partícula. En los casos de suelos tropicales estas propiedades son muy complejas. Varios aspectos influyen además en la erosionabilidad como lo son las características del material antes mencionadas, la velocidad de las corrientes de agua, la intensidad y fuerza de la precipitación y la vegetación.

“La vegetación contribuye a reducir significativamente el nivel de amenaza y el riesgo de ocurrencia de la erosión. La lluvia es parcialmente interceptada por el follaje, amortiguando el impacto de las gotas de lluvia contra la superficie del suelo. Adicionalmente las raíces refuerzan las capas subsuperficiales (sic) del perfil, creando una malla de refuerzo que protege contra los efectos del flujo de agua.” (Suarez, 1998)

Es aquí donde se origina el caso de estudio de este informe. A fin de comprender cómo afectan las raíces en la resistencia al corte de los suelos. En general la vegetación tiene varios aspectos muy positivos en cuanto a la protección del suelo. ¿Pero lo tendrá en relación con el aumento de la resistencia al corte? Es interesante notar el efecto de aislamiento que

causa la vegetación sobre el suelo, ya que según López (1999), modifica el microclima de la superficie del suelo y reduce las variaciones de temperatura y humedad. Disminuye además la agresividad de los procesos de erosión y meteorización mecánica que actúan destruyendo la estructura del suelo.

Las raíces generan además un efecto de sujeción y confinamiento en el suelo, cualquier planta que tenga raíces con profundidades entre 1 y 12mm retienen las partículas de suelo evitando su desplazamiento frente a movimientos causados por las fuerzas gravitacionales, el viento y la lluvia. Según López (1999), para estos efectos son más efectivas las plantas que presenten un sistema de raíces, somero y extendido a las que tengan un sistema vertical y pivotante, lo cual significa que tiene una raíz principal larga y profunda.

Las raíces tienen la capacidad de formar un almacén de fibras complejo que se entrelazan entre sí, reforzando la estructura e incrementando su resistencia al deslizamiento. Por lo tanto la acción de las raíces debería ser similar a la de los sistemas artificiales de reforzamiento de suelo. Las fibras formadas por las raíces tienen una resistencia a la tracción y un comportamiento adhesivo relativamente alto; así que son un buen complemento para la matriz de suelo que tiene una resistencia a la tracción muy deficiente y baja.

Las poáceas, familia a la cual pertenecen los dos pastos que se analizarán en este estudio, así como las leguminosas herbáceas y los arbustos pequeños tienen una acción reforzadora que se evidencia a profundidades entre los 0,75 y 1,5 m en los perfiles de suelo.

En general, la magnitud del efecto del reforzamiento mecánico según López (1999) es función de las siguientes propiedades de las raíces: densidad del enraizamiento, resistencia a la tracción, módulo de tracción, relación entre longitud y diámetro, rugosidad superficial, índice de alineamiento de las raíces (por ejemplo rectitud/angulosidad) y por último la orientación con respecto a la dirección del esfuerzo principal. Las especies perennes se caracterizan por tener raíces con resistencias altas. Es aquí donde se justifica el uso del pasto vetiver.

Es importante recalcar que dentro de una misma especie, se puede dar un rango de variación amplio con respecto a la resistencia; pues esta depende de varios parámetros como tamaño, edad, estado de las raíces, estación del año y otros.

Estudios demuestran que las raíces sí proporcionan un aumento en la resistencia al corte por el mayor grado de cohesión interna que tiene la estructura raíz-suelo y la adhesión de las partículas de suelo a las raíces. Este incremento de la cohesión es proporcional a la densidad o concentración de raíces, medida como masa de raíces por unidad de volumen. Otra manera de estudiar la densidad de las raíces es a partir de la relación raíces/superficie que es la proporción de raíces en una determinada superficie de suelo. Estas relaciones obtenidas no son constantes para las distintas especies, sino que varían tanto por el tipo de vegetación como por el tipo de suelo.

Existen casos en los que la cohesión del suelo se incrementa de manera exponencial al aumentar la densidad de las raíces mientras que en otros casos el incremento se da solamente de manera lineal.

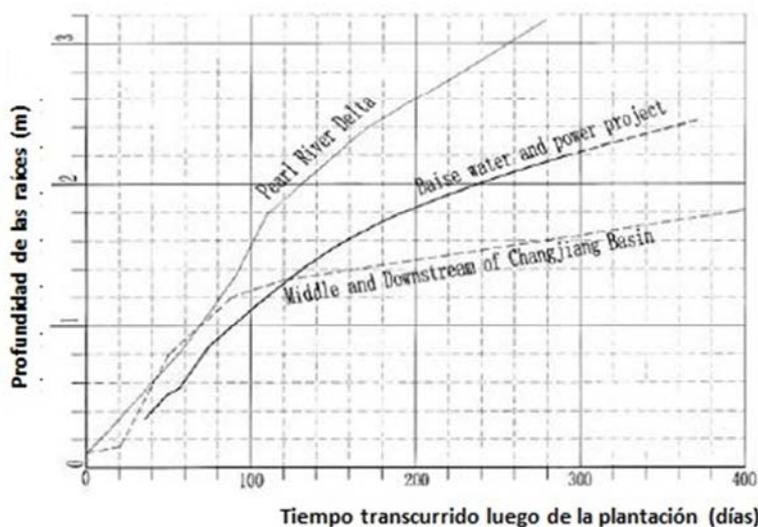
Se justifica así el uso de la vegetación como medio de refuerzo natural para los suelos y es aquí donde surge un nuevo concepto que se debe implementar en el uso regular de los diseños de taludes. La revegetación, o implementación de la vegetación y las técnicas de bioingeniería se utilizan hoy día como técnicas de estabilización de taludes.

Una implementación masiva de técnicas de revegetación y bioingeniería son el principio de una posible solución para muchos de los problemas de este país para la estabilidad de los taludes y terrenos escabrosos. Esta investigación pretende abrir la puerta a la realización de otras investigaciones similares en el tema para su globalización y adecuada difusión en el país.

Para conocer un poco el pasto vetiver, el principal que estudiará este trabajo, se presentan a continuación una serie de investigaciones que anteceden la presente. Si bien el vetiver está clasificado como un tipo de zacate, en realidad su comportamiento se parece más al de un arbusto o árbol de rápido crecimiento. Se ha descubierto que por unidad de área, las raíces de esta planta son más fuertes que las raíces de los árboles. Por su sistema extenso y denso el sistema de raíces del vetiver amarra la masa de suelo y la vuelve muy difícil de separar. Se ha descubierto que las raíces del vetiver pueden penetrar entre 3 y 4 m en los primeros años de establecimiento (Trouong et al, 2008).

En cuanto a las características morfológicas de este pasto, se han realizado estudios en China, que demuestran que una raíz de vetiver puede alcanzar 3 m de profundidad luego de 260 días de plantada. Esto se puede observar en la figura 1.10.

Figura 1.10 Crecimiento de las raíces luego de su plantación al sur de China



Fuente: Ke et al, 2003.

Del gráfico anterior se puede rescatar información valiosa, por ejemplo, las raíces de vetiver en los primeros tres meses de establecidas no han penetrado lo suficiente en el suelo. Por esta razón los esquejes o plántulas son susceptibles a ser lavados por fuertes lluvias. Por lo que es crucial sembrar el vetiver al principio de la época seca y proporcionarle el riego adecuado si es del caso. Así es posible asegurar que el vetiver tendrá suficiente tiempo para crecer y habrá seguridad en que protegerá los taludes en las próximas estaciones lluviosas.

En aproximadamente 5 meses, la planta de vetiver habrá desarrollado raíces de aproximadamente 1,5 m; es en este momento que ya se pueden considerar los efectos de estabilización del talud (Troung et al, 2008). Debido a la profundidad de la raíz del vetiver, esta planta puede alcanzar los estratos de suelo con mayor contenido de agua y a veces incluso los mantos de agua subterránea, por lo que la vuelve una planta de alta resistencia en épocas de sequía.

Es importante tomar en cuenta una de las desventajas del vetiver, y es que este no se desarrolla en condiciones de sombra totales. Además, si es plantado en zonas con alta probabilidad de crecimiento de maleza, esta puede afectar el crecimiento del vetiver si no se le da el mantenimiento correcto, por lo menos en los primeros 6 meses de establecimiento. Luego de este periodo, es deseable que las plantas locales puedan establecerse y tomar el lugar del vetiver.

Se cree que incluso cuando es invadido por otras plantas, el vetiver logra penetrar lo suficiente en el suelo como para mejorar las condiciones de estabilidad de los taludes. Una vez establecidas las plantas nativas, estas ayudarán o reemplazarán al vetiver en el aspecto de control de erosión. Por otro lado, en caso de una inundación o un incendio, las plantas nativas probablemente morirán, mientras que el vetiver volverá a crecer sin dejar la zona desprotegida.

En cuanto a las características técnicas del vetiver, este podrá resistir periodos de sequía, inundación, encharcamiento y temperaturas mínimas de entre 5 °C y 14 °C (Truong et al, 2008).

Esta planta se puede establecer en un amplio rango de condiciones de acidez del suelo, soporta rangos de pH de entre 3 y 10,5 (Truong et al, 2008). Además, se logra establecer en suelos con contenido de metales pesados como el aluminio. Estas características lo vuelven apto para su aplicación en minas por ejemplo.

Esta planta también tiene un conocido potencial de absorber no solo metales pesados, sino que también una gran cantidad de nutrientes por lo que ha sido utilizada con éxito para controlar derrames de rellenos sanitarios y luego rehabilitar el suelo para el posterior establecimiento de vida en esa zona.

Se ha determinado que el sistema radical del vetiver puede aguantar hasta 750 kg/cm² (Hengchaovanich y Nilaweera, 1996), lo que sería equivalente a 1/6 de la resistencia a tensión de una varilla de acero grado 60.

Adicionalmente se han obtenido resistencias al corte de entre 0,06-0,19 kg/cm²/kg raíz/m³ de suelo, en comparación con resistencias obtenidas a partir de suelo reforzado con raíces de árboles de entre 0,032 y 0,037 kg/cm²/kg raíz/m³.

A continuación se presenta el cuadro 1.11, en el cual se comparan resistencias promedio a tensión de varios tipos de pastos. Es importante observar que si bien, el vetiver es de los de menor diámetro promedio, su resistencia triplica a la de la mayoría de las otras especies.

Cuadro 1.11 Diámetro promedio y resistencia a la tensión promedio de raíces de varios pastos

Tipos de pasto	Diámetro promedio de las raíces (mm)	Resistencia a la tensión promedio (kg/cm²)
Juncellus serotinus (late juncellus)	0,38±0,43	250±43
Paspalum dilatatum (zacate dallis)	0,92±0,28	200±31
Trifolium repens (trebol blanco)	0,91±0,11	270±34
Chrysopogon Zizanioides (pasto vetiver)	0,66±0,32	868±318
Eremochloa ophiuroides (zacate san agustín)	0,66±0,05	278±18
Paspalum notatum (pasto bahía)	0,73±0,07	196±37
Zoysia matrella (pasto manila)	0,77±0,67	179±29
Cynodon dactylon (pasto bermuda)	0,99±0,17	137±22

Fuente: Modificado de Hong et al, 2003.

Hengchaovanich y Nilaweera (1996) fueron de los primeros investigadores en realizar ensayos de tensión a raíces de vetiver, así como ensayos de corte directo a gran escala a muestras de suelo mejoradas con vetiver. Ellos realizaron un muestreo de aproximadamente 80 raíces y obtuvieron una resistencia media a tensión de aproximadamente 765 kg/cm² para diámetros de raíz de entre 0,7 y 0,8 mm. Ellos demostraron que en comparación con muchas raíces de árboles de madera dura, las raíces del vetiver tienen una resistencia a tensión bastante alta.

Por otro lado, en sus pruebas de corte directo a gran escala, obtuvieron datos muy interesantes, que prueban la efectividad del vetiver. Ellos realizaron estos ensayos in situ a muestras de un área de 50 x 50 cm y una profundidad de 25 cm. El ensayo consistió en ir profundizando la caja de corte para obtener las resistencias del suelo, con y sin raíces a distintas profundidades.

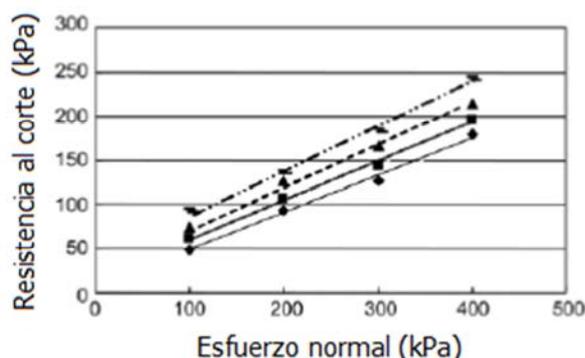
Los ensayos se realizaron en especies de vetiver de 2 años de edad, con un espaciamiento entre plantas de 15 cm. La comparación se obtuvo realizando un ensayo análogo al mismo suelo sin la presencia de raíces.

Los datos arrojados por los ensayos demuestran que a una profundidad de 0,25 m, el aumento en la resistencia al corte del suelo es de 90,2%. Este aumento de resistencia se va disminuyendo conforme se profundiza en el suelo hasta llegar a un aumento de un 12,5% en la resistencia al corte a una profundidad de 1,5 m.

El comportamiento obtenido es el lógico debido a que conforme aumenta la profundidad, la densidad de raíces en el suelo disminuye, así mismo la calidad del suelo aumenta conforme aumenta la profundidad.

Más recientemente, Yan et al. (2010) realizaron pruebas de corte directo a muestras de suelo con diferentes contenidos de raíces. Ellos observaron que el incremento en la resistencia al corte de la masa de suelo por el efecto de las raíces, tiene un comportamiento prácticamente lineal. Por lo tanto, la masa de suelo, luego de la adición del refuerzo se comporta de acuerdo con lo propuesto por la ley de Coulomb. También, observaron que dibujando las curvas para las distintas densidades de raíces en un solo gráfico, la curva de esfuerzos se mueve hacia arriba de manera levemente más marcada del lado derecho conforme incrementa la densidad de raíces. Esto se puede apreciar en las dos próximas figuras (ver figura 1.12 y cuadro 1.13). En el cuadro 1.13, los datos mostrados de la cohesión son en kPa.

Figura 1.12 Incremento del esfuerzo cortante en el suelo para distintas densidades de raíces de vetiver



Fuente: Yan et al, 2010.

Cuadro 1.13 Incremento de los parámetros de resistencia del suelo ensayado con distintas densidades de raíces de vetiver

Número de muestra	Contenido de raíces (kg/m ³)	c (kPa)	Δc (kPa)	ϕ (°)	$\Delta\phi$ (°)
1	0	10.0	-	22.4	-
2	24.89	17.5	7.5	23.1	0.7
3	41.48	24.3	14.3	25.2	2.8
4	58.14	33.8	23.8	26.7	4.3

Fuente: Yan et al, 2010.

Por el incremento tan bajo en el ángulo de fricción, ellos consideraron este efecto despreciable. De acuerdo con esto, determinaron una relación entre el aumento en la cohesión y la densidad de raíces. Esta se muestra a continuación:

$$\Delta c = 0,4899V_x - 5,3246 \quad \text{Ec. 1-5}$$

Donde Δc es el incremento en la cohesión y V_x es la densidad de raíces. Esta ecuación se puede generalizar para otros tipos de raíces simplemente reemplazando los coeficientes 0,4899 por k y -5,3246 por b y repitiendo el experimento para obtener la relación para las raíces de otras plantas.

Por otro lado, Waldron (1977), Wu (1976) y Brenner y James (1977), desarrollaron casi paralelamente un modelo de interacción suelo-raíz para raíces que se encuentran ubicadas perpendicularmente a la superficie de corte. Por la naturaleza de las raíces, estas pueden estar ubicadas a cualquier ángulo con respecto al suelo. Por eso, Gray y Leiser (1982), proponen un modelo de deformación de raíces interesante. Este toma en consideración la geometría de la raíz tanto sin deformar como deformada así como el ángulo en que se encuentran ubicadas en el suelo (ver figura 1.14).

El incremento en la resistencia al corte se puede medir utilizando el modelo simplificado de interacción suelo-raíz en el cual las raíces se asumen perpendiculares a la superficie de corte. Este incremento en el esfuerzo cortante debido a las raíces se representa en la siguiente ecuación como ΔS .

De acuerdo con este modelo, la tensión que se genera en las fibras se da cuando estas fallan a tensión y no fallan por extracción. Este modelo también asume que el ángulo de fricción del suelo permanece inalterado por efecto de las raíces.

La transición de la resistencia a la tensión de las raíces a resistencia cortante, esta modelada matemáticamente de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\Delta S_R = t_R [\cos\theta \tan\phi + \text{sen}\theta] \quad \text{Ec. 1-6}$$

Donde:

ΔS_R es el incremento en la resistencia al corte debida al refuerzo proporcionado por raíces o fibras (kg/cm²).

θ es el ángulo de distorsión de las raíces o fibras que se genera en la zona de cortante.

ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

t_R es la resistencia a tensión promedio de las fibras (raíces) por unidad de área de suelo.

Por otro lado,

$$t_R = T_R \left(\frac{A_R}{A} \right) \quad \text{Ec. 1-7}$$

Donde:

T_R es la resistencia a tensión promedio de las raíces.

$\left(\frac{A_R}{A} \right)$ es la razón de área de raíces o bien la fracción del área de la sección transversal del suelo ocupada por raíces.

Esta relación es importante debido a que establece que la contribución máxima de las raíces a la resistencia del suelo puede ser calculada mediante la medición de la resistencia a tensión de las raíces (T_R) y la fracción del área de la sección transversal del suelo a lo largo de una potencial superficie de falla que en donde estén presentes las raíces.

La sección transversal del área de raíces puede ser encontrada contando el número de raíces de distintos tamaños en una sección transversal de suelo dada y luego sumando el producto del número de raíces de cada tamaño y su correspondiente área promedio para ese tamaño.

Las ecuaciones 5-1 y 5-2 proporcionan un parámetro base para estimar la contribución de las raíces en la resistencia del suelo. La única variable restante que queda sin definir es el ángulo de distorsión de las raíces en la zona de cortante. Este ángulo varía de acuerdo con la cantidad de desplazamiento lateral de cortante y el espesor de la zona de cortante.

Waldron (1977) condujo varios experimentos de laboratorio para determinar estos ángulos de distorsión en varios suelos con presencia de raíces. Él observó que este ángulo oscila entre valores de 40 y 50 grados. Por otro lado Wu (1976) mediante observaciones de campo determinó que estos ángulos variaban entre los 45 y 75 grados. Wu (1976) mediante la realización de un análisis de sensibilidad, determinó que el término entre corchetes de la ecuación 5-1, es relativamente insensible a los valores esperados tanto del ángulo de fricción interna del suelo, así como del ángulo de distorsión. Se observaron variaciones de 1,0 a 1,3 en el término entre corchetes para valores de $25^\circ < \phi < 40^\circ$ y $40^\circ < \theta < 70^\circ$. Por lo tanto, asumiendo que el punto medio del rango es el valor más probable para el término entre corchetes de la ecuación 10-1, el máximo incremento en la resistencia al corte para un suelo reforzado con raíces puede ser estimado a un promedio del rango o bien mediante:

$$\Delta S_R = 1,15 t_R \quad \text{Ec. 1-8}$$

Esta fue la relación utilizada en esta investigación para determinar el incremento de la resistencia cortante en el suelo para la modelación del talud imaginario.

Como se mencionó anteriormente, el este modelo asume que se logra un desarrollo completo de la resistencia a la tensión de las raíces durante la falla. Para que este criterio sea válido, es necesario que las raíces sean lo suficientemente largas o que haya una fricción suficiente entre el interface suelo-raíz. Por lo tanto se debe cumplir la siguiente relación:

$$L_{\text{mín}} > \frac{T_R d_R}{2\tau_R} \quad \text{Ec. 1-9}$$

Donde:

$L_{mín}$ es la longitud mínima de las raíces para que se logre desarrollar por completo la resistencia a tensión durante la falla a cortante.

d_R es el diámetro de las fibras o raíces.

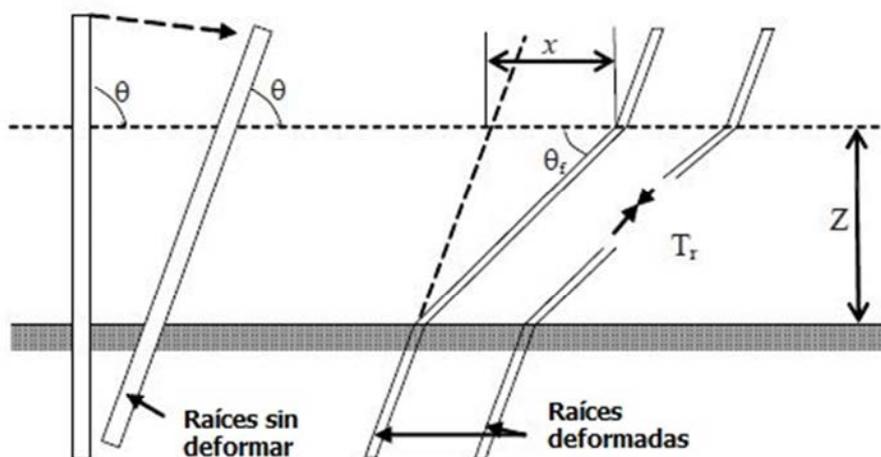
T_R es la resistencia a tensión de las raíces.

τ_R es el máximo esfuerzo tangencial a cortante o bien la resistencia contra falla por extracción entre la fibra y el suelo.

Para longitudes menores, la fibra o raíz fallará por extracción en vez de fallar por tensión.

En la figura 1.14 se presenta la geometría de deformación y falla de raíces asumida por el modelo.

Figura 1.14 Geometría de raíces deformadas y sin deformar



Fuente: Grey y Leiser (1982), tomado y modificado de Norris et al, 2008.

También existe otro modelo desarrollado por Pollen y Simon (2005), a diferencia del modelo anterior, en el cual todas las raíces se desplazan de manera simultánea en el momento de la falla, este otro modelo es un poco más realista. El modelo de Pollen y Simon establece que las raíces tienen diferentes resistencias a tensión, por lo tanto, en el momento de la falla

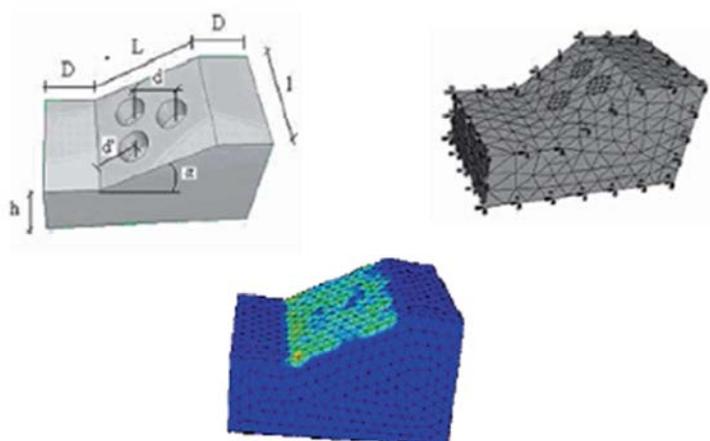
estas se van rompiendo de manera progresiva. A cada ruptura de las distintas raíces se le atribuye una contribución al esfuerzo cortante.

Este modelo, ha sido aplicado al refuerzo de taludes en arroyos o ríos con vegetación ribereña, y utiliza un concepto de carga compartida global, donde el conjunto de raíces, con número de raíces conocido, así como tamaños conocidos y propiedades de los materiales conocidas, contribuyen al incremento de resistencia en el conjunto suelo-raíces. Para calcular la respuesta de cada muestra, se aplica una fuerza cortante inicial al conjunto que asume que cada raíz en él, es capaz de resistir una porción igual de la fuerza aplicada (Norris et al, 2008). Por el hecho de que las raíces dentro del conjunto tienen diámetros diferentes, la fuerza cortante induce diferentes estados de esfuerzo en cada raíz. En caso de que el esfuerzo cortante inducido sea mayor a la resistencia máxima determinada de esa raíz, se considera que la raíz falla y la fuerza que no es capaz de resistir se distribuye entre las raíces restantes.

Además, se pueden utilizar otros métodos más conocidos como el **Método de Equilibrio Límite** (MEL, por sus siglas), este método es comúnmente utilizado en ingeniería geotécnica para estimar el factor de seguridad de un talud mediante un análisis de 2 dimensiones. El principio utilizado por el MEL, es dividir el talud en cuñas y luego definir las fuerzas y momentos para el equilibrio en los interfaces de las cuñas. Las cuñas se definen de manera arbitraria mediante el uso de planos verticales que cortan la superficie real del talud. Luego, el factor de seguridad es calculado utilizando una razón entre la fuerza cortante (obtenida a partir del criterio de falla de Mohr-Coulomb) y la fuerza real aplicada en la superficie de falla.

Existen otros métodos más sofisticados que el anterior, entre los que se pueden mencionar los métodos numéricos. Entre ellos el de las **diferencias finitas y los métodos de elemento finito**. Ambos utilizan una discretización espacial del medio estudiado (suelo-raíz) que busca reducir las funciones que usualmente son continuas, por ejemplo: fuerzas, desplazamientos, esfuerzos y deformaciones, a sus valores en puntos o nodos particulares. Por esta razón, el primer paso a seguir es el de definir los nodos y sus velocidades de desplazamiento con relación a las fuerzas aplicadas a ese cuerpo libre (Norris et al, 2008). Se puede apreciar un ejemplo gráfico de estas modelaciones en la figura 1.15.

Figura 1.15 Ejemplo del método de elemento finito para modelar taludes con inclusión de raíces de árboles



Fuente: Kokutse et al, 2006. Tomada de Norris et al, 2008.

1.5 Delimitación del problema

1.5.1 Alcances

- Solo se realizarán tres pruebas de Corte Directo para cada muestra tomada en campo tanto del suelo inalterado sin raíces, como para el suelo con presencia de raíces. Si se escogen tres tipos distintos de suelos entonces se realizarán en total 18 pruebas de Corte Directo.
- No se estudiarán los deslizamientos profundos ni los efectos que las raíces puedan tener sobre los mismos.
- Solo se estudiará el efecto del aumento de resistencia por parte de las raíces en los suelos definidos posteriormente en la investigación y la investigación se limitará solamente a estos.
- Se realizarán pruebas con veleta en campo en los sitios de toma de muestra, solo se realizarán dos pruebas por sitio.
- Solo se realizará un muestreo por sitio escogido y se escogerán máximo tres sitios.
- Se realizará solo un muestreo para la caracterización del suelo de cada sitio para evaluar si las condiciones son válidas para los efectos del trabajo.

- Las pruebas de laboratorio de caracterización del suelo entre las cuales están los límites de consistencia, granulometría y humedad se realizarán solo una vez para cada sitio.

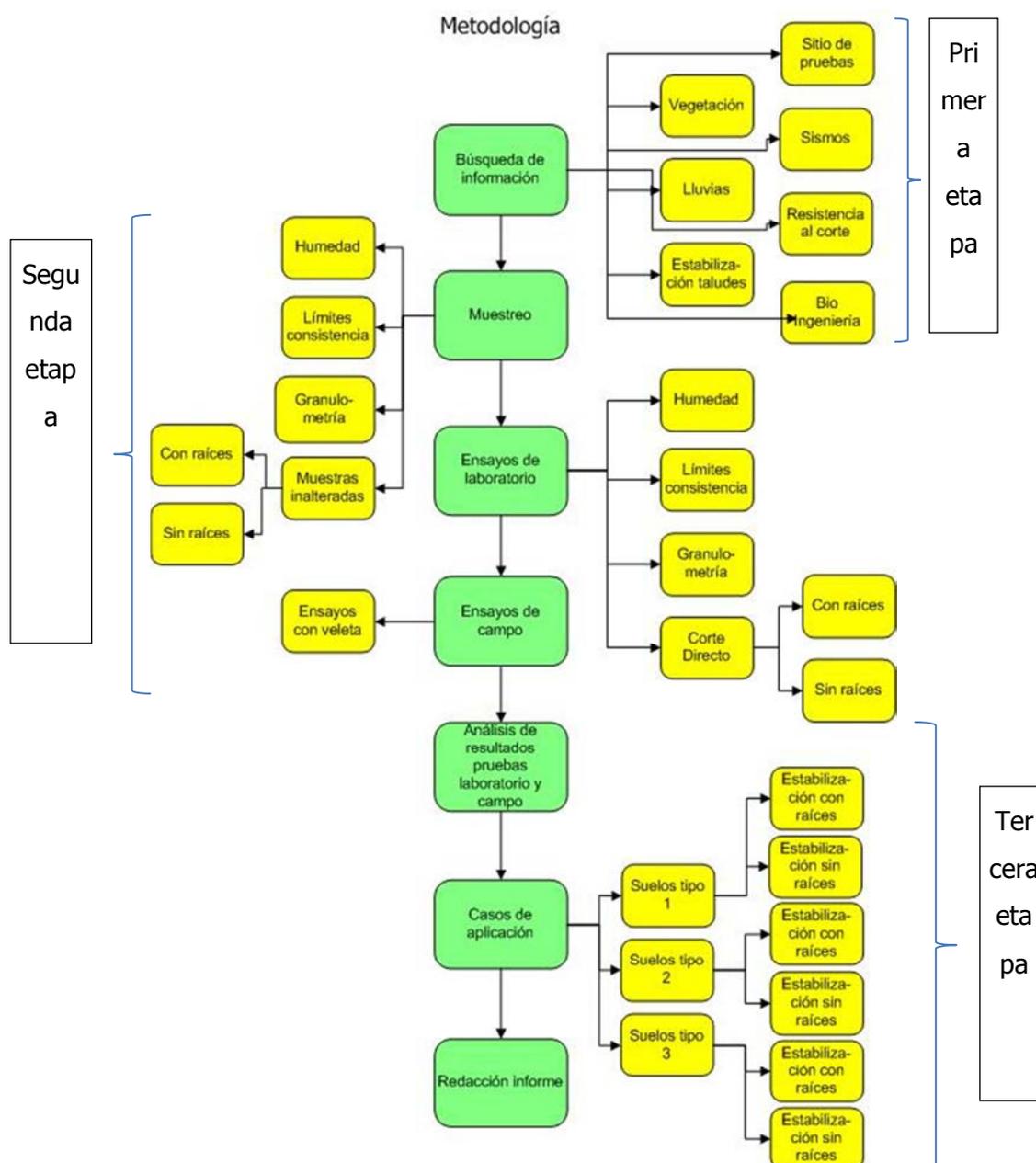
1.5.2 Limitaciones

- El tiempo es un factor muy limitante en este trabajo por su naturaleza de trabajo final de graduación. Se pretende realizar esta investigación en el transcurso de un semestre, por lo que el manejo del tiempo es un factor crucial para la realización del mismo.
- El muestreo inalterado siempre conlleva sus dificultades de cuidado de las muestras, en el viaje del campo al laboratorio las muestras pueden sufrir golpes que alteren su estado natural de esfuerzos, sin embargo se hará lo posible porque no suceda.
- No se cuenta con equipo propio para la realización de las pruebas, por lo que conseguir el equipo está sujeto a la disponibilidad del mismo tanto en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) como en la empresa Ingeotec S.A.
- Los ensayos de Corte Directo tienen sus incertidumbres asociadas entre las cuales está el poco control en las condiciones de saturación y drenaje de las muestras.
- Existe una dificultad para muestrear el suelo sin raíces y que sea exactamente el mismo que con raíces, por lo que van a haber incertidumbres asociadas a eso.

1.6 Descripción de la metodología a usar

La metodología a seguir para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la figura 1.16.

Figura 1.16 Diagrama de flujo para la metodología



La metodología de este trabajo se dividió en tres partes principales, la primera es una etapa de investigación y reconocimiento. En ella se investigó el estado del arte en estabilidad de

taludes y bioingeniería, además de los efectos de los sismos y de las lluvias sobre la estabilidad y los efectos que pueden tener las raíces de las plantas sobre la resistencia al corte en suelos. Por último se realizó un reconocimiento de campo para evaluar los lugares más indicados para realizar el muestreo de suelos que serían más representativos para esta investigación. Se buscaron suelos arcillosos en general, tanto los de alta compresibilidad como los de baja y los suelos arcillosos arenosos.

En la segunda etapa se realizó el muestreo, para valorar las características de los suelos en los sitios escogidos. Se realizaron ensayos de: granulometría, de límites de consistencia y de humedad. Una vez caracterizados los suelos y definidos los lugares para la toma de muestras se procedió a realizar el muestreo definitivo. En este punto se tomaron muestras inalteradas de los suelos tanto con la presencia como sin la presencia de raíces. Además se realizaron los ensayos en sitio con veleta para determinar la resistencia al corte en sitio para las dos condiciones estudiadas, con y sin raíces, el equipo para realizar dichos ensayos fue facilitado por la empresa Ingeotec.

Luego las muestras fueron llevadas al LANAMME donde se realizaron las pruebas de caracterización definitivas, entre ellas están las mismas mencionadas anteriormente, pero también se realizaron las pruebas de Corte Directo a todas las muestras inalteradas. En específico se realizaron tres pruebas de Corte Directo para cada tipo de suelo y para cada condición, tanto con raíces como sin ellas. Según el número de tipos de suelos escogidos (máximo tres) así se realizaron las respectivas pruebas de Corte Directo que fueron 18.

Posteriormente y una vez teniendo los resultados de las pruebas, se pasó a la etapa de análisis. En ella se tomaron tanto los datos de todas las pruebas realizadas y la información obtenida en la primera etapa. Contrastando ambos productos y juntándolos se obtuvo la información necesaria para evaluar la eficacia del uso de las raíces como refuerzo para los suelos.

Se compararon los resultados para los distintos tipos de suelos y para los distintos pastos para lograr cuantificar el efecto de las raíces en términos del esfuerzo cortante. Se analizó como varían los esfuerzos obtenidos en laboratorio (Corte Directo) en comparación con los obtenidos mediante las pruebas de campo (Veleta). Se obtuvieron los parámetros de resistencia al corte (ángulo de fricción y cohesión). Se realizaron además pruebas de falla a

tensión de grupos de raíces. Luego se realizó un análisis teórico del aumento de la resistencia al corte utilizando esos datos de resistencia a tensión en las raíces.

Una vez ordenados y analizados todos los datos se entró en la parte de diseño preliminar en donde se propusieron diseños teóricos de taludes para cada tipo de suelo y vegetación.

Finalmente se procedió a redactar el informe final del trabajo en donde se sacaron las conclusiones más importantes y se logró ver más fácilmente todas las relaciones e información obtenidas mediante el estudio.

2 VEGETACIÓN E INGENIERÍA

2.1 Generalidades

La vegetación juega un papel predominante en la protección del suelo contra la erosión, funcionando como una barrera contra los flujos de agua y sedimentos. También funciona como escudo contra el frecuente choque del agua de lluvia debido a que intercepta y retiene grandes cantidades de agua. De este último aspecto se obtienen varias ventajas en la conservación de los suelos, porque reduce la cantidad de agua que podría meteorizar o movilizar el suelo. Además, disminuye la intensidad con la que la lluvia golpea el suelo y finalmente disipa en gran medida la capacidad erosiva de la misma (Mataix y López, 2007).

Por otro lado, la experiencia ha demostrado también la idoneidad de algunas plantas para reducir la incidencia de fallas superficiales y problemas causados por la reptación. Además, se ha observado que luego de la quema de bosques en áreas de alta pendiente, se desencadenan nuevos procesos de reptación. Sin embargo, es importante mencionar que no se ha encontrado evidencia de que la falta de vegetación sea un factor de activación para fallas profundas e incluso se debe recalcar que se han dado deslizamientos catastróficos en zonas de bosque primario en estado de saturación y con altas pendientes.

Se debe analizar la localización de la vegetación con respecto al talud, ya que dependiendo de la ubicación de esta, puede tener efectos distintos para la estabilidad. Por ejemplo, ayuda a determinar el contenido de agua en superficie y a la vez aporta estabilidad mecánica gracias a las raíces. También, ayuda a controlar la infiltración del agua, teniendo así, una afectación directa sobre el régimen de aguas subterráneas y ayuda como un agente secante al obtener parte de esta agua para su supervivencia.

Para introducir esta parte de la investigación, es importante comentar brevemente los efectos hidrológicos de la vegetación, según la literatura. En primer lugar está el factor de interceptación, este es de gran ayuda para mitigar los daños erosivos que genera la precipitación. Esto se debe a que reduce la velocidad de las gotas de lluvia que chocan contra el suelo. Una parte de esta agua interceptada se almacena en las hojas y tallos y luego regresa a la atmósfera por evaporación, el resto se denomina precipitación temporalmente interceptada, esta luego regresa al suelo. Esto es ventajoso debido a que reduce la intensidad de la lluvia, así como su energía erosiva. Es importante además, notar que en

lluvias de moderada intensidad el volumen interceptado de lluvia puede llegar al 100% siendo las coberturas herbáceas, las más eficientes en lograr este objetivo (Mataix y López, 2007).

La evapotranspiración es otro de los factores importantes que deben ser mencionados, esta describe las pérdidas de agua en forma de vapor por medio de la transpiración de las plantas. Este fenómeno se lleva a cabo desde las capas más superficiales del suelo hasta la altura máxima de la planta y tiene efectos tanto positivos como negativos en la estabilidad y el régimen hidrológico en los suelos. Uno de los efectos que cabe destacar es el aumento de la resistencia al corte del suelo, aspecto que se añade al reforzamiento mecánico provisto por las raíces. Esto se debe a que reduce el contenido de humedad del suelo y con ello también la presión de poro. Por otro lado, aumenta la succión del mismo e igualmente el contacto entre partículas. Eso reduce la posibilidad de deformación del suelo ante fuerzas que actúen sobre él. La reducción del contenido de humedad también reduce el peso del suelo, condición favorable a la estabilidad. Por último aumenta la conductividad hidráulica del suelo y su capacidad de almacenamiento, por lo que ayuda a aumentar el tiempo que dura en saturarse el suelo. En zonas tropicales, la evapotranspiración generalmente es mayor a la de zonas con estaciones bien definidas.

La evapotranspiración es más alta a medida que la humedad del suelo sea alta, y disminuye cuando la humedad del suelo lo hace. La evapotranspiración profundiza los niveles freáticos y puede llegar a producir asentamientos en suelos arcillosos blandos y agrietamientos por desecación. Una vez formadas estas grietas, la permeabilidad y la capacidad de infiltración del suelo se incrementan permanentemente respecto a sus condiciones originales y con ello aumenta el riesgo de deslizamiento en las capas más superficiales (López, 1999). Frente a este efecto negativo, se suele dar una acción compensatoria por parte de las plantas que con las raíces tienden a sostener el suelo y a sellar esas nuevas grietas. La cobertura total del suelo con alguna tipo de forraje herbáceo es recomendable en estos casos de suelo altamente plástico.

El área de influencia depende de la profundidad de las raíces y los árboles tienen una mayor capacidad de extracción de agua que las especies arbustivas más pequeñas (Suarez, 1998). Desde el punto de vista ingenieril la clave es determinar la humedad máxima y el nivel freático crítico para un talud determinado, teniendo en cuenta el efecto de la vegetación.

Existe un balance entre la infiltración y la evapotranspiración que produce una determinada humedad, que debe luego compararse con la humedad de saturación, y tener en cuenta que la condición de saturación es la más crítica en cuanto a la estabilidad del talud. Por lo general, la vegetación produce un efecto que mantiene la humedad por debajo del punto de saturación.

El siguiente factor es la infiltración, en suelos con presencia de vegetación la permeabilidad así como la tasa de infiltración son mayores. Esto es ventajoso en el control de erosión ya que reduce o retrasa la escorrentía superficial a lo largo de laderas o taludes. La vegetación también introduce material orgánico en el suelo, este mejora la estructura haciéndola más granular en ocasiones. Además, incrementa la porosidad y equilibra la distribución del tamaño de los poros, mejorando la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento. Estos incrementos determinan que bajo las mismas condiciones edáficas (o específicas para el suelo con vegetación), de precipitación y de pendiente, los volúmenes de escorrentía generados durante un aguacero sean menores en suelo vegetado que en suelo desnudo. A la vez, en el suelo con presencia de vegetación, la escorrentía se retrasa.

Un fenómeno que se debe definir en este punto es el de encostramiento, este ocurre cuando las gotas de lluvia golpean el suelo desnudo ocasionando la dispersión de las partículas y el taponamiento del suelo. Esto produce un efecto que reduce enormemente la infiltración, haciendo al suelo muy susceptible a la erosión por escorrentía. Las coberturas vegetales ayudan a evitar de manera muy eficaz este fenómeno.

La vegetación provee protección frente a la erosión por salpicadura que va desintegrando la estructura de suelo. Algunos estudios en laboratorio, han comprobado el potencial erosivo de estas gotas de lluvia, estas pueden proyectar partículas entre 60 cm y 1,5 m de altura, siendo la distancia de caída de 2 m. El porcentaje de cobertura vegetal determina la eficiencia de la protección contra este fenómeno, siendo ideales los porcentajes de cobertura mayores al 70%. Así, la pérdida de suelo decrece exponencialmente al incrementarse la cubierta vegetal con una altura de vegetación menor a 30 cm. Conforme va aumentando el tamaño de la vegetación se va perdiendo ese decrecimiento exponencial y se convierte en lineal.

La escorrentía superficial es uno de los factores más erosivos, ya que desprende y transporta las partículas de suelo. Su potencial erosivo se mide de acuerdo al volumen y la velocidad del

fluido, la vegetación colabora reduciendo ambos valores. Por ejemplo, la disminución del volumen se debe tanto a la intercepción, la evaporación y la transpiración. Por otro lado, la escorrentía es interrumpida por la vegetación, reduciendo así la velocidad y evitando que el agua se encauce por líneas definidas, por lo tanto ayudando a prevenir la generación de surcos y posteriormente cárcavas.

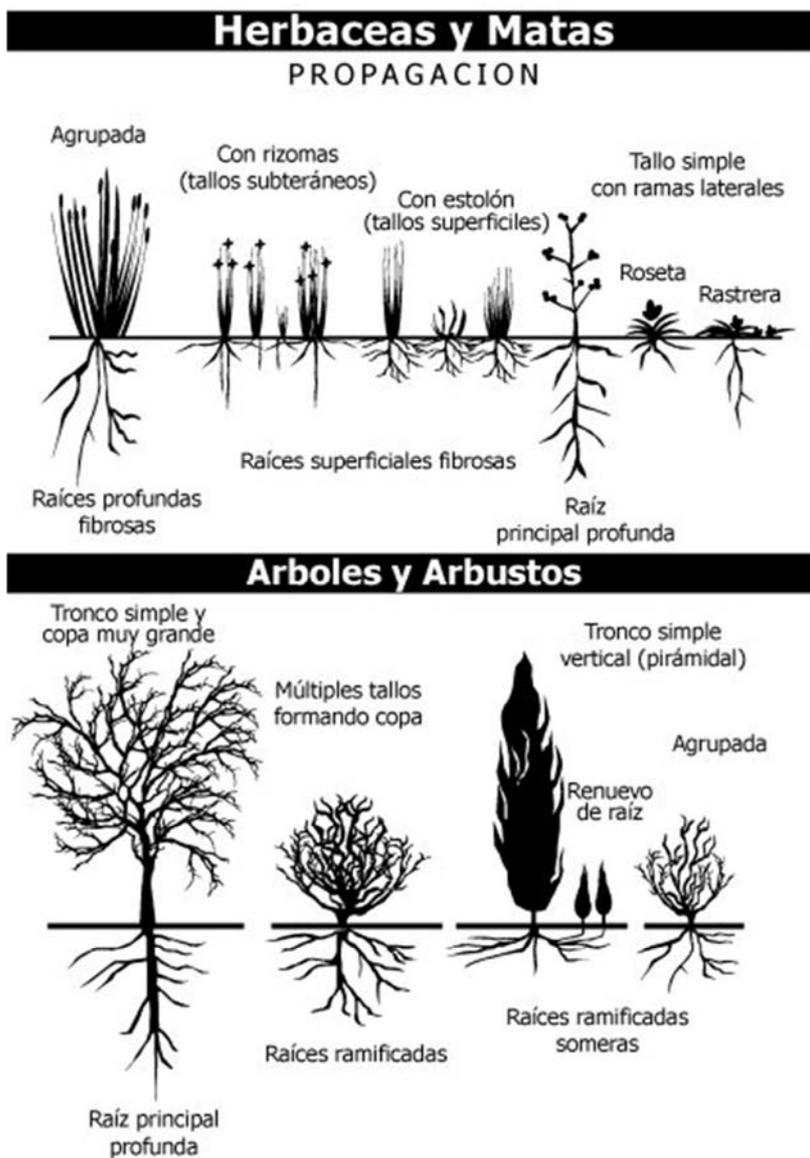
Otro efecto importante de las plantas que cabe mencionar, es la sujeción del suelo por parte de las mismas. En general, las raíces con diámetros menores a 12 mm son capaces de evitar movimientos en la masa de suelo por efectos de la gravedad, y de sostener estas masas ante movimientos causados por impactos de gotas de lluvia, escorrentía o viento. Las plantas con suficiente flexibilidad a la rotura, así como con ramificación desde la base del tallo y capacidad de enraizar sobre nuevas capas de suelo superpuesto al antiguo, son las más eficaces en el sostener el suelo.

La vegetación es capaz de modificar las propiedades mecánicas del suelo, este es uno de los temas de investigación del presente trabajo y se ampliará en secciones posteriores. Por el momento, es importante mencionar que las plantas son capaces en mayor o menor medida de reforzar la matriz de suelo, ya que las raíces forman redes de fibras entrelazadas que incrementan la resistencia al corte y permiten mayores deformaciones antes de la falla de la masa de suelo. En especies de poáceas y leguminosas la acción de refuerzo por parte de las raíces puede llegar a una profundidad de hasta 2 m, y en el caso de árboles puede sobrepasar los 3 m.

En el caso de la vegetación de mayor tamaño, como árboles o arbustos grandes, existe un efecto de anclaje y contención. Este fenómeno se debe a que las raíces principales y secundarias cuyos tamaños son considerables pueden llegar a través de las grietas a capas más duras y competentes; construyendo una especie de entretejido de las capas más suaves y superficiales con las capas más rocosas y profundas. Esto claro está, sólo sucede si la estratificación presente en el sitio tiene estratos sólidos y competentes a niveles relativamente superficiales. En el caso de Costa Rica, por el clima tropical y la presencia de suelos residuales, muchas veces no se cumple esta premisa, ya que los estratos de suelo suave pueden llegar a ser muy profundos.

En la figura 2.1 se presenta un esquema de los tipos de vegetación. Es muy importante identificar el tipo de uso que se le quiere dar a la vegetación de acuerdo con las necesidades del talud, sean estas de estabilización o de control de erosión.

Figura 2.1 Formas de crecimiento de las plantas



Fuente: Modificado de Coppin y Richards, 1990.

Cabe recalcar que existe una desventaja de la vegetación arbórea de gran tamaño. Estas especies pueden generar un sobre peso que incrementa las fuerzas desestabilizadoras y así ocasionar un deslizamiento. Por otro lado, la fuerza de fricción entre el suelo y la superficie de falla, aumenta ayudando a la estabilidad de la ladera o el talud. El hecho de que la cobertura arbórea de gran tamaño genere un efecto positivo o negativo sobre el talud depende del componente dominante entre los mencionados.

La forma de las raíces varía según la vegetación. Estas dependen tanto de la especie, como de la edad y del tipo de suelo donde se desarrollan. Las profundidades de las raíces pueden ser hasta de 5 metros en árboles, de un par de metros en arbustos y de 30 cm en pastos, con algunas excepciones como el pasto vetiver que ha llegado a desarrollar raíces de hasta 3 metros de longitud (Banco Mundial, 1995). Hay tres tipos de raíces principales, la lateral, que como su nombre lo dice se desarrollan a poca profundidad pero su extensión principal se da hacia los lados. La radial que se desarrolla tanto en profundidad como en los laterales, y por último la pivotante que desarrolla una raíz principal gruesa y larga que puede tener varios metros de profundidad, con algunas raíces secundarias que salen de ella y tienen espesores menores. Según Leventhal y Mostyn (1987), las raíces más efectivas para la estabilización de taludes son las que tienen diámetros menores a los 20 mm.

Un factor importante a tomar en cuenta en la resistencia del sistema suelo-raíces, es la densidad de raíces por unidad volumen de suelo. Siempre es importante evaluar la longitud de las raíces para determinar los efectos de la planta sobre la estabilidad del talud. Otro factor a considerar es el número de raíces por unidad de área y su diámetro el cual puede evaluarse como una relación de áreas raíz/suelo en un plano de falla definido.

Existen varias ventajas en el uso de la vegetación y la bioingeniería en la estabilización de taludes y laderas. Entre ellas se pueden nombrar las siguientes:

- **Rentabilidad:** Estudios de campo de White (1979) han comprobado que en muchos casos soluciones combinadas estructura-vegetación para la estabilización de taludes son más efectivas en términos de costos que utilizar sólo estructuras o vegetación. Por un lado, las soluciones que sólo utilizan vegetación son las más baratas (en comparación con las estructuras convencionales de retención de tierras), sin embargo, dependiendo del tipo de solución, la efectividad en condiciones difíciles o

muy severas puede ser menor. Es por eso que es importante analizar la gravedad del problema al que se quiere buscar una solución y de acuerdo con el análisis el ingeniero debe valorar cuál es la solución que mejor se ajusta al entorno.

- **Compatibilidad medioambiental:** los sistemas de bioingeniería para protección de taludes, tienen la ventaja de que se mezclan con su entorno, por lo que generan un impacto visual menor que los muros de retención convencionales, entre los cuales se pueden mencionar las mallas de retención, los muros de gaviones o enrocados y los muros de tierra armada. Adicionalmente, se puede aprovechar la oportunidad de implementar la vegetación en estas estructuras de retención convencionales para reducir su impacto visual. Esto se puede lograr mediante la incorporación de plantas nativas entre los vacíos de los miembros estructurales, o ya sea incorporando la vegetación específicamente en el diseño y construcción de los mismos.
- **Uso de materiales autóctonos de la zona:** La protección de taludes con métodos de bioingeniería se caracteriza por el uso de materiales naturales y disponibles localmente, como lo son suelo, rocas, madera o troncos de árboles y vegetación. Por el contrario, los métodos de retención de suelo convencionales utilizan acero y concreto. Es cierto que en situaciones de estabilidad muy críticas se vuelve necesario el uso de los materiales convencionales (concreto y acero) sin embargo la versatilidad de los métodos de bioingeniería es que se pueden implementar incluso en la mayoría de estas soluciones. Un buen ejemplo son los muros "*CribWalling*" (por su nombre en inglés) que son muros prefabricados modulares fabricados con piezas de concreto pero con los centros huecos, por lo que permiten la siembra de vegetación en su interior y realmente son muy atractivos visualmente. En la figura 2.2 se muestra una foto de un muro de criba.

Figura 2.2 Foto de un muro de criba



Fuente: <http://www.moore-concrete.com/civil/product/1/20/>

- **Métodos enfocados en mano de obra y habilidad:** a diferencia de los métodos convencionales que son más intensivos en el uso de capital y energía, los de bioingeniería son intensivos en mano de obra no especializada bien supervisada. Este hecho convierte estas técnicas en unas eficientes en términos de costos.

2.2 Métodos de mejoramiento de suelos con vegetación

A lo largo de los años se han desarrollado varios métodos de estabilización de suelos mediante el uso de barreras vivas. Estas barreras pueden estar conformadas solamente por vegetación, o por una combinación de vegetación con métodos de estabilidad convencionales. Al conjunto de estos métodos se le llama bioingeniería. Y se caracterizan por ser amigables o menos perjudiciales para el medio ambiente. La vegetación es el elemento principal en la bioingeniería.

Los métodos de bioingeniería se pueden categorizar básicamente en dos grupos, los que utilizan sólo vegetación y técnicas convencionales de revegetación, llamados barreras vivas. Y segundo, los que utilizan plantas y especies vegetales vivas en conjunto con material inerte. El material inerte provee la resistencia en las etapas tempranas de la siembra de la vegetación, en donde esta se encuentra más vulnerable y su efectividad es más baja. La importancia de este material inerte se va disminuyendo cuando la vegetación alcanza una edad adecuada, por lo que muchas veces este material puede ser removido y reutilizado para la construcción de otras barreras mixtas.

Las barreras mixtas son de especial importancia en los casos en donde exista un riesgo de falla debido a un factor de seguridad bajo, geotécnicamente hablando. Por ejemplo, en un corte de talud que se realice en una época cercana a la lluviosa, mientras que se establecen las plantas, es importante utilizar barreras inertes que ayuden a sostener el suelo y a evitar la erosión. Siempre se debe dar un adecuado manejo de aguas en la corona del talud y evitar al máximo la escorrentía superficial por las paredes del mismo ya sea mediante el uso de cunetas o drenajes.

Las barreras vivas, al utilizar solamente material vegetal, es recomendable implementarlas al principio del verano y utilizar riego, para evitar posibles fallas debidas al exceso de presión de poros (o disminución de la resistencia del suelo) en el invierno. Una vez establecidas estas barreras, el riego puede suspenderse. En el caso del vetiver, es recomendable proveer riego por lo menos los dos primeros meses a partir de la siembra.

A continuación se comentaran algunas de las técnicas más utilizadas, y sus beneficios o desventajas.

2.2.1 Estaquillado

Se le llama estaquillado al uso de especies de plantas maderosas con las cuales es posible formar estacas que son clavadas en suelo y son capaces de establecer raíces y crecer. Las plantas más efectivas en este tipo de siembra, son las que en un corto tiempo pueden enraizar y empezar a reforzar el suelo poco después de su sembrado. Estas especies son capaces de empezar a drenar el agua del suelo aumentando la resistencia del mismo, además las raíces generan un armazón de refuerzo que impide los movimientos de la masa de suelo.

Este método es muy sencillo de aplicar y muy barato tanto en insumos como en mano de obra. Es recomendable para la reparación de áreas en las que se han producido deslizamientos pequeños o asentamientos, producto de un exceso de humedad en el suelo. Las condiciones de inestabilidad no deben ser graves, y su aplicación es ideal cuando no se dispone del tiempo suficiente para ejecutar obras más grandes.

Por otro lado las estacas pueden usarse para fijar materiales como geotextiles, u otros materiales para control de erosión. Además se pueden utilizar como complemento para otros métodos de revegetación, o para revegetar estructuras de retención porosas.

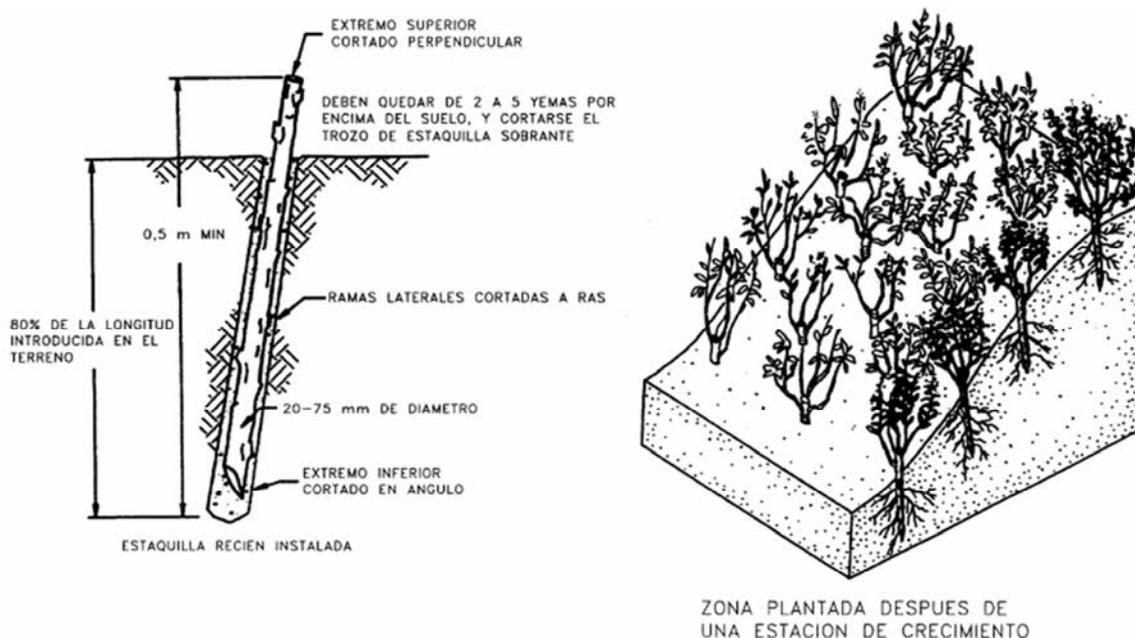
El diámetro y longitud de cada estaca debe ser acorde a la dureza del suelo o el material donde se esté insertando para que no se pueda romper con facilidad. Las ramas laterales deben ser eliminadas y la corteza debe quedar intacta. Las plantas de donde provengan deben tener una edad adecuada, en general mayor a 2 años y deben ser vigorosas y sin enfermedades o plagas.

Las estacas deben ser clavadas en ángulo recto con el suelo, ya sea a presión o haciendo un agujero con una varilla de acero. Es importante que el suelo que rodea la estaca esté bien compactado. Es recomendable sembrar utilizando la técnica de tresbolillo, que consiste en colocar las estacas de manera que en las filas de siembra formen triángulos equiláteros. La separación recomendada por López y Mataix (2007) es entre 0,3 m y 1,0 m y la densidad es de 3 a 5 estacas por metro cuadrado.

Para esta técnica se deben seleccionar especies de la zona que tengan capacidad de ser reproducidas mediante estacas, el madero negro (*Gliricidia Sepium*) es una de ellas.

En la figura 2.3 se presenta un esquema de cómo realizar el método de estaquillado y como se ve una vez implementado.

Figura 2.3 Estaquillado



Fuente: Mataix y López, 2007.

2.2.2 Fajinas

Están constituidas por ramas y tallos entrelazados en forma de huso. Estas se colocan en el fondo de pequeñas zanjas excavadas de manera transversal a lo largo del contorno del talud. Luego son recubiertas por tierra y pueden ser fijadas con estacas de la especie empleada en la construcción de las fajinas. Si el talud no presenta problemas de exceso de agua, las zanjas se excavan perpendicularmente a la máxima pendiente del talud. Cuando se presentan problemas de exceso de humedad es recomendable generar una ligera pendiente hacia los lados del talud para drenar el agua.

Esta técnica provee protección ante deslizamientos superficiales, generalmente menores a 0,75 m. Las fajinas generan una matriz de raíces ayuda a evitar los movimientos de la masa de suelo, además es una barrera contra la erosión ya que se crean pequeñas bermas en la pendiente y ayuda a reducir la pérdida de material en el talud.

Las fajinas se conforman a partir de ramas de 1 a 9 m de longitud y diámetros entre 15 y 30 mm. Es necesario agrupar las ramas y formar un haz con alguna cuerda fina hecha de fibra vegetal a cada 30 – 50 cm, y se conforman en longitudes de 2 a 10 m. Se deben utilizar

plantas leñosas jóvenes y flexibles, con yemas de crecimiento activas. Para anclar las fajinas se pueden utilizar estacas de madera maciza o de la misma planta utilizada para las fajinas, estas estacas deben sobresalir por lo menos 5 cm a partir de la parte superior del haz. Las estacas deben ser colocadas en la cara inferior del arreglo de las fajinas.

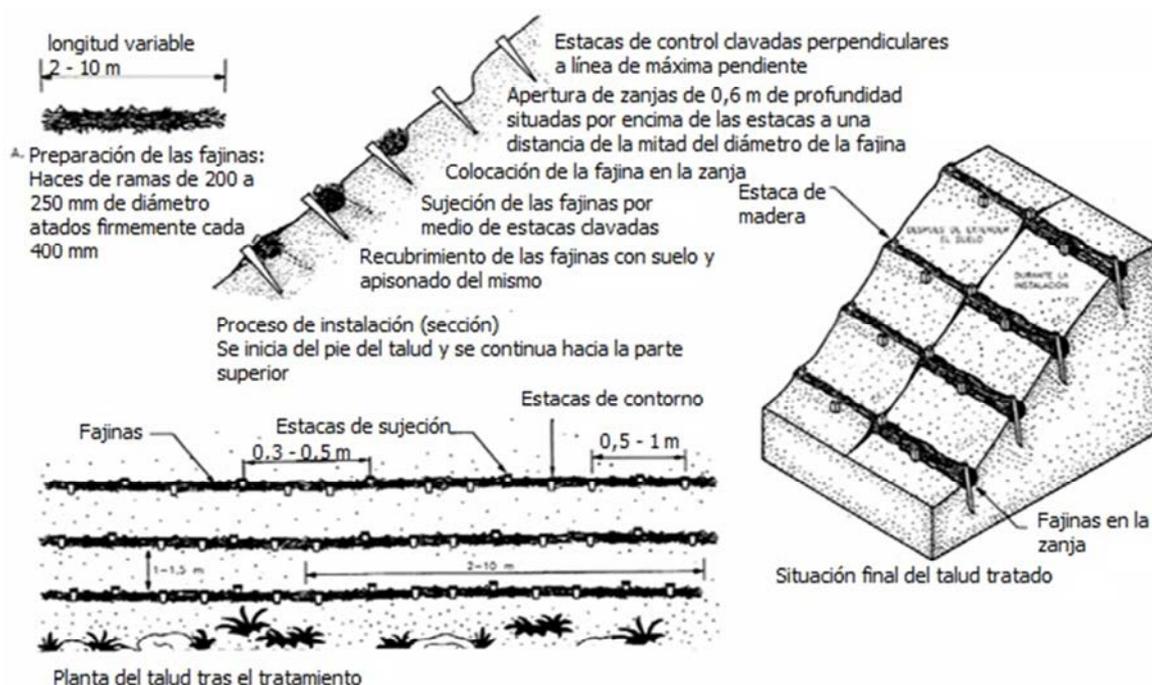
La instalación se hace de abajo para arriba en el talud, excavando una zanja transversal a la pendiente longitudinal, el ancho de la excavación es variable y dependiendo de la pendiente varía entre 0,3 y 0,5 m. La profundidad es de la mitad del diámetro de la fajina. Teniendo lista la zanja, se colocan las fajinas y luego se rellena con tierra húmeda dejando la parte superior de las fajinas expuesta.

Es importante sembrar también en los espacios que quedan entre las fajinas para ayudar a evitar la erosión, si no se quiere se puede utilizar un material como un geotextil o malla para ayudar prevenir la erosión.

Para esta técnica funcionan bien especies tales como el madero negro (*Gliricidia sepium*) y el pasto elefante (*Pennisetum purpureum*).

En la figura 2.4 se puede observar un esquema de construcción de las fajinas.

Figura 2.4 Fajinas



Fuente: Mataix y López, 2007.

2.2.3 Escalones de matorral

Para la realización de este método, es necesario colocar ramas de especies maderosas con capacidad de enraizar a lo largo de pequeñas zanjas o entre capas de tierra (en caso de rellenos) a lo largo de la pendiente del talud formando terrazas o escalones. La diferencia entre esta técnica y la anterior es básicamente que las ramas se sitúan en otra dirección y a distinta profundidad. En este caso las ramas se colocan de manera casi perpendicular al perfil del talud y se introducen hasta 2 m, mientras que las fajinas se colocan paralelas al perfil del talud.

Según Mataix y López (2007), la orientación perpendicular al perfil del talud es más efectiva. Esto se debe, a que las ramas actúan como elementos en tensión que refuerzan el talud, mientras que la porción de rama que sale a la superficie ayuda a controlar la escorrentía y por ende la erosión causada por la misma.

Este método es ventajoso ya que comienza a funcionar de manera inmediata luego de la instalación, debido a que la pendiente queda dividida en escalones que son separados por filas de matorral. Además, por la longitud de las ramas, se provee refuerzo al talud incluso antes de que se desarrollen las raíces. Por otro lado, la vegetación sobresaliente retiene los sedimentos y mejora la capacidad de infiltración y actúan como drenes horizontales.

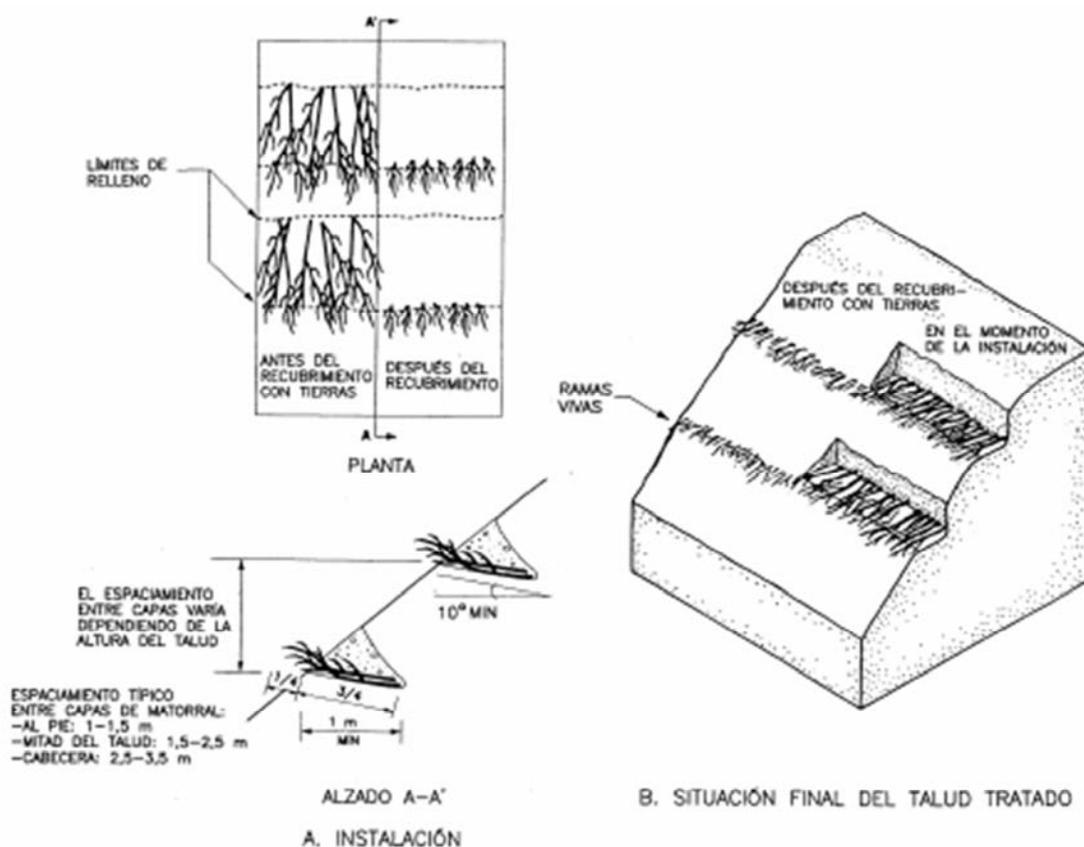
La construcción se realiza utilizando ramas de suficiente longitud (hasta 2 m). Se debe preparar una excavación empezando por el pie del talud y se avanza hacia la cabecera, de esta manera, el material excavado en la terraza superior se utiliza para rellenar la que está abajo. Las zanjas deben ser construidas con una contrapendiente de 10° a 20° hacia el talud y la anchura de estas debe ser entre 0,5 y 1 m. Si existen problemas de drenaje se debe conformar una pendiente hasta el borde de talud.

Las ramas se introducen en la zanja perpendicularmente al perfil del talud con las yemas de crecimiento hacia afuera. Cada rama debe sobresalir por lo menos un cuarto de su longitud y se deben colocar de forma entre cruzada para formar una estera (término utilizado en agricultura para referirse a una especie de entretejido) de entre 75 y 200 mm de espesor. Cuando se termina la colocación se deben cubrir las ramas con suelo que luego debe ser compactado para eliminar todo el aire que queda atrapado.

La distancia entre zanjas recomendada es entre 1 y 2,5 m. Dependiendo de la pendiente del talud. También, es conveniente tratar la superficie para evitar la erosión, como en los casos anteriores, se puede utilizar una manta o una geomembrana.

En la figura 2.5 se puede observar el esquema de construcción de los escalones de matorral.

Figura 2.5 Escalones de matorral



Fuente: Mataix y López, 2007.

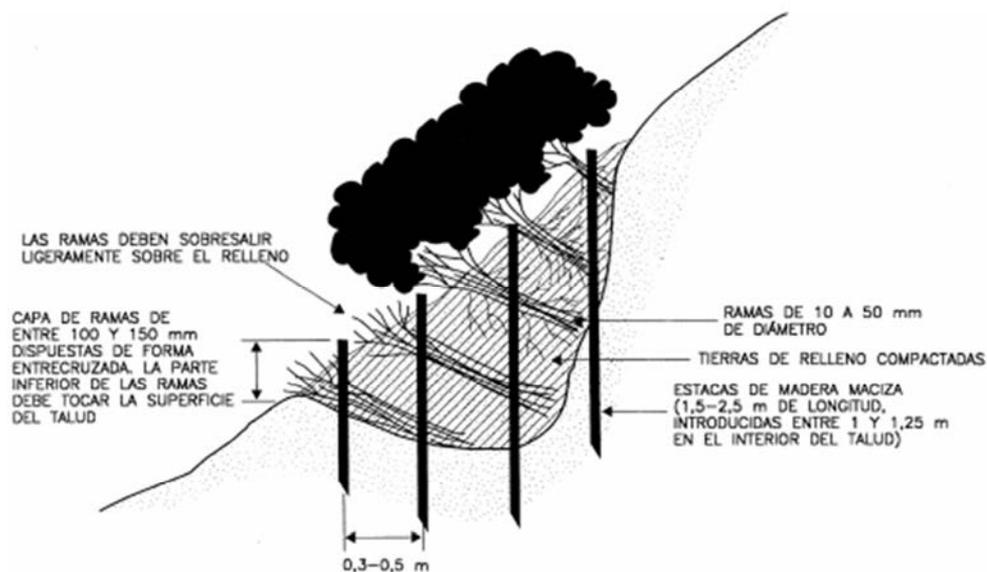
2.2.4 Paquetes de matorrales

Los paquetes de matorral se utilizan para reparar pequeñas depresiones originadas por deslizamientos pequeños (dimensiones menores a 1 m de profundidad y 2 m de ancho). La depresión es rellenada alternando capas de ramas con suelo de relleno compactado. Son efectivas para reforzar estas pequeñas zonas así como para evitar que la erosión continúe lavando ese material y generando mayor erosión.

Se utilizan ramas con capacidad de enraizamiento que se van colocando de manera alternada empezando desde el punto más bajo de la zona que se quiere reparar. Se deben clavar estacas de madera verticalmente a una profundidad de 1 a 1,25 m con distanciamientos entre 15 y 30 cm.

La figura 2.6 ilustra la construcción de los paquetes de matorral para relleno de pequeños deslizamientos o cárcavas, causadas por la erosión fluvial.

Figura 2.6 Paquetes de matorral



Fuente: Mataix y López, 2007.

2.2.5 Esteras de matorral

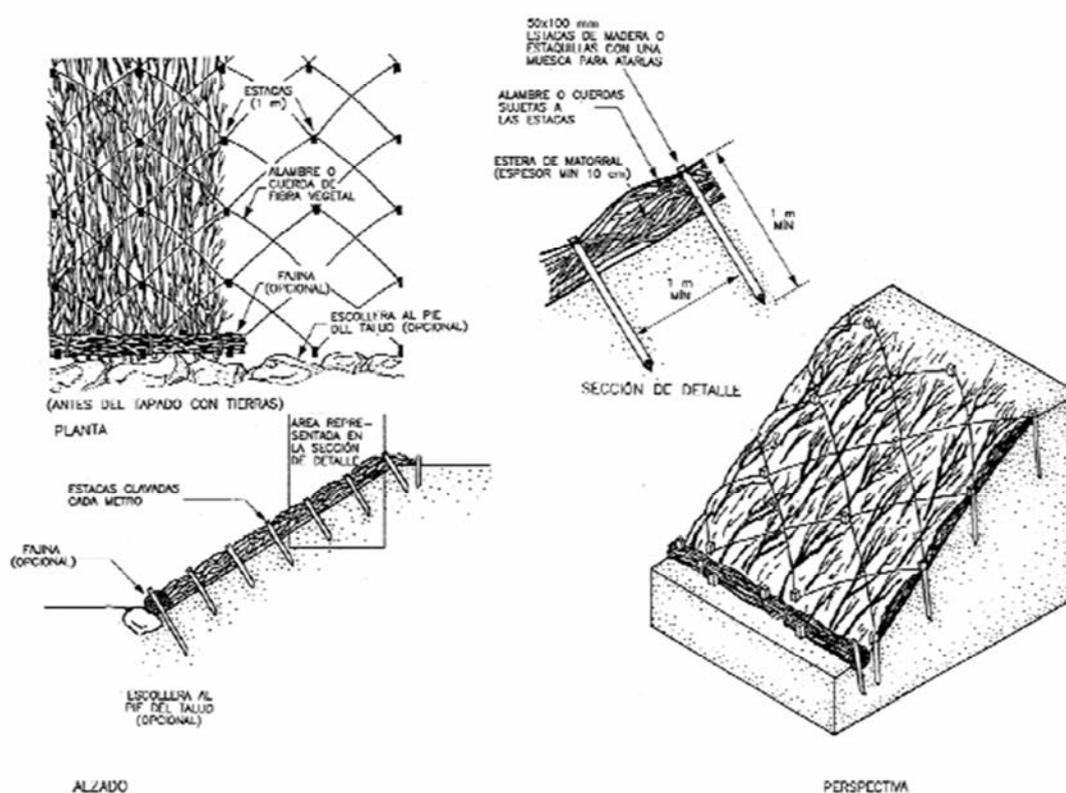
Son conjuntos de ramas entreteljidos en una capa gruesa que se colocan sobre la superficie del talud. Se afianzan al talud mediante el uso de estacas de madera y alambre. Estas esteras son una técnica indicada para tratar orillas de ríos o quebradas en las que la pendiente no supere 3H:1V. La protección brindada por este método es inmediata, y tiene la ventaja que con el pasar del tiempo se crea una franja espesa de vegetación arbustiva. También crean una superficie de fricción, reduciendo la velocidad de la corriente en contacto con ellas y por ende la energía erosiva.

Para este método deben utilizarse especies que sean flexibles, con capacidad de enraizar y además deben resistir estar cubiertas por agua. Se debe preparar el lugar de instalación removiendo piedras y troncos u otros obstáculos para lograr una superficie moderadamente uniforme. Luego se excava una zanja de 20 a 30 cm de profundidad justo por debajo del nivel mínimo del espejo de agua. Las ramas deben ser colocadas de manera tal que el

extremo inferior quede orientado hacia la cara del talud y perpendicularmente al perfil de la orilla. Todo el entretejido al estar compactado por las estacas debería tener un espesor mínimo de 10 cm.

En la figura 2.7 es posible observar un esquema para la construcción de esta técnica.

Figura 2.7 Esteras de matorral



Fuente: Mataix y López, 2007.

2.2.6 Estaquillado de revestimientos porosos de piedra ("Riprap")

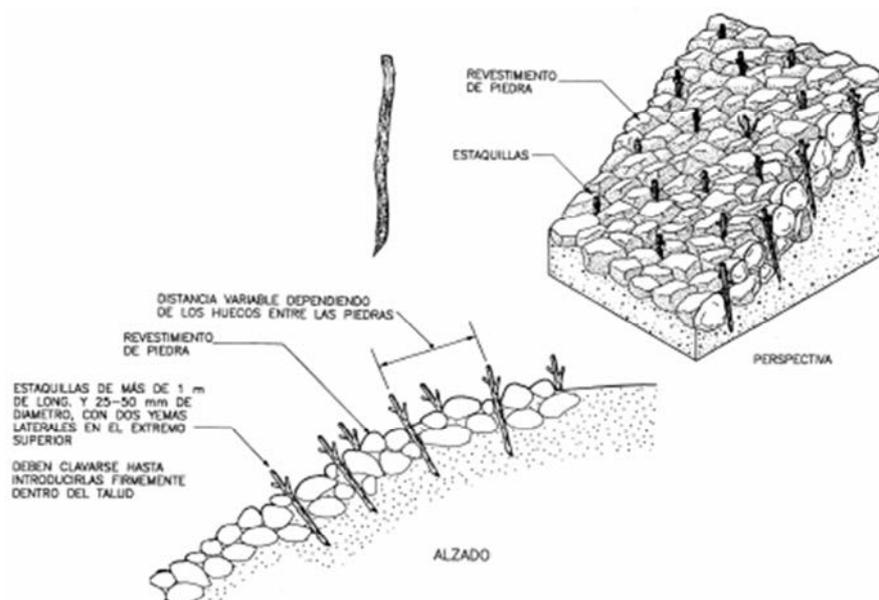
Como su nombre lo dice, este método consiste en insertar estacas de plantas maderosas lo suficientemente resistentes a través de los empedrados que recubren el talud. Una vez terminado el trabajo, cuando las estacas vivas están establecidas, las raíces drenan el exceso de agua del talud y además refuerza el efecto de protección del empedrado o recubrimiento evitando el arrastre de finos por debajo de las rocas. Es recomendable utilizar un geotextil

entre el suelo y el empedrado para evitar la migración de finos. Esta técnica es recomendada para taludes con pendiente máxima de 30° y en lugares donde el uso de rocas sea eficiente con respecto al costos (por ejemplo hay fuentes de roca en el lugar o en lugares cercanos para reducir costos de acarreo). Este método es favorable para proteger la base de un talud contra la erosión, para proteger de socavación la base de un barranco, o un sitio de descarga de alcantarilla o bien para proteger de la erosión superficial los espaldones de la carretera.

Para este método se puede utilizar pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), pasto guinea (*Panicum maximum*) o madero negro (*Gliricidia sepium*). Es conveniente distribuir las estacas de manera aleatoria sobre la superficie del revestimiento con una densidad de 2 a 5 estaquillas por metro cuadrado.

En la figura 2.8 se muestra un esquema del método de estaquillado de revestimientos porosos de piedra.

Figura 2.8 Estaquillado de revestimientos porosos de piedra ("riprap")



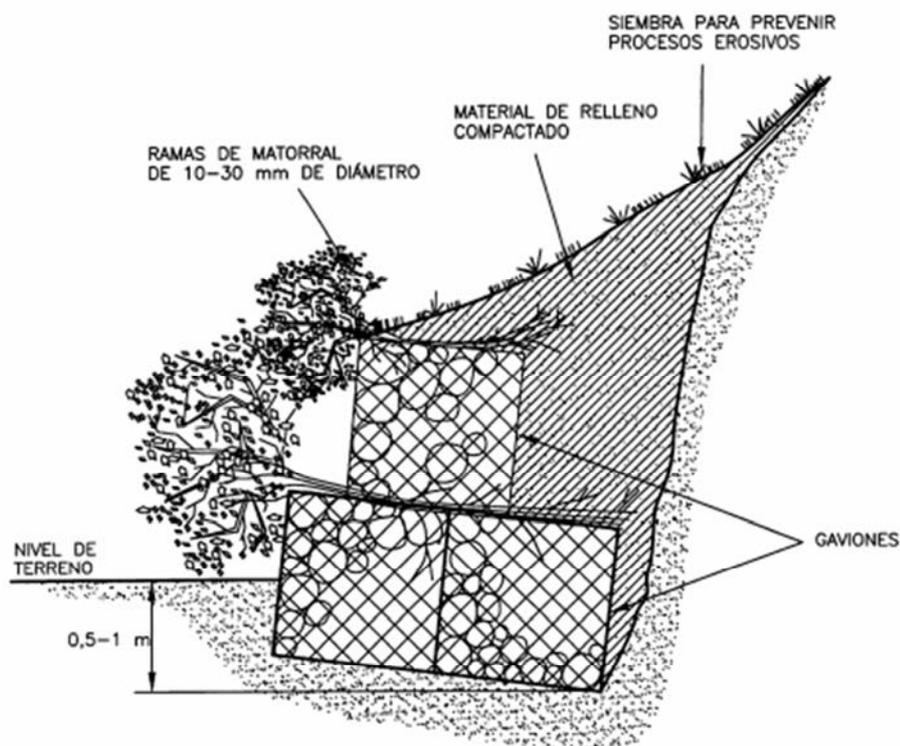
Fuente: Mataix y López, 2007.

2.2.7 Muros de gaviones con vegetación

Esta técnica consiste en la colocación de capas de ramas entre las hileras de gavión convencional. Tiene la ventaja de que le da una apariencia más natural al muro de gavión, mientras que a su vez arraiga la estructura al suelo de relleno que se coloca entre el talud y el muro. Para la construcción de este método, es necesario seguir los pasos para construir los muros de gaviones, con un leve cambio, entre las hiladas de canastas de gavión es necesario colocar ramas con capacidad de enraizamiento y posteriormente cubrirlas con suelo de buena calidad y luego compactando todo el paquete. Posteriormente se coloca la otra hilada de gavión, y el proceso continúa en todas las capas hasta llegar a la última. En donde también es necesario colocar ramas y rellenarlas dándole una pendiente adecuada al relleno.

Las ramas deben tener diámetros entre 10 y 25 mm y la longitud debe ser tal que logren atravesar toda la estructura del gavión y arraigarse en el suelo de relleno, además deben sobresalir a partir de la cara expuesta del muro. Las ramas son orientadas perpendicularmente al muro de gaviones. La figura 2.9 muestra un muro de gavión con vegetación introducida.

Figura 2.9 Muros de gaviones con vegetación



Fuente: Mataix y López, 2007.

2.2.8 Mini barreras vivas de control

Son pequeñas presas que se construyen a base de plantas vivas y materiales locales, son porosas y tienen como objetivo principal reducir las pendientes a lo largo de cárcavas o fisuras logrando disminuir la velocidad y por ende la capacidad erosiva del agua. Al mismo tiempo retiene los laterales de la cárcava y los refuerza y protege evitando que la cárcava incremente su tamaño. Este método es efectivo en la reparación de fisuras pequeñas con un ancho máximo de 2 m y profundidad máxima de 1 m y pendientes de hasta 40°. Se puede aplicar en taludes de relleno con condiciones de suelos compuestos por material no consolidado, en taludes en corte compuestos por escombros consolidados o matriz de roca arcillosa.

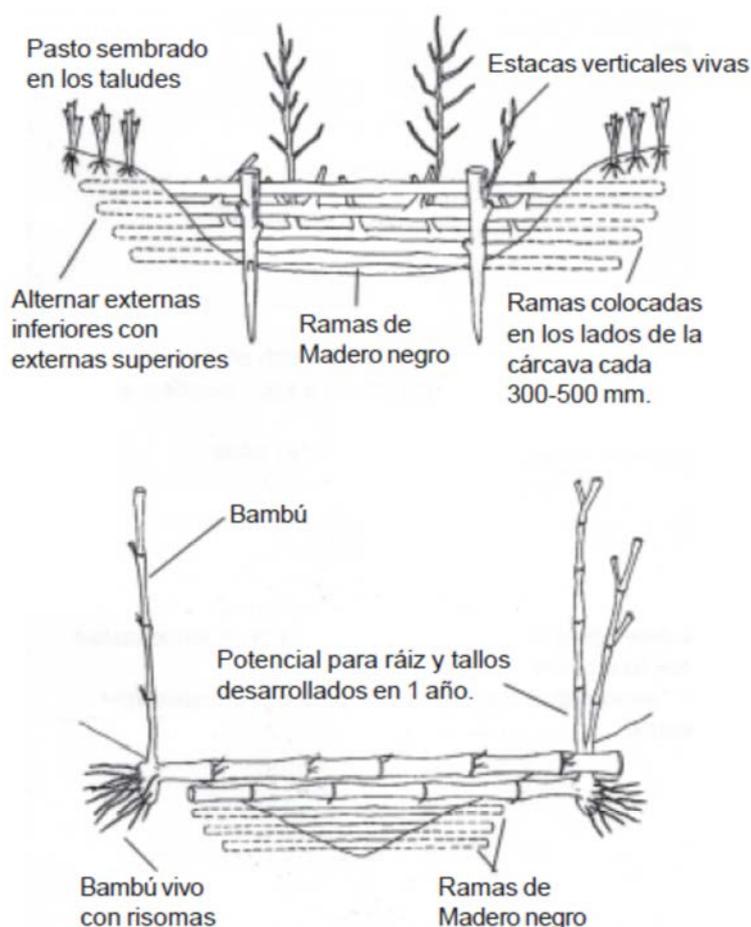
Para la construcción se necesitan estacas de madera, por ejemplo de madero negro. Tallos largos de pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) para presas de control livianas y pequeñas.

Tallos de bambú de 2 a 3 años de edad. Y pastos robustos con raíces fibrosas como el vetiver. Además maleza del sitio y rocas angulares para rellenar.

Es necesario realizar un corte en los taludes de la cárcava si estos son muy pronunciados, el material del corte se puede almacenar aguas arriba de la barrera. Se debe preparar luego grupos de 4 o 5 estacas de madera que serán la pared de la pequeña presa (fardos). Estas paredes se colocan en los costados de la cárcava y luego se compacta el material alrededor para que queden prensadas. Es importante asegurar un buen contacto entre el piso de la cárcava y el fardo ya que ahí se desarrollará la raíz del refuerzo. Estas paredes o fardos son sostenidos por estacas clavadas verticalmente que impiden que la estructura se lave. Estas estacas deben clavarse cada 30 a 50 cm.

Hay que asegurarse que el centro de la presa este más abajo que los costados de la cárcava para asegurar el paso del flujo por el centro de la misma y evitar socavación en los costados. La parte de atrás de la presa se rellena con maleza del sitio y rocas angulares. Es importante sembrar esquejes en los costados de la cárcava para evitar su expansión. Dependiendo de la pendiente longitudinal de la cárcava se pueden construir estas presas cada 2 o 3 metros siendo más eficientes muchas presas pequeñas que pocas grandes. Se presenta en la figura 2.10 el esquema de construcción de esta técnica.

Figura 2.10 Mini barreras vivas de control



Fuente: Modificado de Gray y Leiser, 1982.

2.2.9 Sampeado de piedra con vegetación

Esta técnica es similar al "riprap", sin embargo, se utiliza para proteger la base de un talud y así prevenir la erosión y socavación que pueden generar un desgaste del talud y un posible mecanismo de falla, así como daños en la base del talud por acumulación de sedimentos. Además atrapa material erosionado, reduciendo la cantidad de sedimentos que pueden caer en las cunetas para desagüe.

También provee refuerzo al material en la base del talud y mejora las condiciones de crecimiento de vegetación en esta zona, si se utiliza el material podado como abono orgánico. El uso de este método es válido en taludes de corte o de relleno bien consolidados. Sin embargo, no es conveniente utilizarlo en taludes formados por suelos sueltos. Es

importante ya que también brinda protección al desagüe del talud ante posibles taponamientos por exceso de sedimentos.

La aplicabilidad de este método se reduce a suelos con alto contenido de arena o limo y por ende muy erosionables, sin embargo, no es apropiado para material arcilloso pesado o muy húmedo y con tendencia a desplomarse.

Para su construcción es necesario utilizar rocas angulosas o bolones y esquejes o plántulas de algún pasto resistente como lo es el vetiver. Además, se pueden necesitar estacas de madera dura y en caso de ser necesario plántulas de árboles pequeños o arbustos. Es necesario realizar una limpieza en la base del talud para eliminar cualquier desecho, se recomienda hacer un ligero corte también en la base para formar una grada en la que se puedan colocar las rocas granulares sobre una superficie nivelada. El sampeado debe formarse de una altura de entre 30 y 50 cm con una base de 30 cm y un ángulo aproximado de 5 grados con la vertical. A medida que se va construyendo se agregan las plántulas o esquejes entre las rocas asegurando de que queden en contacto con el suelo, se deben sembrar esquejes también en el talud tanto en la base del sampeado como encima de este. En la parte superior del sampeado se pueden sembrar las estacas vivas de madera dura, como madero negro.

2.3 Proceso de selección de especies de plantas para estabilización de taludes y control de erosión

Según Moscoso (2003), existen varios criterios a tomar en cuenta para la realización de esta selección. Entre ellos se encuentran los criterios biotécnicos, criterios ambientales y por último los fitosociológicos.

El primero de los criterios mencionados, se refiere a que características debe tener la vegetación para hacer frente a los requisitos de estabilización y protección de la masa de suelo. Es importante definir primero cuál uso se le va dar a la vegetación. Por ejemplo, si se ocupa una función de recubrimiento y protección del suelo se utilizarán plantas fibrosas y superficiales, que sean capaces de crear cubiertas densas y continuas.

Por otro lado, si se quiere un efecto estabilizador y de control de pérdida de masa de suelo, hay que buscar entonces vegetación con capacidad de anclaje y refuerzo de dicha masa. Son ideales en este caso los sistemas radiculares fuertes y profundos de rápido desarrollo.

Se pueden utilizar especies herbáceas y leñosas para la estabilización de taludes (Moscoso, 2003), sin embargo especies más herbáceas son utilizadas para el control de erosión más que para contrarrestar posibles inestabilidades superficiales.

En cuanto a los criterios ambientales, es muy importante tomar en cuenta cuál es la capacidad de adaptación y tolerancia a las distintas condiciones micro-climáticas de las distintas zonas del país. Es importante que las especies se puedan desarrollar de una manera efectiva en el medio en donde se desempeñarán. Hay varios factores ambientales que se deben mencionar, como el bioclima, las características del sustrato y las consideraciones fitosociológicas.

El bioclima puede dividirse en dos niveles. El primero es el regional en donde se toman en cuenta las características de la zona en general, como la altura sobre el nivel del mar, la latitud y la distancia a la costa. El segundo nivel es el local, o microclima, las condiciones micro-climáticas dependen de factores como la exposición y orientación de las superficies a ser tratadas. Así como el tipo de suelo, su naturaleza y el tipo de cubierta, si existe, en esas superficies. Es aquí, donde se toman en cuenta aspectos del suelo como la fertilidad, la densidad y el pH del suelo.

Por último, los criterios fitosociológicos se refieren a las distintas interrelaciones que existen entre las especies de flora y fauna. Hay que tomar en cuenta que se está trabajando con elementos vivos y cambiantes, estos se relacionan con su entorno medioambiental.

Existe un ciclo de sucesión y evolución de las plantas que habitan en determinado lugar. Veamos por ejemplo, un medio alterado como lo es el corte de un talud. Este medio se transforma de un medio con buena fertilidad, debido a la existencia de una capa de materia orgánica bien definida, a uno con baja fertilidad debido a que el corte deja el suelo en un estrato menos orgánico. En estos casos, las especies llamadas pioneras, como lo son las gramíneas, pueden adaptarse a estas condiciones difíciles gracias a su alta producción y movilización de semillas así como su tolerancia a entornos alterados. Más adelante, cuando las condiciones de fertilidad se vuelven favorables para el desarrollo de plantas, estas especies son reemplazadas por otras aún más longevas en etapas más evolucionadas de esa sucesión en la evolución del entorno.

Por esta razón, para la implementación de la bioingeniería en determinado lugar, se utilizan normalmente gramíneas o poáceas (llamadas también plantas pioneras por su capacidad de adaptarse a condiciones difíciles) que pertenezcan a estas primeras etapas de sucesión vegetal.

Es conveniente utilizar una mezcla de especies pioneras con especies de crecimiento más lento y de más largo plazo para lograr una función estabilizadora capaz de perdurar lo largo de los años. Cuando se sigue esta práctica, de combinar especies pioneras con arbustos por ejemplo, los costos de mantenimiento suben ya que las plantas pioneras deben ser chapeadas y controladas para garantizar el crecimiento de las especies de crecimiento más lento.

2.4 Algunas especies nativas del país e introducidas con usos para estabilización de suelos

Es importante utilizar las especies de la zona que durante los años hayan sido reconocidas por los pobladores para la estabilización de taludes. Ya que de esta manera se reducen los costos de transporte de la planta y se genera trabajo en la zona donde se quiere aplicar la técnica de mejoramiento. A continuación se presenta una pequeña lista de especies conocidas y recomendadas para la estabilización de taludes en nuestro país.

Antes de entrar en las especies en específico, es conveniente presentar un cuadro resumen en donde se exponen las características de las plantas de acuerdo con su función en cuanto a bioingeniería de suelos se refiere, esto se expone en el cuadro 2.11.

Cuadro 2.11 Características de las plantas que determinan su adecuación a funciones de bioingeniería de suelos

1.- Morfología		
Raíces	Estructura	Horizontales
		Pivotantes
		Oblicuas o fasciculadas
Parte Aérea	Profundidad	Someras (>80% en los 15 cm superficiales)
		Profundas
	Densidad	
	Altura	
	Tallos	Sencillo (un tronco principal)
		Múltiples
Ramificados desde la base		
Hojas	Extendidos reptantes	
	Estrechas/largas	
	Pequeñas	
2.-Ciclo de Crecimiento	Flexibilidad	Grandes/anchas
	Anuales	Densidad de Follaje
		Capacidad de rebote
		Geófitas
Perennes	Terófitas	
	Fanerófitos y caméfitos (hoja caduca y perenne)	
	Hemicriptófitos (arrosetadas)	
3.-Forma Biológica	Ejemplares Individuales	
	En rodales	
	Propagación	Rizomas
estolones		
Brotos		
4.-Velocidad de crecimiento	Rapidez de establecimiento	
	Necesidades de mantenimiento	
5.-Resistencia al daño mecánico debido a:	Corrientes de Aire o Agua	Elasticidad de tallos y hojas
		Capacidad de deformación
		Resistencia a la tracción
	Rozamiento y Abrasión	Resistencia de los tejidos de tallos y raíces
		Capacidad de regeneración y rebrote
		Densidad de entramado superficial de raíces y
Enterramiento parcial de tallos	Deformación de raíces adventicias en la base del	
Exposición parcial de raíces	Capacidad para formar corteza	

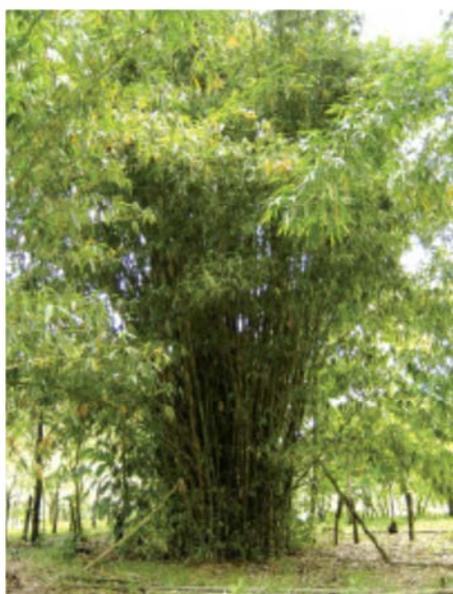
Fuente: Moscoso, 2003

2.4.1 *Bambusa vulgaris* (mejor conocido como bambú común)

Esta especie es clasificada como bambú, sus tallos pueden alcanzar alturas de hasta 18 metros, con diámetros de hasta 10 cm. Y las paredes internas pueden alcanzar un grosor de hasta 1,5 cm.

Su establecimiento se hace mediante la siembra directa o propagación vegetativa. Algunas otras especies de bambú son bastante invasivas por lo que se debe tener el cuidado respectivo sobre cual variedad se escoge. Esta planta tiene una resistencia al pastoreo buena, así como buena resistencia al fuego, son poco susceptibles a plagas o enfermedades. Puede crecer en alturas desde el nivel del mar hasta 3000 m.s.n.m, en suelos de superficiales a profundos ya sea bien drenados o que sean propensos a inundación. Crece en una amplia gama de tipos de suelo. Se desarrolla en temperaturas de 0° a 45° C. En la figura 2.12 se muestra una foto del bambú.

Figura 2.12 *Bambusa Vulgaris*



Fuente: Manual de bioingeniería, 2008.

Por la alta fibrosidad, profundidad y extensión de las raíces, estas especies de bambú han sido utilizadas con éxito en la estabilización de laderas y taludes. Forman una red de raíces que puede alcanzar los 5 m de profundidad y hasta 15 m de diámetro, esta actúa como refuerzo de la superficie y un contrafuerte natural en la base de las laderas. Sin embargo, si

son utilizadas en las partes altas de taludes susceptibles a estar en estado de saturación y con altas pendientes, su peso podría inducir a una falla de la ladera o del talud. Esta especie es muy competitiva y dominante, por lo que puede ser difícil utilizarlo en combinación con otros árboles de raíces profundas, a menos que sean sembrados al mismo tiempo. Esta especie no es muy apta para proteger el suelo contra la erosión. Pero si ayuda a mejorar el drenaje del suelo y le brinda un buen apoyo bajo la superficie.

Por la alta resistencia y fuerza de sus rizomas, que forman una cubierta apretada que protege el suelo alrededor de la macolla hasta una profundidad de 0,5 m, el bambú es ideal para la protección de taludes. Bajo los rizomas se extiende una red de raíces con un radio aproximado de 10 m, estas refuerzas todo el suelo alrededor de la macolla. Siempre que se utilice el bambú hay que tomar en cuenta que cada tallo puede llegar a pesar 30 kg y una macolla puede estar conformada por entre 50 y 70 tallos por lo que todo el conjunto puede llegar a pesar unas 2 toneladas. Los rizomas también pueden añadir pesos considerables a este conjunto, más aun en condiciones de humedad. Es importante que este peso sea tomado en cuenta por los análisis de estabilidad efectuados para el talud en específico. Esta carga debe tomarse en cuenta en la base del talud o ladera. Las macollas aisladas de bambú en pendientes mayores a 30° pueden ser susceptibles a deslizamientos, en condiciones de saturación del suelo, luego de fuertes tormentas (Manual de bioingeniería, 2005).

Una ventaja del bambú es su flexibilidad, esta le permite resistir fuertes vientos y tormentas que normalmente causan grandes daños a la vegetación. También existen otras variedades de bambú más pequeñas que también pueden ser utilizadas para bioingeniería siempre y cuando se sepa que no son invasivas. Es importante tomar en cuenta que las macollas de esta planta pueden ser difíciles de erradicar y compite con otros cultivos por la humedad y los nutrientes del suelo en distancias de hasta 10 metros. Por lo tanto se debe usar con cuidado en zonas adyacentes a cultivos y solo se debe colocar cerca de propiedades privadas con el debido permiso del dueño (Othman, 1989).

2.4.2 *Cynodon dactylon* (mejor conocido como pasto bermuda o grama)

Es un pasto perenne de la familia Poaceae. Es trepador con estolones (o brotes laterales que crecen paralelos al suelo) en ambas superficies y rizomas (o tallos subterráneos con varias yemas que crece de forma horizontal emitiendo raíces de sus nudos), este pasto puede alcanzar los 30 cm de altura. Su establecimiento se hace mediante la siembra directa o

propagación vegetativa. Tiene una buena resistencia al pastoreo y una moderada resistencia al fuego. Sin embargo es susceptible a plagas y enfermedades. En la figura 2.13 se muestra una foto del pasto bermuda.

Figura 2.13 Cynodon Dactylon



Fuente: http://www.missouriplants.com/Grasses/Cynodon_dactylon_page.html

Crece en suelos superficiales y profundos con un estado nutricional bajo, prefiere los suelos alcalinos y puede tolerar suelos inundados. Crece en alturas desde el nivel del mar hasta los 2000 m.s.n.m y en climas desde 8° a 45° C. Puede sobrevivir en una amplia gama de suelos.

La raíz no es fibrosa y es de poca profundidad pero tiene una extensión primaria regular. Si bien las raíces por ser tan pequeñas no capturan el suelo muy bien, si brindan muy buena protección contra la erosión, el factor de refuerzo del suelo es despreciable y no proveen un buen drenaje ni mejora del suelo. Puede ser un pasto invasivo por lo que el uso de esta planta debe realizarse con precaución.

2.4.3 *Gliricidia sepium* (mejor conocido como Madero Negro)

En la figura 2.14 se muestra una foto del madero negro en uno de sus usos como cerca viva.

Figura 2.14 *Gliricidia sepium*



Fuente: Fernández, 2011

Es un árbol sin espinas y de múltiples tallos, que puede alcanzar alturas de 10 a 15 m en caso de dejarse sin podas regulares. En la estación seca puede perder las hojas. Su establecimiento se hace mediante siembra directa, mediante plántulas o por propagación asexual por estacas. Es necesario darle mantenimiento, como poda regular para que no crezca mucho, su resistencia al pastoreo es regular, igual lo es su resistencia al fuego así como resistencia a plagas o enfermedades.

Este árbol puede establecerse en suelos profundos y superficiales y de un estado nutricional bajo, tiene buena fijación de nitrógeno. Se puede establecer en suelos con pH entre 5 y 11, pero no tolera inundación. Se puede establecer en una amplia gama de suelos y en alturas desde el nivel del mar hasta los 1500 m.s.n.m y un rango de temperaturas desde los 5° hasta los 45° C.

La raíz no es muy fibrosa y tiene una profundidad regular al igual que su extensión. Es buena para capturar el suelo y le brinda cierta protección, le brinda al suelo un buen apoyo y una razón de refuerzo regular, no drena muy bien, pero si mejora el suelo. Tiene la ventaja de que la propagación es sumamente sencilla, y se puede realizar a partir de estacas en posición horizontal, lo que la hace ideal para usar en barreras densas y mini presas de control vivas.

Por ser tolerante a una amplia gama de condiciones climáticas y suelos es muy versátil. La poda ocasiona que algunas de las raíces mueran por lo que tiene implicaciones para la fuerza de la estructura en bioingeniería. Estos árboles son utilizados como cercas vivas, y las hojas pueden ser utilizadas como abono orgánico rico en nitrógeno.

2.4.4 *Panicum maximum* (mejor conocido como pasto guinea)

En la figura 2.15 se puede apreciar el pasto guinea sembrado en un talud.

Figura 2.15 *Panicum Maximum*



Fuente: Starr, 2003. Tomada de: <http://www.hear.org/starr/images/image/?q=030626-0021&o=plants>

Es un pasto perenne de la familia Poaceae puede ser suelto o tupido con una altura que oscila entre los 0,75 y 2,0 m. Su establecimiento se hace mediante la siembra directa o propagación vegetativa. Este pasto tiene una buena resistencia al pastoreo, regular resistencia al fuego y regular resistencia a plagas o enfermedades. Este pasto puede vivir en suelos superficiales y profundos con estado nutricional bajo. Se establece mejor en suelos drenados y prefiere suelos de baja densidad. Se puede establecer en alturas desde el nivel del mar hasta los 2500 m.s.n.m y un rango de temperaturas desde los 8° a 45° C.

La raíz es de fibrosidad media y de profundidad media, pero de poca extensión. Provee una baja captura de suelo sin embargo, si brinda una protección adecuada contra la erosión, el factor de reforzamiento es leve, y si logra drenar el suelo de manera satisfactoria. La raíz es superficial de aproximadamente 0,2 m.

2.4.5 *Pennisetum purpureum* (mejor conocido como pasto elefante)

Es un pasto perenne robusto perteneciente a la familia Poaceae, puede tener tallos de hasta 3 cm de diámetro en la base y alturas de hasta 2,5 m. Se caracteriza porque forma macollas grandes y anchas. Su reproducción se hace mediante propagación vegetativa. Es un pasto comúnmente utilizado para el pastoreo, por lo que es resistente ante el mismo. La resistencia al fuego de este pasto es muy mala así como su resistencia a plagas y enfermedades. Se adapta bien en suelos de profundidad media y necesita un estado nutricional en el suelo de mediano a alto. Se desarrolla mejor en suelos húmedos pero puede sobrevivir en una gran variedad de suelos. En altitudes desde el nivel del mar, hasta unos 2000 m.s.n.m. Se establece bien en temperaturas entre los 10° y 45° C.

La raíz tiene una fibrosidad media, igual su profundidad y extensión son regulares. Este pasto no es muy bueno capturando el suelo, pero si brinda una protección aceptable, por otro lado provee una razón de refuerzo y de apoyo al suelo baja. También tiene la capacidad de drenar el suelo en menor medida, y lo mejora relativamente poco. En comparación con el pasto vetiver, el pasto elefante no es tan efectivo cuando se usa en una sola hilera, esto se debe a que la separación entre tallos es bastante ancha como para controlar el flujo de agua y evitar el paso de partículas de suelo. Sin embargo es importante recalcar que sus raíces tienen una resistencia a la tensión adecuada y pueden alcanzar hasta 30 cm de profundidad por lo que pueden ayudar a estabilizar masas de suelo de poca pendiente y evitar el movimiento de las mismas. En la figura 2.16 se muestra una foto del pasto elefante.

Figura 2.16 Pennisetum Purpureum



Fuente: Starr, 2003. Tomada de: <http://www.hear.org/starr/images/image/?q=031108-0226&o=plants>

La propagación se hace mediante cortes de tallos, esta planta a diferencia del vetiver si tolera sombra parcial por lo que se puede utilizar para estabilizar taludes que no reciban la luz directa del sol durante todo el día. Cuando se utilice para estabilización, funcionan mejor los tallos de tres anillos, estos deben colocarse en forma horizontal en el suelo y deben colocarse capas de anillos si se caen los tallos.

2.4.6 *Psidium guajava* (mejor conocido como árbol de guayaba)

Estos árboles, pertenecientes a la familia Myrtheceae, son comunes en todo el territorio nacional, por lo general tienen una altura máxima de 8 m, y tienen la característica de que su copa simétrica y sus ramas son irregulares. El establecimiento se puede hacer de varias maneras, siendo la más efectiva el uso de plántulas, se puede realizar la siembra directa y la propagación vegetativa con una efectividad regular.

Este árbol si podría ocupar podas regulares para darle forma, tiene una resistencia al pastoreo, al fuego y a las enfermedades y plagas regular. Puede establecerse en suelos superficiales y profundos con estado nutricional bajo. Es mejor sembrar en suelos con pH entre 4,5 y 8,2. Tiene buena tolerancia a inundaciones y prefiere tipos de suelos livianos o poco densos. Se desarrolla bien en alturas entre el nivel del mar y los 1400 m.s.n.m y en

temperaturas entre los 0° y los 45° C. En la figura 2.17 se muestran las principales características fisiológicas del árbol de guayaba.

Figura 2.17 *Psidium guajava*



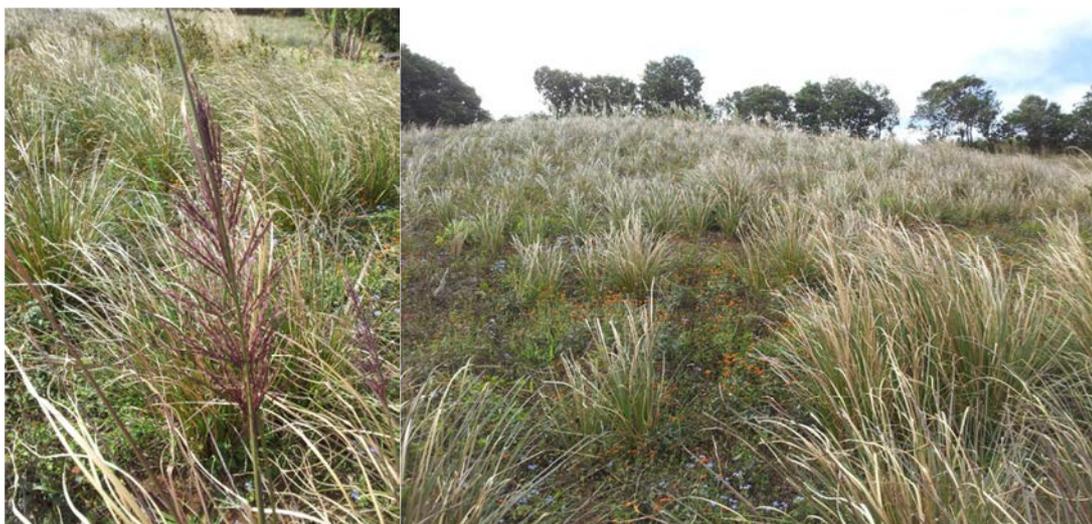
Fuente: <http://swbiodiversity.org/seinet/imagelib/imgdetails.php?imgid=22072>

La raíz tiene una fibrosidad regular, su profundidad también es regular al igual que la extensión de las mismas. Tiene raíces primarias muy extensas y por su fácil propagación es un árbol adecuado para estabilizar el suelo. Hay que tomar en cuenta que existe un riesgo de que se convierta en maleza.

2.4.7 *Chrysopogon zizanioides* syn. *Vetiveria zizanioides* (mejor conocido como pasto vetiver)

En la figura 2.18 se muestran dos fotos de plantas de vetiver.

Figura 2.18 Planta de vetiver floreada (izquierda), talud sembrado con vetiver



Es un pasto perenne tupido de la familia Poaceae y es en el que se enfoca la parte experimental de este trabajo. Se caracteriza por formar grandes macollas de diámetros considerables. El tallo puede alcanzar unos 3 m de longitud pero alturas de 1 m o 1,5 m son más comunes. El establecimiento de este pasto se da solo por propagación vegetativa. Este pasto tiene la ventaja de que tiene una alta resistencia al pastoreo, igualmente una alta resistencia al fuego y no se ve afectado por plagas o enfermedades ya que sus raíces y tallos generan un olor que ahuyenta a roedores e insectos y no es susceptible a enfermedades.

Se puede establecer en suelos superficiales y profundos con pH entre 4 y 11, resiste una variedad de condiciones de drenaje ya que puede estar sumergida o en ambientes casi desérticos. Además se logra establecer bien en una gran variedad de suelos en alturas que van desde el nivel del mar hasta los 1500 m.s.n.m. Sin embargo también se puede sembrar en alturas mayores sacrificando un poco la rapidez de crecimiento. Sobrevive bien en temperaturas entre los 0° y los 46° C.

Esta planta es ideal para su uso en la bioingeniería ya que su raíz es muy fibrosa, así como profunda y de gran extensión. Tiene la ventaja de que logra capturar las partículas de suelo así como protegerlo de manera adecuada. Su razón de refuerzo es muy alta, y es capaz de

drenar el suelo y mejorarlo levemente. Este pasto ha sido utilizado por décadas como barrera viva en muchos países del mundo. El costo de mantenimiento es bajo, y es una planta sencilla de establecer. Es por eso que ha sido utilizada como barrera contra la erosión en orillas de caminos, campos agrícolas, taludes de carretera y laderas. Esta planta tiene la ventaja de que no es invasiva y las pocas semillas que produce no son viables por lo que la propagación debe hacerse mediante retoños y esquejes además presenta poca o nula floración.

Las raíces de esta planta son numerosas, tienen una buena resistencia a la tensión y una fibrosidad muy adecuada para la estabilización de taludes. Cuando se siembran a cierta distancia entre ellas, las plantas generan una red subterránea densa de raíces que sirve como un muro. En algunos casos se han observado raíces de hasta 3 m de profundidad pero es conveniente usarla de manera conservadora ya que en promedio sus raíces alcanzan los 0,5 m. Los tallos son fuertes y duros y actúan como un empalizado de madera a lo largo de un talud, frenando la escorrentía y sosteniendo todas las partículas erosionadas o transportadas por el agua.

Las raíces también tienden a aumentar la infiltración y por la tolerancia del entierro parcial, pueden rebrotar y volver a establecerse luego de ser cubiertas por tierra. En California se ha comprobado que después de grandes incendios, este pasto ha tenido la capacidad de restablecerse a los pocos meses de ocurrido este evento y sus raíces continúan trabajando en todo momento.

No es necesario podar este pasto pero alguna gente prefiere podarlo por estética, sin embargo para que las raíces trabajen en todo su potencial lo recomendable es no podarlo.

2.4.8 Otras plantas y árboles importantes en Costa Rica para la estabilización de taludes

Existen también otros tipos de plantas que han sido utilizadas con éxito para la estabilización de taludes en Costa Rica. Entre estas especies, es posible mencionar el Itabo (*Yucca Guatemalensis*). Un arbusto con una raíz de gran profundidad, el autor ha observado raíces de Itabo que pueden penetrar hasta 3 metros bajo la superficie. Las raíces principales de este arbusto son del tipo pivotante. Por lo que se caracterizan por tener una sola raíz primaria muy larga y pocas raíces de tipo secundario. Esta planta es utilizada como para la confección de cercas vivas en la corona de taludes a lo largo de todo el país. En estos casos,

las raíces de estos arbustos forman una especie de cortina que penetra el suelo y logra anclarlo a estratos más competentes.

El Itabo puede alcanzar una altura de hasta 10 m en su edad adulta. Por otro lado, es capaz de desarrollarse en alturas desde 0 m.s.n.m hasta los 1000 m.s.n.m.

Más adelante en este trabajo se expondrán las especificaciones detalladas para el establecimiento de este tipo de pasto y todos los pasos a seguir para su cuidado y mantenimiento, así como las técnicas recomendadas de siembra.

Además de las especies ya mencionadas en detalle, se presenta en el cuadro 2.19 una lista de plantas comúnmente utilizadas para la estabilización de taludes y control de erosión. Todas las plantas mencionadas en el cuadro son ya sea, nativas o introducidas en país, con cuatro excepciones: *Hipaeremia Rufa* Stapf, *Disitaria Decumbens*, *Centrosema Plumieri* y *Desmodium spp* (Hammel et al, 2002).

Cuadro 2.19 Plantas utilizadas comúnmente en estabilización de taludes.

Nombre Científico	Nombre común	Altitud msnm	Temperatura	Lluvias MM/Año	Reproducción	Invasor	Resist Quemaz	Resist Plisoteo	Resist Sequias	Terreno
Vetiveria Zizanooides	Vetiver	0 a 2000	5 a 45	600 a 6000	Tallos enraizados	No	Si	Si	Si	Preferentement e húmedo
Brachiaria Decumbens Stapf	Braquiaria	0 a 2200	20 a 30	800 a 4000	Cepas, estolones y semillas	Si	Si	Si	Si	Bien drenado, ácido
Melinis Minutiflora	Gordura	300 a 3300	18 a 27	800 a 3000	Semillas	No	No	No	No	Bien drenado a húmedo
Pennisetum Clandestinum	Kikuyo	0 a 3300	10 a 30	800 a 2000	Estolones y semillas	Si	Si	Si	Si	Bien drenado a húmedo
Hiparrhenia Rufa Stapf	Puntero	0 a 2000	20 a 30	600 a 1000	Cepas y semillas	No	No	Si	Si	Bien drenado
Dicranthium Aristatum	Angleton	600 a 1800	23 a 30	1000 a 4000	Estolones y semillas	Si	No	Si	No	Bien drenado neutro
Festuca Arundinacea	Festuca	2000 a 3200	15 a 20	900 a 1700	Semillas	No	No	No	No	Húmedo a bien drenado
Panicum Maximum	Guinea	0 a 2200	20 a 30	1000 a 4000	Cepas y semillas	No	No	No	No	Húmedo a bien drenado
Brachiaria Mutica	Para-Admirable	0 a 1700	22 a 30	1000 a 4000	Estolones	Si	Si	Si	No	Húmedo
Digitaria Decumbens	Pangola	0 a 2200	18 a 30	1000 a 2000	Estolones	Si	Si	Si	Si	Húmedo a bien drenado
Lolium Perenne	Raigras Perenne	2200 a 3000	10 a 20	1500 a 4000	Semilla	No	No	Si	No	Húmedo
Centrosema Plumieri	Centro	0 a 1600	25 a 30	600 a 1000	Cepas (Rastrero)	Si	No	Si	Si	Secos
Pueraria Phaseoloidea	Kudzu Tropical	0 a 2000	22 a 30	1000 a 2000	Cepas (Rastrero)	Si	No	No	No	Húmedo a bien drenado
Desmodium spp.	Pega - Pega	0 a 3000	18 a 30	1000 a 2000	Cepas (Rastrero)	Si	No	No	Si	Bien drenado
Stenotratum Secundatum	San Agustín	300 a 2000	18 a 25	1000 a 2000	Cepas	Si	No	No	Si	Bien drenado
Pennisetum purpureum	Elefante	300 a 2300	18 a 27	1000 a 3000	Cepas, estolones y semillas.	Si	No	Si	No	Húmedo neutro
Cymbopogon Citratus	Limonaria	300 a 2000	18 a 25	1000 a 3000	Estolones	No	No	Si	Si	Bien drenado

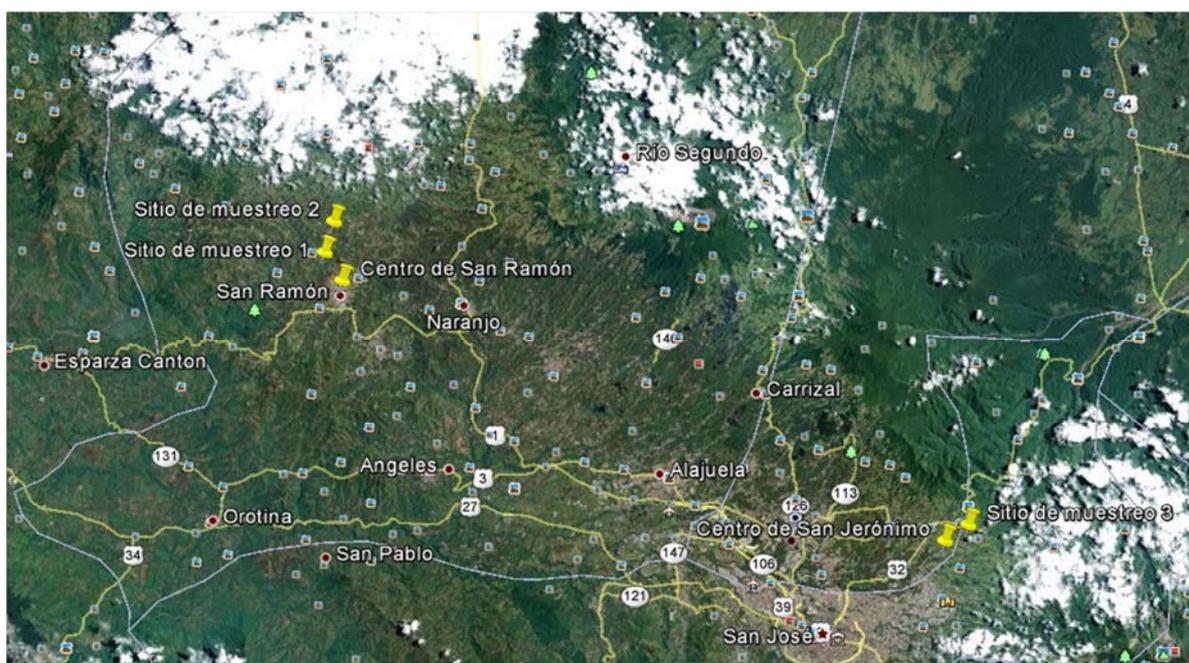
Fuente: Suarez, 1998

3 ENSAYOS EXPERIMENTALES

3.1 Descripción de los suelos

Para introducir esta sección se presentará una pequeña descripción de los sitios de muestreo, así como las principales características de los suelos en cada uno de ellos. Primero se mostrará en la figura 3.1 la ubicación de los sitios de muestreo mediante el uso de imágenes de satélite obtenidas a partir del programa Google Earth.

Figura 3.1 Sitios de muestreo seleccionados



Fuente: Google Earth, 2012.

3.1.1 Sitio de muestreo No. 1

Este sitio se ubica en San Ramón de Alajuela, en la finca llamada El Bosque, propiedad de Don Francisco Cruz y Doña Yorleny Cruz. Según la figura 1.5 del Código de Cimentaciones de Costa Rica (CCCR por sus siglas), en el área de San Ramón existen dos tipos de suelos, los arcillosos con alto potencial de expansión y suelos residuales de origen volcánico del tipo MH o ML.

Este sitio de muestreo se encuentra al noroeste del centro de la ciudad de San Ramón, ver figura 3.3. Los suelos son de color rojizo, en verano presentan una dureza marcada, mientras que en invierno se vuelven plásticos. Características intrínsecas de los limos y las arcillas de alta plasticidad.

Es un sitio de topografía relativamente quebrada, con partes planas. La muestra para la caracterización del suelo fue tomada de un talud a unos 25 cm de profundidad.

3.1.2 Sitio de muestreo No. 2

Este sitio se ubica en San Ramón de Alajuela, en la finca llamada La Esperanza. Esta propiedad se ubica al norte del centro de la ciudad de San Ramón (ver figura 3.3), al igual que el sitio de muestreo no. 1, ésta también presenta suelos arcillosos y limosos.

Esta finca es de una topografía más homogénea, es levemente quebrada y presenta taludes largos de poca pendiente, estos taludes ubicados en la parte oeste, se encuentran actualmente sembrados con vetiver. La parte este de la finca está sembrada de caña, debido a la presencia de un ingenio en las cercanías.

Los suelos de esta propiedad son de color café claro y en ocasiones café oscuro. En verano presentan una buena dureza. En invierno, son susceptibles a la erosión por escorrentía de aguas superficiales (ver figura 3.2).

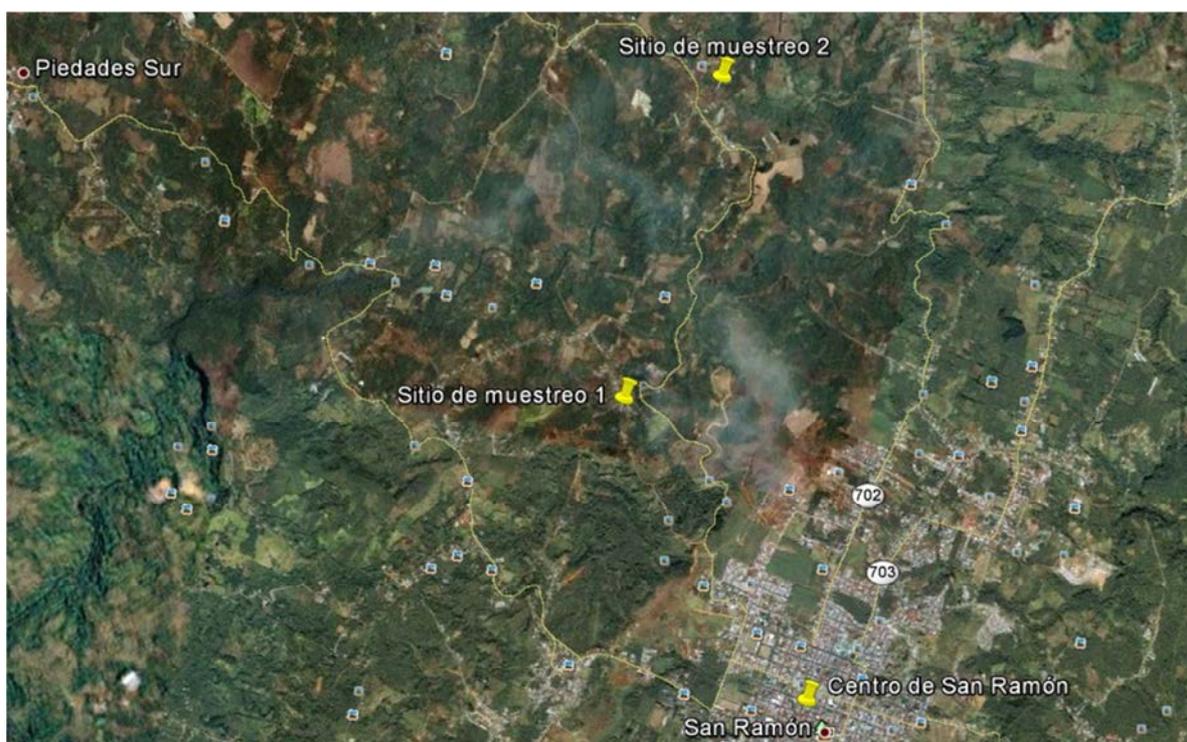
Figura 3.2 Fotografía de un talud con problemas de erosión y movimiento de masa en la calle entre los sitios de muestreo 1 y 2



En la figura 3.2, es posible apreciar los problemas que de erosión y deslizamientos superficiales que se presentan en esta zona de San Ramón. Este talud debería ser intervenido con una alternativa de bioingeniería de las discutidas anteriormente para prevenir la posterior pérdida de suelo.

Este talud se volvió susceptible a la erosión y a la pérdida de masa posiblemente por las actividades de agricultura intensivas y a posibles quemas originadas por estas mismas actividades. La falta de planificación en las zonas agrícolas puede genera problemas de este tipo por lo que es recomendable concienciar a la población para que le dé un mejor manejo a sus tierras. La figura 3.3 muestra un acercamiento de los sitios de muestreo 1 y 2.

Figura 3.3 Sitios de muestreo 1 y 2



Fuente: Google Earth, 2012.

3.1.3 Sitio de muestreo No. 3

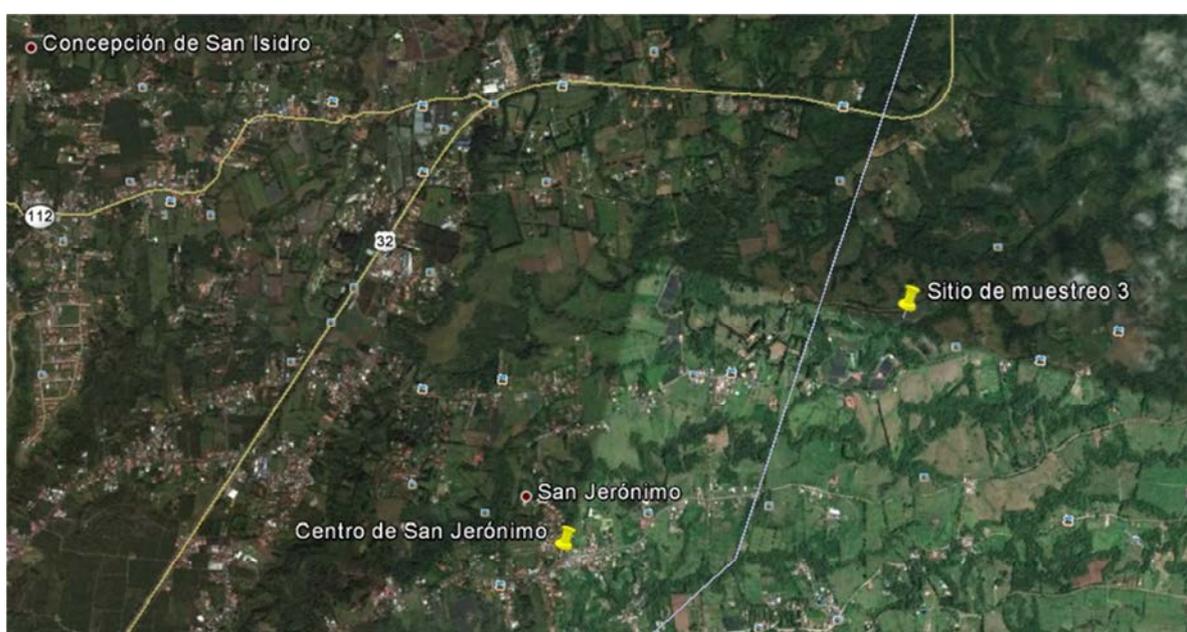
Este sitio se ubica en San Jerónimo de Moravia, en la finca llamada La Jaula, propiedad de Don Oscar Madrigal. Está ubicado al este del centro del distrito de San Jerónimo en el cantón de Moravia. De acuerdo con la figura 1.5 del CCCR esta zona presenta suelos de origen volcánico, con altas relaciones de vacíos, así como pesos unitarios bajos y en ocasiones son colapsables. Pueden presentar humedades naturales muy altas, estas con frecuencia son superiores al 100%.

En el estrato superior, los suelos son de color café oscuro, son sueltos y blandos; con betas color café muy claro y presencia de gran cantidad de minerales volcánicos cristalizados. En el estrato siguiente, el suelo es de un color café muy claro, con consistencia de arena gruesa y sucia.

Este sitio de muestreo se encuentra dentro de una finca dedicada al cultivo de plantas ornamentales, a lo largo de la finca se utilizan el maní forrajero así como el vetiver para la estabilización de los taludes de altas pendientes.

La zona de San Jerónimo es lluviosa la mayor parte del año. Por lo que los suelos siempre presentan alto contenido de humedad natural. La ubicación del sitio de muestreo se puede apreciar en la siguiente figura. En la figura 3.4 se puede apreciar la ubicación del sitio de muestreo no. 3. El talud de donde se obtuvieron las muestras, se puede apreciar en la figura 3.5.

Figura 3.4 Sitio de muestreo no. 3



Fuente: Google Earth, 2012.

Figura 3.5 Talud del cual se obtuvieron los especímenes del sitio de muestreo no.3



3.2 Descripción de los ensayos de caracterización y del muestreo

Los ensayos de laboratorio dependen en gran medida del muestreo in situ, esto para lograr obtener muestras representativas que reflejen el estado real del suelo. Por lo general, la remoción de las muestras de suelo de su entorno, genera perturbaciones en el estado natural del mismo. Existen algunas técnicas de muestreo que permiten la obtención de las llamadas muestras inalteradas, en las cuales se utilizan tubos de pared delgada que luego se sellan herméticamente para preservar el contenido de humedad natural del suelo. Existen también otros tipos de técnicas con las que se obtienen muestras alteradas de suelo ya que la estructura original no permanece intacta. Por el contrario el suelo se parte en porciones más pequeñas que tienen densidades y estructuras internas diferentes a las del campo.

La escogencia del tipo de muestreo que se debe realizar depende del tipo de información que se requiera extraer del suelo. En el caso de este proyecto, las muestras alteradas son suficientes para la etapa de caracterización. Sin embargo, para obtener las propiedades ingenieriles del suelo si fue necesario utilizar las técnicas de muestreo inalterado que se mencionan anteriormente. Ver Lowe y Zaccheo (1991) para las técnicas de muestreo detalladas.

Existen además los ensayos en campo (o ensayos in situ), estos permiten determinar las propiedades del suelo en campo. Este tipo de ensayo produce una variedad de información detallada acerca del suelo, como lo es la estratigrafía y las variaciones tanto en profundidad como en superficie. Estos ensayos in situ generalmente se basan en cálculos empíricos y correlaciones entre las medidas obtenidas en campo y las propiedades del suelo estudiadas en el laboratorio.

Siempre es importante a la hora de obtener resultados experimentales, compararlos con otros resultados obtenidos en otras investigaciones para validarlos. Es importante entender o estudiar los hechos que generen las posibles similitudes o discrepancias.

Para una adecuada clasificación de los suelos es importante conocer y entender los posibles ensayos que se pueden utilizar con esos fines. En primer lugar está el análisis granulométrico, este puede ser realizado mediante la utilización de mallas o tamices o mediante procesos de sedimentación como la prueba del hidrómetro. O bien un análisis combinado de ambos. El objetivo de este análisis es determinar la distribución de tamaños de partícula en para los suelos de grano fino y de grano grueso.

Por otro lado, se deben realizar los ensayos para determinar los límites de Atterberg, como lo son el límite líquido, el límite plástico y si se quiere límite de contracción. Con la realización de estos ensayos se puede determinar la plasticidad de los suelos de grano fino.

Una vez obtenidos estos datos, se puede proceder a realizar una clasificación del suelo de acuerdo a la metodología SUCS y a la metodología AASHTO. Ambas basadas en los resultados que arrojan tanto el análisis granulométrico como los límites de Atterberg.

3.2.1 Análisis Granulométrico

Todo suelo está constituido por distintas cantidades de partículas de diferentes tamaños. Un análisis granulométrico, se encarga de dividir estas partículas en grupos de acuerdo a su tamaño y determina la proporción por peso relativa en la muestra de suelo. Este es básico para poder identificar el tipo de suelo y clasificarlo de acuerdo a las metodologías de clasificación existentes. De acuerdo con estas metodologías el suelo se puede dividir en categorías de acuerdo a los tamaños predominantes de partículas. Entre ellas y ordenadas de mayor a menor tamaño están: los bloques, cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas. Además está la posibilidad de subdividir esas categorías en grueso, medio y fino. Esta

investigación se enfoca más que todo en los suelos de grano fino como lo son las arenas, limos y arcillas, que son los más predominantes en Costa Rica.

Las partículas de suelos tienen una variación de tamaños que va desde superior a los 200mm hasta menor de 0,002mm. La razón de variación entre estos extremos es de 100.000. Conforme decrece el diámetro de partícula D , el número de partículas contenido en una unidad de masa de suelo incrementa de acuerdo a la proporción de $1/D^3$ y su masa individual decrece en esa misma razón. La medida de superficie específica, que es el total de área superficial de partículas por unidad de masa, es una característica muy importante sobre todo en suelos finos. Esta medida es proporcional a la interacción entre las partículas pequeñas que depende de las fuerzas electrostáticas. El área superficial de partículas incrementa conforme disminuye el diámetro de partícula, a razón de $1/D$, esto es idealizando las partículas como pequeñas esferas. Sin embargo las partículas en la realidad tienen formas bastante más complicadas que la de una esfera. Por lo que conforme disminuye el diámetro la superficie específica es todavía mayor.

Como ya se comentó en los párrafos anteriores existe una división de acuerdo con el tamaño de las partículas, sin embargo en la realidad un suelo no se puede clasificar por completo bajo una de esas categorías. Por el contrario los rangos de tamaño en un suelo determinado pueden tener porcentajes de 2 o más de esas categorías. Debido a que sería una tarea demasiado tediosa ponerse a contar individualmente todos los tamaños de todas las partículas, se realiza una representación gráfica de las partículas acumuladas entre distintos rangos de partículas. Por lo tanto se utiliza una curva granulométrica que se dibuja de acuerdo a un porcentaje de grano más fino que un determinado tamaño contra porcentaje pasando en escala logarítmica. Dibujar esta curva en un gráfico estándar permite identificar inmediatamente la graduación característica del suelo. Además la posición de la curva en el gráfico permite determinar si el suelo es mayoritariamente grueso o fino. Y la pendiente de la curva y forma general proporciona datos sobre la distribución de partículas.

3.2.2 Límites de Atterberg

El comportamiento ingenieril de los suelos de grano fino, no solo depende de la distribución de partículas, por el contrario, este comportamiento se ve enormemente afectado por otros factores, entre los cuales uno de los más importantes es el agua. También la micro y macro estructura mineral y la composición. Los límites líquido y plástico ayudan a caracterizar el

posible comportamiento de los suelos ante variaciones en el contenido de humedad, así como a comprender su composición mineral y sus propiedades ingenieriles.

El secado al horno elimina por completo el contenido de agua en suelos sin partículas arcillosas, sin embargo elimina solo parcialmente el contenido de agua en suelos con contenido de arcillas. Esto se debe a que las partículas arcillosas interactúan de una manera más complicada con el agua. Esta interacción se puede dividir en tres categorías. Primero, el agua adsorbida, que es agua retenida en la superficie de la partícula por fuertes fuerzas electrostáticas. Esta agua adsorbida no se puede remover con secado al horno y es considerada parte de la estructura del suelo. Segundo, el agua combinada químicamente en forma de agua de hidratación de la estructura cristalina. A esta capa se le conoce como la doble capa, esta agua con algunas excepciones no puede ser removida tampoco por el secado en el horno. Finalmente el agua intersticial, que no está tan ligada a la estructura propia del suelo, puede ser removida con secado aire o secado al horno.

Las propiedades de una arcilla, son muy variables en presencia de agua. Esto significa que cuando se incrementa gradualmente el contenido de agua, las arcillas se van suavizando hasta eventualmente convertirse en una pasta que se comporta como un líquido viscoso, a esto se le llama estado líquido. Si este contenido de agua es reducido gradualmente, la arcilla empieza a endurecerse, unirse y a tener cierta resistencia a la deformación, a esto se le llama estado plástico. Si se remueve posteriormente más humedad, la arcilla se encoje, su rigidez aumenta todavía más, este es el estado semisólido. Si se sigue secando más, llega un punto donde alcanza su volumen mínimo. En ese punto ya no es susceptible a cambios de volumen si se sigue secando, este es el estado sólido. El cambio entre estos estados es gradual y gracias a eso, se pueden definir de manera empírica transiciones para definir el límite líquido LL, límite plástico LP y el límite de contracción LC. El contenido de humedad entre el LL y el LP el índice plástico IP, entonces:

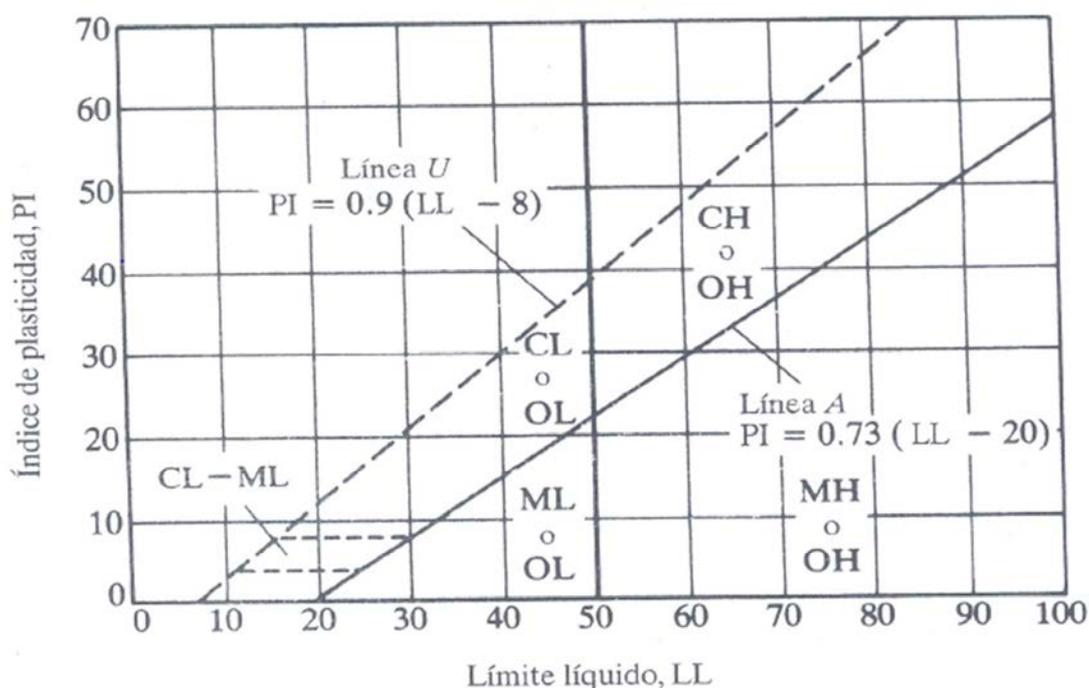
$$IP = LL - LP$$

Ec. 3-1

El IP es una medida de la plasticidad del suelo. Por lo que la realización de los ensayos de límite líquido y límite plástico permiten realizar una descripción de la plasticidad de suelos arcillosos.

Debido a que el análisis granulométrico mediante sedimentación no aporta información sobre el tipo de arcilla con la que se está trabajando, y por el hecho de la dificultad y la poca rentabilidad que implica un análisis visual (rayos x o microscopios de electrones) para identificar el del tipo de mineral arcilloso, los límites de Atterberg son un proceso sencillo y práctico para la clasificación de las arcillas y los posibles minerales presentes en ellas. Los suelos de grano fino normalmente se caracterizan utilizando una herramienta sencilla, llamada la carta de plasticidad, esta es una representación gráfica del límite líquido contra el índice plástico. Se presenta en la figura 3.6 la carta de plasticidad, que ayuda a identificar el tipo de suelo de grano fino con que se está trabajando.

Figura 3.6 Carta de Plasticidad

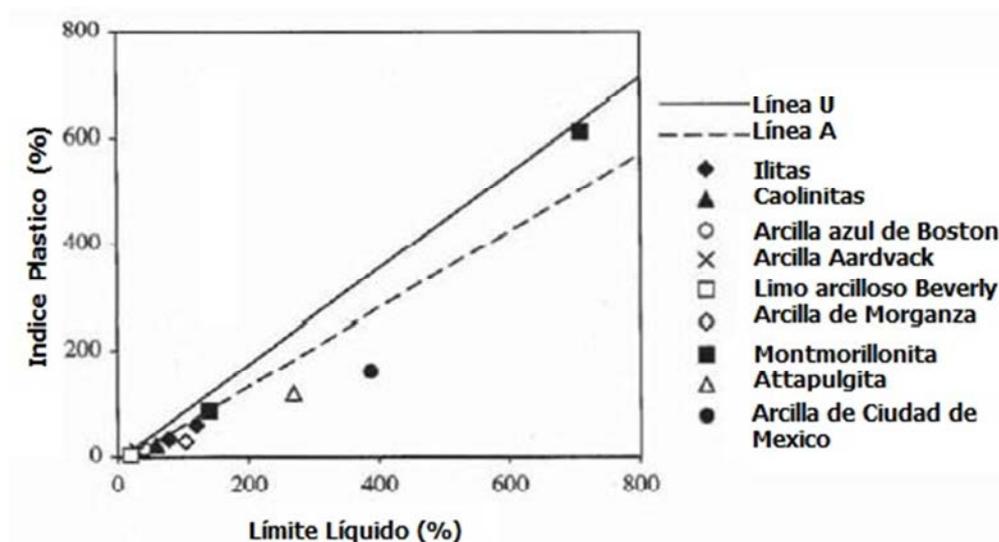


Fuente: ASTM D2487

Holtz y Kovacs (1981), basándose en una serie de resultados experimentales de límites de Atterberg para distintos tipos de minerales arcillosos, observaron que el tipo de minerales arcillosos en un suelo puede ser determinado con la ayuda de la carta de plasticidad. Por ejemplo observaron que las montmorillonitas se encuentran en la parte de arriba de la carta,

casi pegando con la línea U. Por otro lado las illitas y kaolinitas se encuentran más abajo y cercanas a la línea A, todo esto se puede apreciar en la figura 3.7.

Figura 3.7 Carta de plasticidad y ubicación de minerales arcillosos dentro de la misma



Fuente: Modificada de Bardet, 1997.

Cuando se habla de la consistencia de las arcillas, no es posible definir una consistencia solamente de acuerdo con el contenido de agua, por el contrario, dos arcillas a un mismo contenido de agua pueden tener consistencias completamente diferentes. Es por eso que se crea el concepto de índice líquido IL, que relaciona el contenido de agua con el LL y el LP. Así:

$$LL = \frac{w-LP}{LL-LP} = \frac{w-LP}{IP} \quad \text{Ec. 3-2}$$

3.2.3 Clasificación del suelo

Existen varios sistemas para la clasificación del suelo. Estos tienen como objetivo etiquetar el suelo, dándole tanto un nombre, como un resumen de las propiedades ingenieriles más importantes presentes en él. Los sistemas se basan en propiedades medibles del suelo por ejemplo el coeficiente de uniformidad C_u , el contenido de arcillas, el límite líquido e índice plástico, etc. A lo largo de los años se han desarrollado varios sistemas de clasificación que responden a distintas necesidades de los campos de la ingeniería. Por ejemplo existe el sistema AASHTO (*American Association of State Highway and Transport Officials*),

estandarizado por la norma ASTM D3282 y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), estandarizado por la norma ASTM D 2487. Ambos sistemas se basan en los datos obtenidos en los análisis granulométricos y de límites de Atterberg realizados al suelo.

3.3 Resultados de los ensayos de caracterización

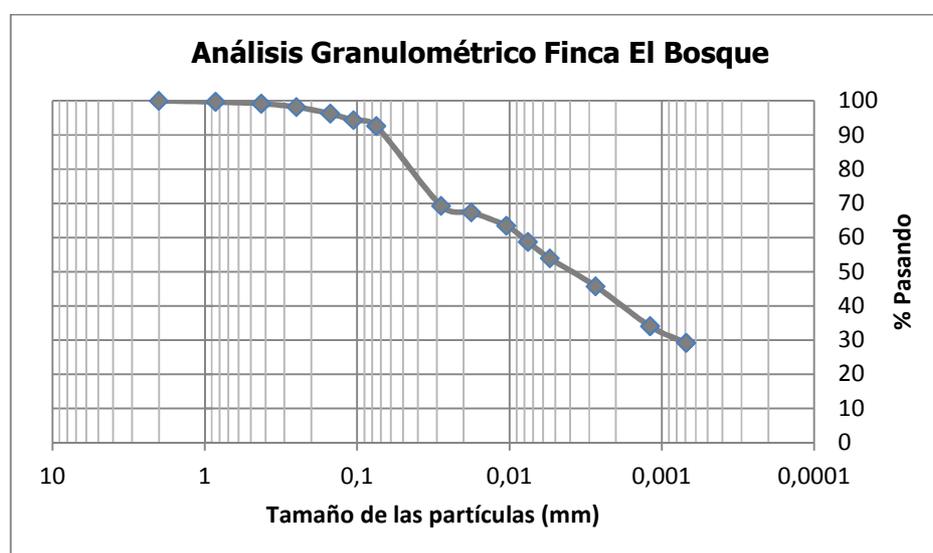
Para cada sitio de muestreo previamente seleccionado, se realizaron ensayos de caracterización del suelo, de acuerdo a lo estipulado previamente en los objetivos de este trabajo.

En esta parte se llevaron a cabo las granulometrías, obtención de límite líquido y límite plástico y determinación de Gs.

3.3.1 Ensayos de caracterización: Sitio de Muestreo No. 1

A continuación se presenta el análisis granulométrico realizado mediante la prueba del hidrómetro y posterior tamizado de la fracción más gruesa para el suelo de la finca El Bosque. En la figura 3.8 se puede apreciar la curva granulométrica.

Figura 3.8 Análisis granulométrico para el Sitio de Muestreo No. 1



Posteriormente se realizó el ensayo de límites de Atterberg mediante el cual se logró determinar el límite líquido, límite plástico e índice plástico. Primero se muestra un cuadro resumen con los valores obtenidos para los tres datos.

En el cuadro 3.9 se presentan los valores de los límites de Atterberg obtenidos.

Cuadro 3.9 Valores obtenidos para el límite líquido, límite plástico e índice plástico, sitio de muestreo No. 1.

LL	75%
LP	41%
IP	33%

La determinación del límite líquido, se realiza graficando el número de golpes en la cuchara de Casa Grande contra el contenido de humedad de la muestra. Analizando la curva granulométrica, se obtienen los porcentajes de arcillas, limos y arenas para el suelo. Finalmente se presenta en el cuadro 3.10 un resumen de las propiedades más importantes para la clasificación del suelo.

Cuadro 3.10 Valores importantes para la clasificación del suelo del sitio de muestreo No. 1

Porcentaje pasando tamiz # 200	92%
IP	33
Fracción mayor a tamiz # 200	8%
% de arcillas	40%
% de limos	52%
% de arenas	8%
IG	40

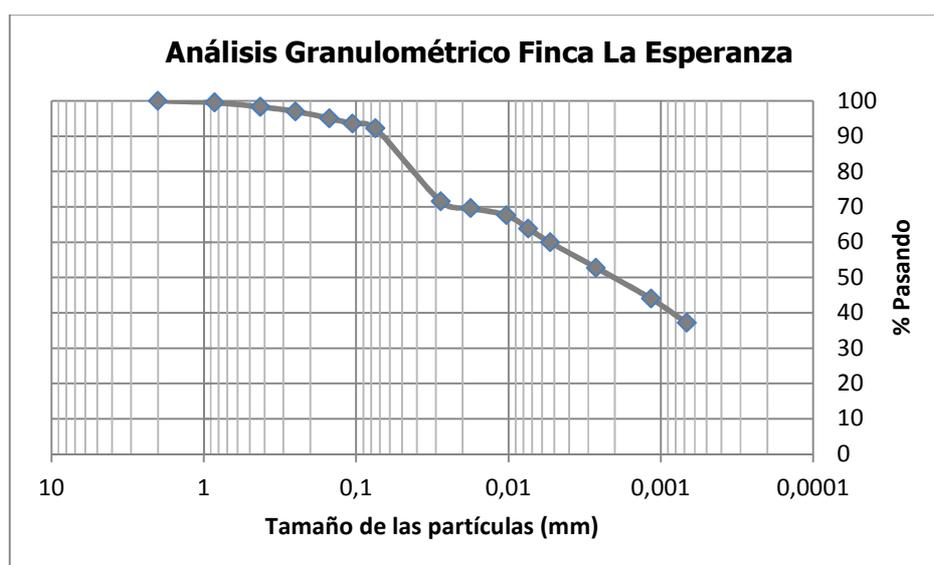
De acuerdo con los datos obtenidos, se puede caracterizar el suelo como un MH, limo elástico según el sistema SUCS. Mientras que utilizando el sistema AASHTO se clasifica como A-7-5 (40), en cuyo caso sería un suelo arcilloso.

En este caso este suelo tenía el comportamiento más plástico, eso se puede observar tanto por su alto índice plástico, como por su alto índice de grupo, se observa del cuadro 3.10, que el contenido de limos es más alto que el de arcillas. Por lo que la clasificación a la que mejor se ajusta es a la de limo de alta plasticidad o limo arcilloso.

3.3.2 Ensayos de caracterización: Sitio de Muestreo No. 2

La figura 3.11 muestra los resultados del análisis granulométrico para el sitio de muestreo No. 2, de San Ramón de Alajuela, Finca La Esperanza.

Figura 3.11. Análisis granulométrico para el sitio de muestreo No. 2



Seguidamente, en el cuadro 3.12 se presenta el cuadro resumen con los datos obtenidos experimentalmente de LL, LP e IP.

Cuadro 3.12 Valores obtenidos para el límite líquido, límite plástico e índice plástico, sitio de muestreo No. 2.

LL	73%
LP	56%
IP	17%

De la curva granulométrica, se obtienen los porcentajes de arcillas, limos y arenas en el suelo para ayudar con su caracterización. En el cuadro 3.13 se presenta el resumen de otros valores importantes para la caracterización del material.

Cuadro 3.13 Valores importantes para la clasificación del suelo del sitio de muestreo No. 2

Porcentaje pasando tamiz # 200	92%
IP	17
Fracción mayor a tamiz # 200	8%
% de arcillas	50%
% de limos	42%
% de arenas	8%
IG	27

De acuerdo con los datos obtenidos, se puede caracterizar el suelo como un MH, limo elástico según el sistema SUCS sin embargo se puede observar del cuadro 3.13, que el contenido de arcillas es mayor que el de limos. Mientras que utilizando el sistema AASHTO se clasifica como A-7-5 (27), en cuyo caso sería un suelo arcilloso.

En este caso el comportamiento del suelo también es de una arcilla plástica por lo que la clasificación de arcilla elástica, o arcilla limosa sa. Este suelo es bastante menos plástico que el anterior.

Cuadro 3.16 Valores importantes para la clasificación del suelo para el sitio de muestreo No. 3

Porcentaje pasando tamiz # 200	68%
IP	10
Fracción mayor a tamiz # 200	31%
% de arcillas	4%
% de limos	65%
% de arenas	31%
IG	13

De acuerdo con los datos obtenidos, se puede caracterizar el suelo como un MH, limo arenoso de alta plasticidad según el sistema SUCS. Mientras que utilizando el sistema AASHTO se clasifica como A-5 (13) en cuyo caso sería un suelo limoso, ya que los el valor de IG está en el límite entre a 12 y 13 y el valor de IP es cercano a 10.

Este suelo tiene un comportamiento muy marcado de limo arenoso. Por su origen volcánico, pasa de estar relativamente seco a simple vista, a un estado de saturación y agua libre con variaciones de agua relativamente pequeñas.

En la figura 3.17 se presenta una tabla comparativa entre los sistemas de clasificación AASHTO y SUCS. Según Bardet (1997), es importante notar que algunas veces hay diferencias significativas entre los dos sistemas de clasificación. Esto se debe, a que ambos sistemas fueron desarrollados para distintos propósitos.

Cuadro 3.17 Comparación de los grupos de tipos de suelo en los sistemas AASHTO y SUCS

Tipo de suelo según sistema AASHTO	Grupos comparables en el sistema SUCS		
	Más probable	Posible	Posible pero improbable
A-1 ^a	GW, GP	SW, SP	GM, SM
A-1b	SW, SP, GM, SM	GP	-
A-3	SP	-	SW, GP
A-2-4	GM, SM	GS, SC	GW, GP, SW, SP
A-2-5	GM, SM	-	GW, GP
A-2-6	GC, SC	GM, SM	GW, GP
A-2-7	GM, GC, SM, SC	-	GW, GP, SW, SP
A-4	ML, OL	CL, SM, SC	GM, GC
A-5	OH, MH, ML, OL	-	GM, SM
A-6	CL	ML, OL, SC	GM, GC, SM
A-7-5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, GC, SM, SC
A-7-6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM

Fuente: Liu, 1970, traducido de Bardet, 1997

3.4 Ensayos para determinar la resistencia en laboratorio

Todo suelo es susceptible a una falla cuando es sometido a esfuerzos cortantes. Un suelo no puede soportar esfuerzos cortantes mayores a su resistencia corte, además sufrirá deformaciones importantes cuando el esfuerzo cortante aplicado se acerca a su resistencia al corte.

Existen varios tipos de ensayos para determinar la resistencia al corte, con distintas aplicaciones cada uno. El tipo de ensayo a utilizar, para la determinación de los parámetros de resistencia del suelo, debe ser escogido de acuerdo tanto a las condiciones del proyecto a realizar. Por ejemplo el tipo de suelo y las condiciones de saturación y resistencia del mismo. Para este proyecto se decidió utilizar los ensayos de corte directo como punto de partida para la determinación de la resistencia al corte de los suelos estudiados en esta investigación.

En cuanto a las muestras, todas fueron semi-inalteradas, la mayoría muestreadas mediante moldes de CBR (ver figura 3.18) que fueron modificados en el LANAMME para tener un borde filoso y removerles las pletinas de fijación a todo el arreglo utilizado para el ensayo de CBR y Proctor. Esto permitió un hincado más fácil dentro del suelo y a la vez permitió una menor alteración del mismo gracias al filo. Un porcentaje menor de las pruebas se muestreó mediante la utilización de tubos shelby también con bordes filosos y de diámetros superiores

al de la sección de la caja de corte. Para así evitar alteraciones en la masa de suelo a la hora de insertar el tubo de muestreo.

Una vez obtenidas las muestras, todas fueron envueltas en 2 bolsas plásticas y envueltas con cinta adhesiva, para evitar al máximo toda pérdida de humedad. Las muestras fueron transportadas en automóvil en cajas completamente cubiertas de mecha para evitar posibles golpes y movimientos durante el transporte.

Todas las muestras luego fueron talladas procurando una alteración mínima a la micro y macro estructura del suelo, utilizando cuchillos altamente filosos. El contenido de humedad se mantuvo mediante el uso de bolsas plásticas y manteniendo las muestras en la cámara húmeda del LANAMME. En el caso de los moldes modificados de CBR, la muestra fue obtenida del centro del molde, para procurar tomar la muestra de la zona menos alterada. Lo mismo se realizó con las muestras obtenidas a partir de tubos shelby. En la figura 3.18 se presenta una foto de dos de los moldes de CBR modificados para el muestreo inalterado.

Figura 3.18 Moldes de CBR modificados en el LANAMME



Se tomaron en total 6 muestras para los 3 sitios de muestreo, tanto los dos ubicados en San Ramón de Alajuela, como el sitio ubicado en San Jerónimo de Moravia. El muestreo se realizó a profundidades que variaron entre los 10 y 25 cm de profundidad, buscando eliminar la capa de suelo con mayor contenido de materia orgánica.

En el transcurso de la investigación y principalmente en los muestreos, se decidió que era poco factible muestrear el suelo con raíces de Pasto Estrella, ya que sus raíces se encontraron en todos los sitios en suelos meramente orgánicos y no aptos para taludes. Por

esta razón se muestreó solamente suelo con raíces de pasto Vetiver y suelo en su estado natural sin la presencia de raíces.

3.5 Resultados de los ensayos para determinar la resistencia en laboratorio

Se realizó una serie de ensayos para determinar la resistencia de los suelos escogidos con y sin raíces y así ver su variación y poder determinar el aumento en la resistencia que generan las raíces. Se utilizó la prueba de corte directo como base para lograr este objetivo. Esta prueba tiene la desventaja de que, por el pequeño tamaño de la muestra (muestra cilíndrica de diámetro de 6 cm y altura de 2,2 cm aproximadamente) se puede ver afectada la representatividad de los resultados. Por esta razón, esta prueba permitió ver un comportamiento aproximado del suelo con raíces. Sin embargo, debido a que lo que se está analizando es una pequeña parte de un sistema suelo/raíces de dimensiones muy superiores a las de la muestra, estos datos no pueden ser utilizados como definitivos ni representativos de la realidad, solamente para tener una idea del posible comportamiento del suelo con presencia de raíces.

Se debe notar además, que la proporción de áreas entre raíces y suelo es variable para cada ensayo y muy difícil de controlar en estas muestras tan pequeñas, esta relación también varía con la profundidad de obtención de la muestra.

Todas las pruebas se realizaron en condiciones de humedad natural del suelo, la humedad de ensayo se muestra después de los gráficos de la envolvente de falla para cada caso.

En otros países se han realizado pruebas de corte directo a una mayor escala que permiten obtener relaciones raíz/suelo mucho más homogéneas a una determinada profundidad y para un tipo de vegetación en específico.

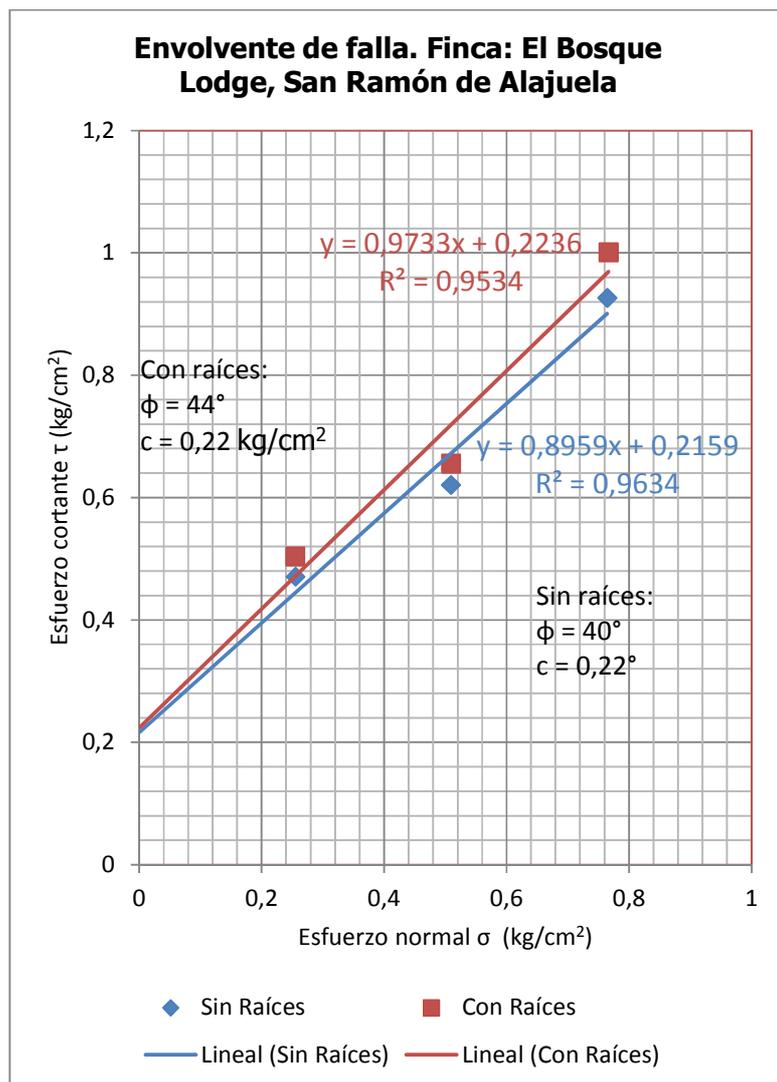
3.5.1 Resultados de ensayos de corte directo

A continuación se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de corte directo realizados en muestras de suelo tanto con presencia de raíces, como sin ellas.

Se muestran los resultados obtenidos para los tres tipos de suelo, y los tres distintos sitios de muestreo comentados anteriormente. Para cada muestra se determinó un porcentaje en masa de raíces luego de cada falla y estos porcentajes luego se promediaron para obtener el porcentaje en masa de raíces mostrado en los títulos de cada gráfico de la envolvente de

falla para los tres sitios de muestreo. En la figura 3.19 se muestra la envolvente de falla del sitio de muestreo no. 3. Obtenida a partir del ensayo de corte directo para suelo con raíces y sin raíces, sitio de muestreo indicado, porcentaje de raíces: 0,41%. En la figura 3.20 se muestran las humedades de falla. Finalmente, en las figuras 3.21 y 3.22 se muestran los gráficos de esfuerzo contra deformación para cada caso.

Figura 3.19 Envolvente de falla sitio de muestreo no. 1



Cuadro 3.20 Humedades de ensayo sitio de muestreo no. 1

Humedad de ensayo promedio sin raíces (%)	
	48
Humedad de ensayo promedio con raíces (%)	
	50

Figura 3.21 Curva de Esfuerzo vs. Deformación, suelo sin raíces, sitio de muestreo indicado.

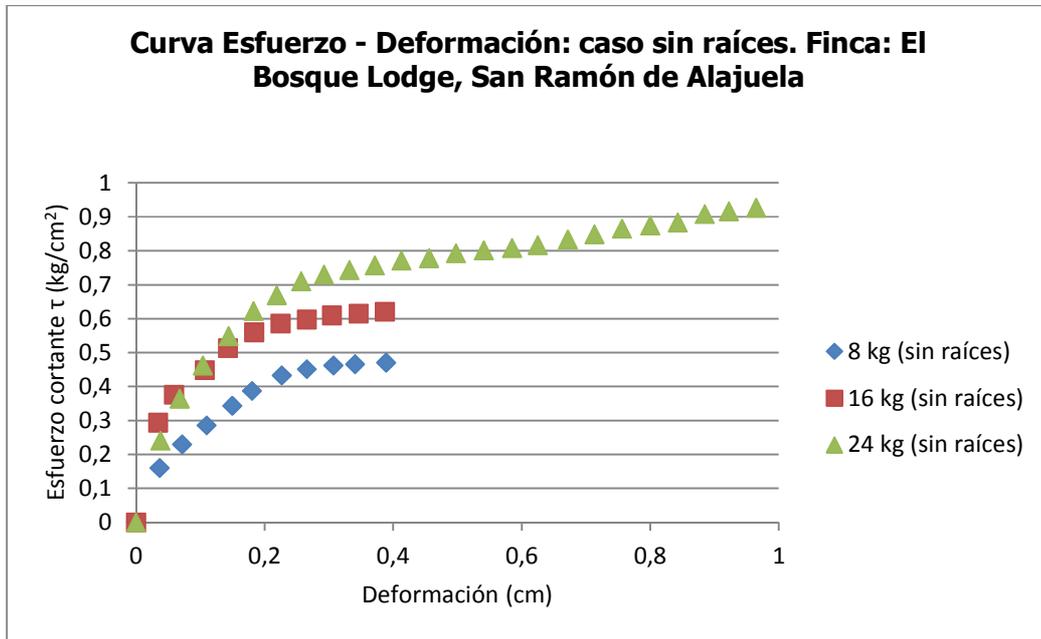
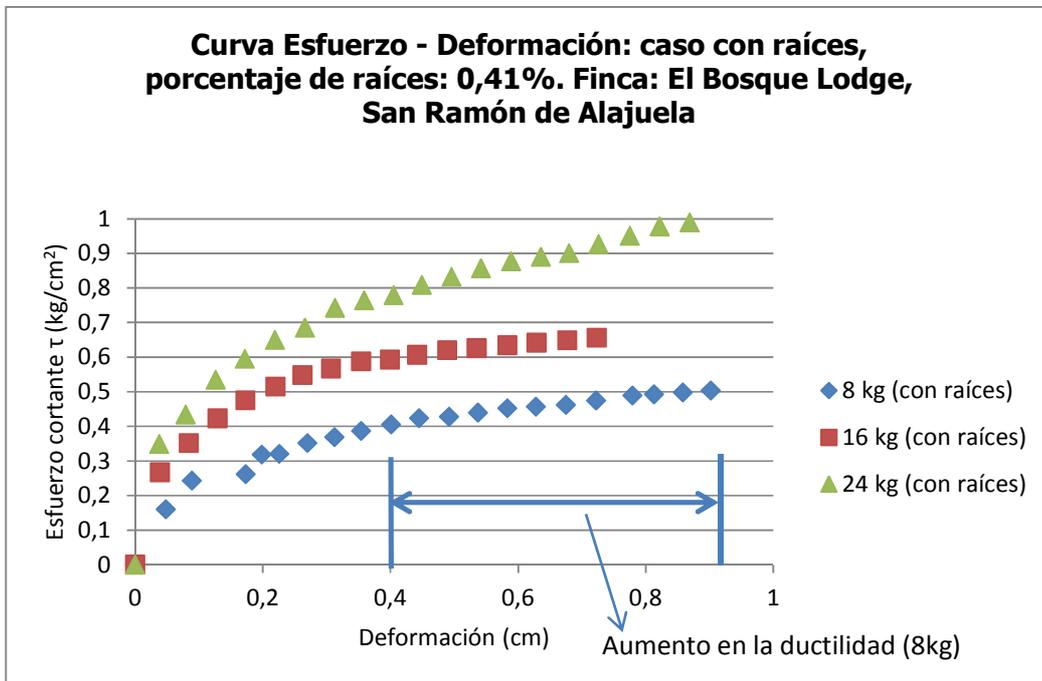


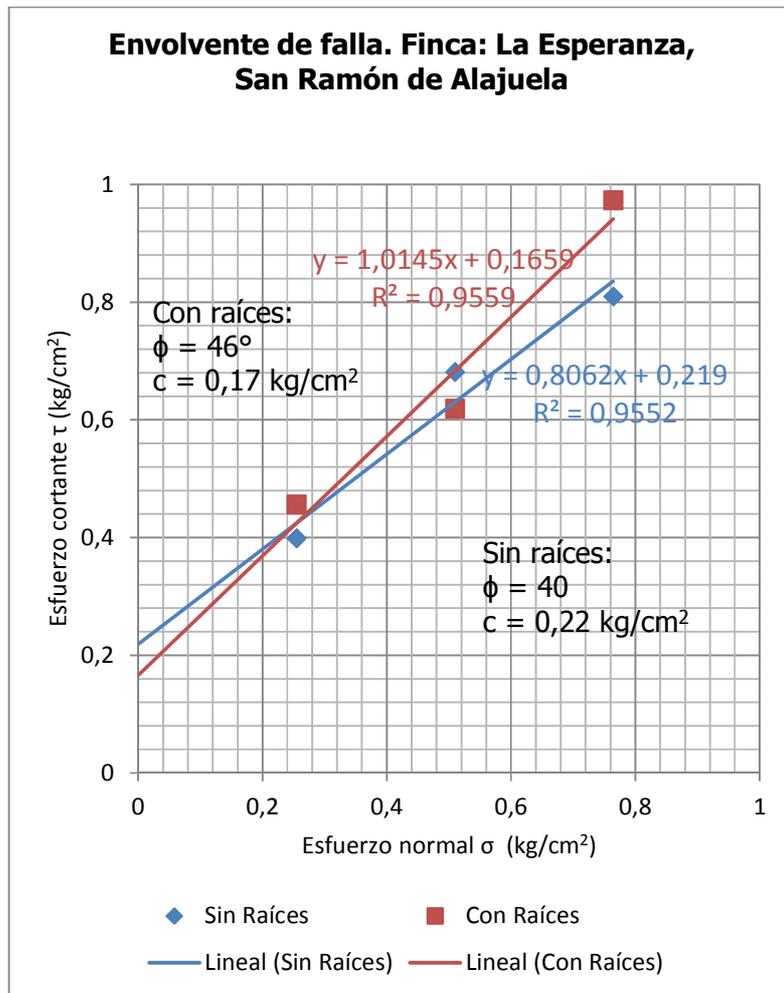
Figura 3.22 Curva de Esfuerzo vs. Deformación, suelo con raíces, sitio de muestreo indicado.



En la figura 3.23 se muestra la envolvente de falla para el sitio de muestreo no. 2. Obtenida a partir del ensayo de corte directo para suelo con raíces y sin raíces, sitio de muestreo

indicado, porcentaje de área de raíces: 0,32%. En el cuadro 3.24 se muestran las humedades de ensayo. Finalmente, en las figuras 3.25 y 3.25 se muestran las curvas de esfuerzo-deformación para cada caso.

Figura 3.23 Envolvente de falla sitio de muestreo no. 2



Cuadro 3.24 Humedades de ensayo sitio de muestreo no. 2

Humedad de ensayo promedio sin raíces (%)
50
Humedad de ensayo promedio con raíces (%)
51

Figura 3.25 Curva de Esfuerzo vs. Deformación, suelo sin raíces, sitio de muestreo indicado.

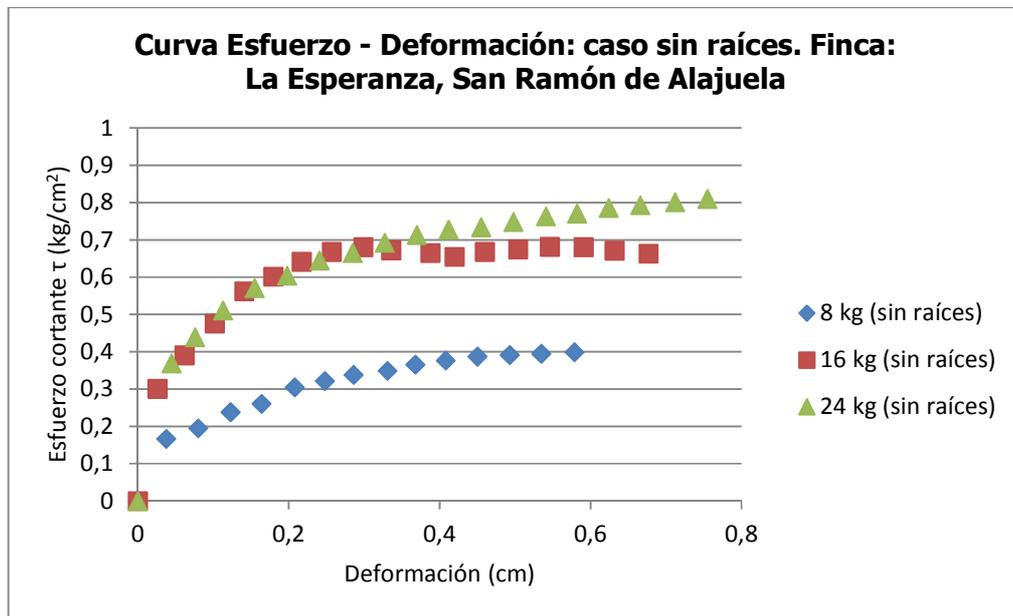
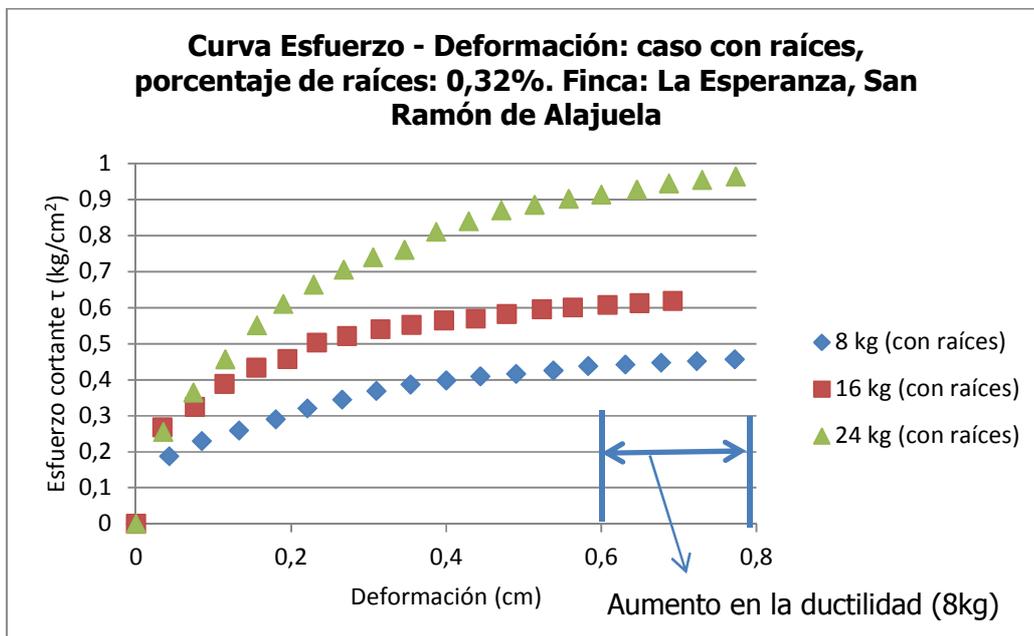
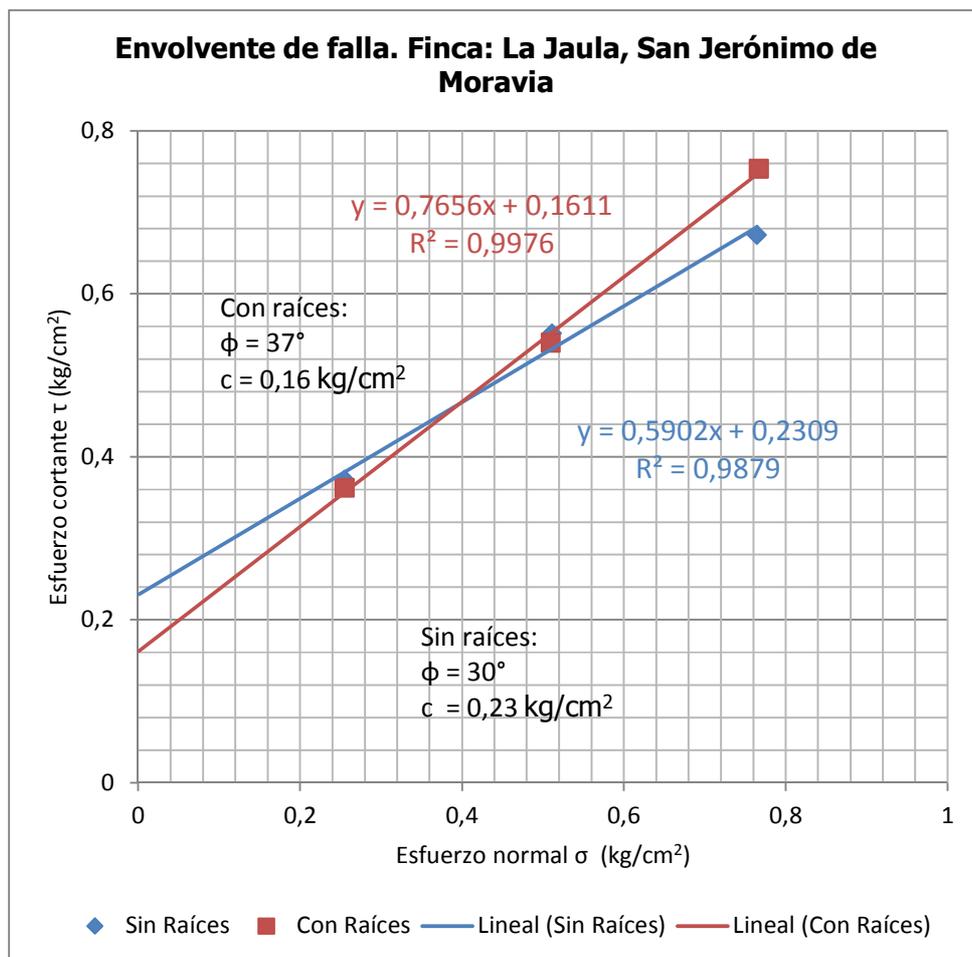


Figura 3.26 Curva de Esfuerzo vs. Deformación, suelo con raíces, sitio de muestreo indicado.



En la figura 3.27 se muestra la envolvente de falla del sitio de muestreo no. 3. Obtenida a partir del ensayo de corte directo para suelo con raíces y sin raíces, sitio de muestreo indicado, porcentaje de raíces: 0,73%. En la figura 3.28 se muestran las humedades de ensayo. Finalmente en las figuras 3.29 y 3.30 se muestra la curva de esfuerzo – deformación para cada caso.

Figura 3.27 Envolvente de falla, sitio de muestreo no. 3



Cuadro 3.28 Humedades de ensayo sitio de muestreo no. 3

Humedad de ensayo promedio sin raíces (%)	109
Humedad de ensayo promedio con raíces (%)	116

Figura 3.29 Curva de Esfuerzo vs. Deformación, suelo sin raíces, sitio de muestreo indicado.

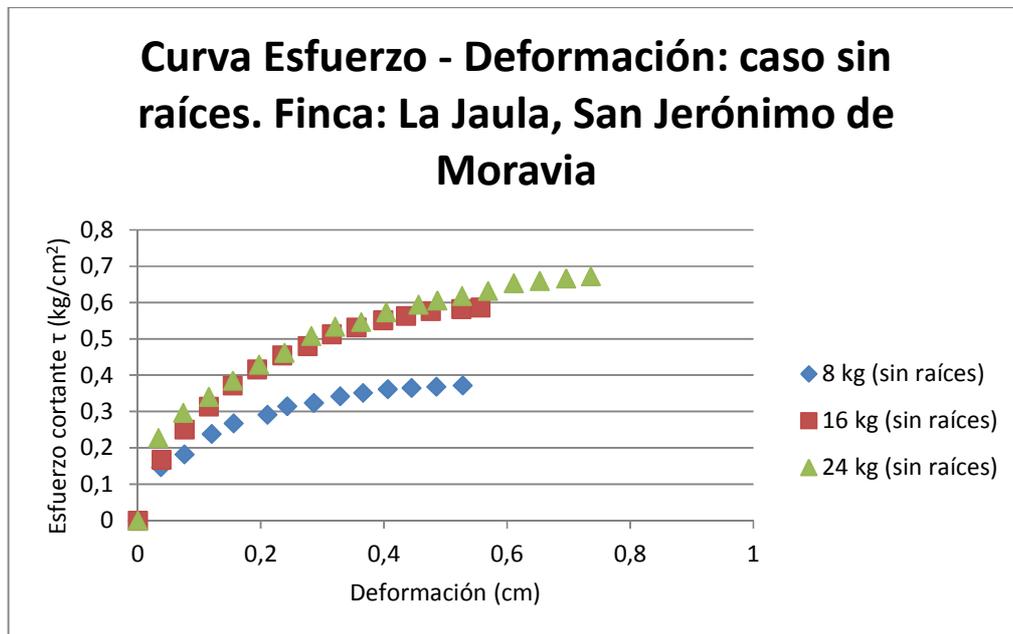
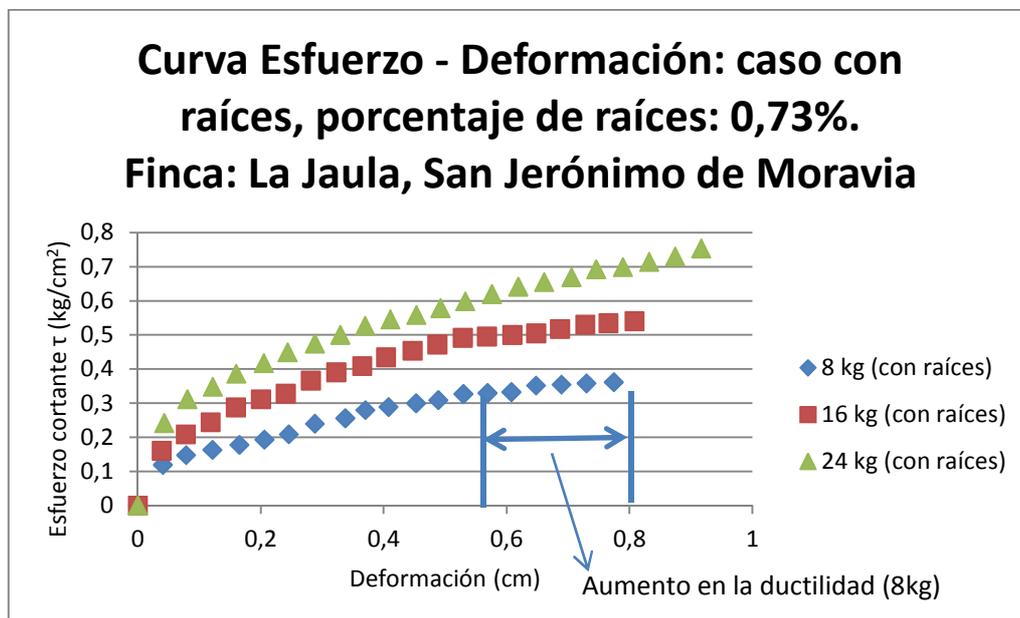


Figura 3.30 Curva de Esfuerzo vs. Deformación, suelo con raíces, sitio de muestreo indicado.



3.5.2 Resultados de ensayos de falla a tensión de raíces

Para complementar los ensayos de corte directo, se realizaron ensayos de resistencia a tensión a 9 haces de raíces. Estos ensayos se realizaron a partir de un espécimen vivo de una planta de vetiver de 3 años de edad, obtenido en la finca La Jaula, en San Jerónimo de Moravia. El espécimen se mantuvo en estado de saturación hasta la hora de la preparación de los haces de raíces. Estos luego fueron guardados aproximadamente 20 horas en un cuarto de ambiente controlado en el laboratorio de suelos del LANAMME. Para ser fallados al día siguiente. En la siguiente figura se muestra tanto el montaje de las muestras de haces de raíces preparadas, así como una de las muestras ya lista para ser fallada.

Figura 3.31 Montaje de los haces de raíces en la máquina MTS (izquierda), espécimen de raíces listo para la falla



A continuación se muestran los resultados obtenidos a partir de la falla de haces de raíces de vetiver en la máquina universal MTS del área de infraestructura civil del LANAMME. Se utilizaron haces de raíces con diámetros efectivos (diámetro de las raíces juntas amarradas unas junto a otras mediante un mecate) que variaron entre 0,81 y 1,24 cm. Se muestran solo los resultados de las muestras que no tuvieron problemas de deslizamiento en los acoples entre la máquina y la muestra y que fallaron normalmente (en el centro de la muestra).

Cuadro 3.32 Resistencia a tensión de haces de raíces de vetiver

Muestra No.	Diámetro promedio (cm)	Área (cm²)	Carga (kgf)	Esfuerzo (kg/cm²)
15	0,808	0,513	24,6	47,9
20	0,850	0,567	20,7	36,5
7	1,237	1,202	29,6	24,6
4	1,222	1,172	33,5	28,5
5	1,197	1,125	39,8	35,4
14	0,707	0,392	20,1	51,2
9	0,830	0,541	23,2	42,8

La humedad promedio de los haces de raíces fue de 49,0% y se obtuvo a partir de tres muestras de humedad llevadas al horno a 110 °C luego de la falla hasta tener lecturas de peso invariantes. La humedad de falla incide en la capacidad de toma de carga de las muestras. Esto se debe a que entre más secas estén, menor flexibilidad van a tener, en este caso, favorablemente la pérdida de humedad se dio solo en la parte externa de las raíces o corteza de las mismas, esta parte no tiene aporte estructural ya que es altamente frágil (Hengchaovanich y Nilaweera, 1996).

A partir de los datos anteriores se obtiene una resistencia promedio que viene dada en el cuadro 3.30.

Cuadro 3.33 Resistencia promedio a tensión de haces de raíces de vetiver.

Carga promedio (kgf)	27,3	Esfuerzo promedio (kg/cm²)	38,1
-----------------------------	------	--	------

3.6 Ensayos para determinar la resistencia en campo

La metodología ideal para la obtención de la resistencia del conjunto suelo/raíces, es una que logre tomar en cuenta las condiciones reales del campo, con las humedades naturales y las muestras inalteradas.

Al principio de esta investigación se propuso realizar pruebas de resistencia in situ, a suelos tanto con contenido de raíces, así como suelos sin raíces. Sin embargo, al realizar estas

pruebas, fue evidente que este no era un ensayo representativo para la resistencia aportada por las raíces al suelo.

Estas pruebas se realizaron en verano, por lo que el suelo sin raíces era un suelo muy competente, debido a su nivel de sequedad. Por el contrario el suelo con presencia de raíces tenía cierta humedad a profundidad, lo que lo hacía menos competente ante una prueba que mide el la resistencia al torque.

Por esta razón se descartó esta prueba in situ y se decidió continuar la investigación solamente con los datos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta etapa se expone el análisis realizado a los datos obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio realizados.

4.1 Ensayos de corte directo, sitio de muestreo No. 1

Mediante la realización de los ensayos de caracterización, se determinó que el tipo de suelo en este sitio de muestreo es de grano fino, con un tamaño de partículas predominantemente arcilloso. El comportamiento de este suelo es muy plástico, debido a su alto contenido de finos. Por otro lado, el límite líquido tiene un valor alto ($LL=77$), al igual que el índice plástico ($IP=33,6$).

Por el comportamiento de este suelo, es posible que la interacción suelo-raíz, sea controlada por una mejor cohesión y adhesión entre los dos materiales. Por lo que se observa en la figura 3.19, se cumple en parte la hipótesis de López (1999), en la cual se habla de que las raíces generan un aumento en la cohesión del suelo, lo que desplaza la envolvente de falla (curva de suelo con raíces) de una manera casi paralela a la curva original (curva de suelo sin raíces). Sin embargo, no se cumple que el aumento en el ángulo de fricción sea despreciable. De hecho, el ángulo de fricción aumenta en una proporción mayor que la cohesión.

Para este caso, en el momento de falla de la raíz, es posible que esta se logre deformar, tomando así la carga que contribuyó al aumento de la resistencia al corte del suelo.

Se debe mencionar, que por el hecho de la pequeña escala la prueba, de corte directo realizada, las raíces no están ancladas a nada, como lo estarían en la realidad. Por el contrario, estas raíces se encuentran libres y sólo logran desarrollar una cierta resistencia mientras que el contacto con el suelo sea cohesivo.

En el siguiente cuadro, se puede observar el aumento tanto en el ángulo de fricción, como en la cohesión generado por el efecto de las raíces.

Cuadro 4.1 Efecto de las raíces sobre la cohesión y el ángulo de fricción para el sitio de muestreo no. 1

Muestra	Cohesión	Ángulo de fricción
Sin raíces	0,22	40°
Con raíces	0,22	44°
Aumento	3,57%	10,97%

También, es importante mostrar cómo aumenta la resistencia al corte por el efecto de las raíces para las distintas cargas normales. Esto se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 4.2 Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte para el suelo del sitio de muestreo no. 1, para las distintas cargas normales

Carga normal	Esfuerzo cortante τ (kg/cm²) sin raíces	Esfuerzo cortante τ (kg/cm²) con raíces	Aumento
8 kg	0,470	0,504	7,03%
16 kg	0,621	0,656	5,62%
24 kg	0,926	1,001	8,09%

Como se puede notar, en suelos arcillosos, el efecto de las raíces medido mediante la prueba de corte directo en pequeña escala, se ajusta parcialmente a los resultados obtenidos por otros investigadores ya que aumenta la cohesión, sin embargo el aumento en el ángulo de fricción es mayor al aumento de la cohesión. Por esta razón, despreciar ese efecto arrojaría resultados conservadores.

Observando los datos obtenidos a partir de las curvas de esfuerzo contra deformación (figuras 3.21 y 3.22), es posible observar como aumenta la ductilidad del suelo, tanto en el caso de la carga normal de 8 kg como la de 16 kg. En el caso de carga normal de 8 kg, la

ductilidad aumenta casi al doble, mientras que en el caso de 16 kg la carga aumenta un poco menos del doble. Siendo este un aspecto positivo, ya que la falla es gradual y no espontánea o catastrófica. En ingeniería, siempre es deseable que un material falle de manera progresiva, permitiendo así a los usuarios de la estructura evacuar si es del caso, o tomar las medidas necesarias para prevenir una falla total. Por otro lado, a niveles de esfuerzo más altos (carga normal de 24 kg), la ductilidad no parece aumentar si no que se mantiene casi igual.

Este aspecto de ductilidad fue comprobado también por otros investigadores como Zhou y Xu, 2011. En cuyo estudio, realizaron pruebas de corte directo con resultados similares a los de esta investigación.

4.2 Ensayos de corte directo, sitio de muestreo No. 2

Los suelos en este segundo sitio de muestreo fueron clasificados anteriormente como limos elásticos, esto debido a su alto límite líquido ($LL=73,5$) y límite plástico ($LP=56,3$). Sin embargo, el índice plástico fue menor ($IP=17,2$) al del suelo del sitio de muestreo no. 1. Esto quiere decir que es un suelo con un comportamiento menos plástico.

En este caso por tratarse de limos con una menor plasticidad, la interacción entre el suelo y las raíces fue más débil. Por esta razón, es que se observan comportamientos distintos a los del primer suelo.

A continuación, se presentan dos cuadros, el primero contiene la información relativa al aumento y disminución en el ángulo de fricción y la cohesión respectivamente. El segundo expone los aumentos o disminuciones del esfuerzo cortante de falla para los distintos niveles de carga normal.

Cuadro 4.3 Efecto de las raíces sobre la cohesión y el ángulo de fricción para el sitio de muestreo no. 2

Muestra	Cohesión	Ángulo de fricción
Sin raíces	0,22	40°
Con raíces	0,17	46°
Aumento	-24,25%	15,22%

Cuadro 4.4 Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte para el suelo del sitio de muestreo no. 2, para las distintas cargas normales

Carga normal	Esfuerzo cortante τ (kg/cm²) sin raíces	Esfuerzo cortante τ (kg/cm²) con raíces	Aumento
8 kg	0,40	0,46	14,49%
16 kg	0,68	0,62	-9,15%
24 kg	0,81	0,97	20,25%

Es posible observar, primero, el esfuerzo cortante de falla del suelo sin raíces es mayor que el esfuerzo de falla del suelo con raíces, esto genera una distorsión en las líneas de tendencia. Por otro lado, al igual que en el primer suelo, si se observa un mayor ángulo de fricción en el suelo reforzado con raíces. Sin embargo, la cohesión disminuye, esto considerando las que las líneas de tendencia presentan una distorsión. Si por ejemplo se consideraran solo los puntos extremos (para carga normal de 8 kg y 24 kg) entonces, la cohesión sí aumentaría.

Analizando el comportamiento de este suelo, y comparándolo con el suelo del sitio de muestreo no. 1, se puede inferir que debido a la reducción en la interacción entre las partículas de suelo y las raíces, estas no desarrollan todo su potencial de refuerzo. Esto también se debe a la pequeña escala de la prueba, que no permite ningún anclaje por parte de las raíces a zonas más competentes como pasaría en la realidad.

Observando las curvas de esfuerzo contra deformación para este suelo (figuras 3.25 y 3.26), es posible notar que a diferencia del anterior, en este caso solo mejora la ductilidad en el caso de la carga normal de 8 kg. En los otros dos estados de carga normal la ductilidad no muestra indicios claros de cómo varía.

Se puede observar además, el aumento en la resistencia cortante en la muestra con carga axial de 24 kg (ver cuadro 4.4); en ella se obtiene un aumento de resistencia debido a las raíces de un 20,25%, este es un aumento considerable y se genera debido a que las raíces se amarran mejor al suelo y en este caso si desarrollan un potencial de refuerzo considerable. Similarmente, en la muestra con carga normal de 8 kg, hay un aumento en la resistencia al corte de 14,5%.

4.3 Ensayos de corte directo, sitio de muestreo No. 3

En este tercer sitio de muestreo, los suelos ensayados fueron clasificados como limos arenosos, por la zona en la que se encuentran, estos suelos son de origen volcánico, tienen una porosidad muy alta por lo que hay poca interacción entre partículas. Estos suelos tienen una plasticidad mucho más baja que la de los dos primeros sitios de muestreo. Esto se puede observar ya que el índice plástico tiene un valor relativamente bajo ($IP=10,1$).

Conforme se reduce la plasticidad en el suelo, el ensayo de corte directo a pequeña escala se vuelve menos apto para modelar el comportamiento de la interacción suelo-raíz. En este caso, las raíces se resbalan debido a la porosidad y la génesis del suelo, por lo que no logran, en este ensayo, desarrollar su potencial. Esto se puede notar, observando la figura 3.34, en ella podemos ver que si se aumenta el ángulo de fricción del suelo en un 21%, sin embargo la cohesión disminuye un porcentaje alto de aproximadamente 30% (ver cuadro 4.5).

Cuadro 4.5 Efecto de las raíces sobre la cohesión y el ángulo de fricción para el sitio de muestreo no. 3

Muestra	Cohesión	Ángulo de fricción
Sin raíces	0,2309	30°
Con raíces	0,1611	37°
Aumento	-30,23%	21,02%

Analizando individualmente cada caso para las distintas cargas normales, se puede observar que hay una leve disminución (de aproximadamente 2%) tanto en el caso de la carga normal de 8 kg, como en el caso de la de 16 kg. Esto se debe a lo comentado anteriormente, por la alta relación de vacíos del suelo, las raíces prácticamente se encuentran sueltas por lo que simplemente desacomodan el suelo y lo vuelven más poroso. Por el contrario al aumentar la carga normal a 24 kg, las partículas se logran acomodar mejor, prensando así las raíces y permitiéndoles desarrollar cierta resistencia. Estos comportamientos se pueden observar en el cuadro 4.6.

Cuadro 4.6 Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte para el suelo del sitio de muestreo no. 3, para las distintas cargas normales

Carga normal	Esfuerzo cortante τ (kg/cm²) sin raíces	Esfuerzo cortante τ (kg/cm²) con raíces	Aumento
8 kg	0,37	0,36	-2,67%
16 kg	0,55	0,54	-2,08%
24 kg	0,67	0,75	12,06%

Es importante mencionar, que el muestreo de suelo con raíces y el muestreo de suelo sin raíces se realizaron en distinto momento por lo que existe una variación en las humedades de falla (humedad natural en este caso) de ambas muestras. Estas variaciones se muestran en el cuadro 4.7. Debido a esta diferencia de humedades, el suelo con raíces tendría una resistencia menor debido a la alta humedad presente en él, en comparación con la muestra de suelo sin raíces.

Cuadro 4.7 Humedades de falla de las muestras de suelo con y sin raíces

Control de humedades de falla			Diferencia de humedades
Carga normal	Muestra		
	Sin raíces	Con raíces	
8 kg	109%	119%	8%
16 kg	108%	113%	5%
24 kg	108%	115%	6%

El hecho de que las humedades sean mayores al 100% es explicable por el origen volcánico de los suelos de esta zona, así como por la alta incidencia de lluvias en la misma a lo largo de todo el año (ver CCCR, figura 1.5).

Lo más interesante es notar que la ductilidad aumenta en los tres niveles de esfuerzo (entre un 25% y un 30%), por lo que con solo este hecho, se valida el uso de la vegetación. Parece válido concluir que la ductilidad del suelo siempre aumenta a niveles de esfuerzo bajos, con la presencia de raíces de la vegetación.

4.4 Falla a tensión de haces de raíces de vetiver, sitio de muestreo no. 3

A partir de la realización de la prueba de tensión a haces preparados de raíces, se pudo determinar esta resistencia para su posterior aplicación al diseño de taludes reforzados con vegetación.

Comparando los resultados de estos ensayos, con las pruebas internacionales que se han realizado, se obtuvieron datos con menores valores de resistencia a tensión para las raíces ensayadas. En este caso, se obtuvo una resistencia a la tensión promedio de 38 kg/cm² (ver cuadros 3.32 y 3.33) en comparación con resistencias de aproximadamente 750 kg/cm².

La velocidad de falla de las muestras fue alta, se utilizó una velocidad de 2 mm/s, la cual fue recomendada por la Ing. Ana Monge Sandí, ya que esta velocidad había sido utilizada para fallar otras fibras vegetales como fibra de coco. En la bibliografía estudiada, no se expone cual es una velocidad de falla ideal para la realización de esta prueba.

En algunos casos, se tuvo el problema de que la conexión entre la máquina MTS y la muestra, que estaba constituida por mordazas de acero, si no se le aplicaba la suficiente presión a la muestra, esta tendía a deslizarse.

Sin embargo, solo se tomaron en consideración los datos en los cuales, la muestra no sufrió ningún deslizamiento y falló en el centro del haz de raíces.

Las muestras no se fallaron frescas, aunque la planta si se encontraba viva y saludable, a la hora de preparar las muestras, las raíces se tuvieron que dejar secando por aproximadamente unas 18 horas, ya que se fallaron al día siguiente de ser preparadas. Lo cual se debió a una petición del laboratorio, de tener todas las muestras listas por lo menos un día antes, para examinar si sería posible fallarlas en la máquina MTS. Esto pudo significar una pérdida en la elasticidad de las mismas llevándolas a una falla en la cual pudieron no desarrollar todo su potencial. Este fenómeno podría deberse también a una diferencia en la sepa de vetiver, con respecto a la que ha sido estudiada en otros países.

5 APLICACIONES

En el siguiente apartado se discutirán distintos métodos de análisis utilizados en el diseño de taludes, estos métodos se pondrán en práctica utilizando algunos de los programas de modelación geotécnica disponibles hasta el momento en el mercado.

5.1 Procedimiento de diseño y análisis de taludes con vegetación

A continuación se propone un procedimiento para la inclusión del efecto de las raíces en el diseño y análisis de taludes utilizando el método de equilibrio límite.

1. Realizar ensayos de falla a tracción a raíces individuales o haces de raíces de la planta de la cual se quiere conocer el efecto sobre la resistencia al corte de un suelo.
2. Obtener los parámetros de resistencia del suelo (ángulo de fricción interna y cohesión) que se quiere ensayar sin la presencia de raíces, mediante la realización de los ensayos indicados, ya sea compresión inconfiada, corte directo o ensayo triaxial, dependiendo del nivel de confianza que requiera el análisis.
3. Determinar el diámetro total y la profundidad del sistema radicular de la planta a ensayar.
4. Determinar la proporción del área de raíces con respecto al área de suelo (A_R/A) de una muestra de suelo con raíces, esta puede ser extraída mediante el uso de tubos shelby o bien moldes de CBR con filo, como se comenta en la metodología del trabajo.
5. Utilizar el siguiente modelo matemático para estimar el aumento en la resistencia al corte del suelo: $\Delta S_R = 1,15T_R(A_R/A)$, donde T_R es la resistencia promedio a tracción obtenida a partir de las pruebas de falla a tracción realizadas anteriormente. Más adelante en este capítulo se explica este modelo matemático. (Ver Waldron (1977), Wu (1976) y Brenner y James (1977))
6. ΔS_R es el aporte total de las raíces a la cohesión del suelo. Según Waldron (1977), Wu (1976) y Brenner y James (1977).
7. Mediante un programa de análisis de taludes ya sea Slope/W, Slide o algún otro programa que el usuario considere competente, se realiza un análisis del talud a verificar sin la presencia de raíces.
8. Utilizando el diámetro y la profundidad del sistema radicular se definen columnas de suelo utilizando el mismo ángulo de fricción obtenido mediante ensayos y se modifica

la cohesión siendo esta $c = c_o + \Delta S_R$ donde c_o es la cohesión original del suelo sin raíces.

9. Se definen los límites de estas columnas en el modelo del programa de análisis de estabilidad, de acuerdo con los espaciamientos verticales y horizontales de siembra de la planta estos parámetros pueden ser iterativos o bien definidos por algún manual como en el caso del vetiver.
10. Se corre el modelo y se observa el incremento del factor de seguridad, se pueden ensayar varias configuraciones de sembrado de las plantas y así obtener la más óptima.
11. La idea es buscar un factor de seguridad aceptable que cumpla mínimo con la normativa vigente (CCCR).

5.2 Diseño preliminar de taludes

En las siguientes secciones se realizarán varios ejemplos de diseño y análisis de taludes introduciendo los efectos del pasto vetiver. Para lograrlo, se utilizarán dos programas de análisis. Primero, el programa italiano Prati Armati. Por otro lado, el programa de análisis y modelado de taludes Slope/W. Con este último se evaluará la metodología de diseño ideada en este trabajo.

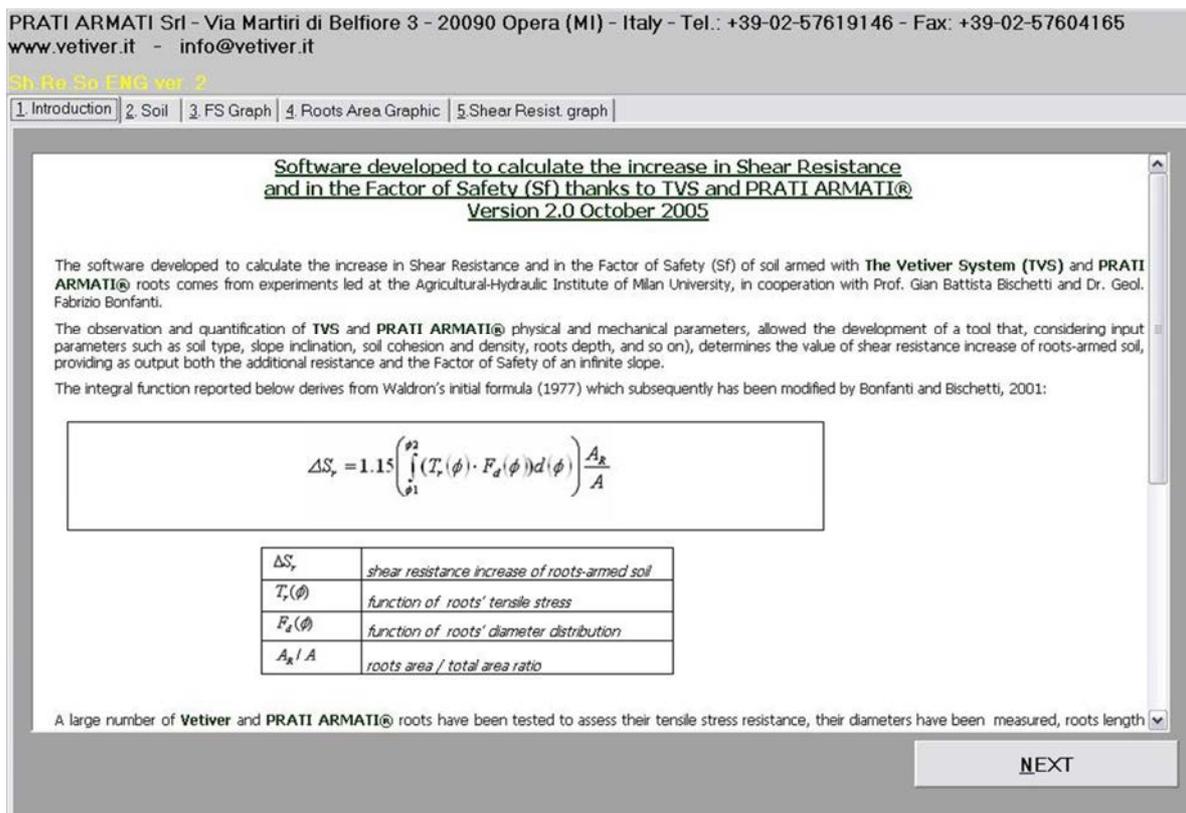
5.2.1 Análisis de taludes utilizando el Software Prati Armati

El primer programa que se expondrá, se llama **Prati Armati Software**, fue desarrollado en Italia. La versión utilizada fue la 2.0, de octubre de 2005. El objetivo de este programa es calcular el incremento en la resistencia al corte así como el factor de seguridad de un suelo reforzado con el Sistema Vetiver (TVS por sus siglas en inglés) así como con el sistema Prati Armati de raíces, que fue desarrollado mediante experimentos realizados en el instituto de Hidráulica y Agricultura de la Universidad de Milán.

Este programa utiliza el factor de seguridad mínimo permisible de los códigos de diseño italianos. En este caso 1,3, es una limitación del programa que no se pueda variar este dato. Ya que el CCCR establece que el factor de seguridad mínimo para la condición estática en un talud es de 1,5.

En la figura 5.1 se presenta la pantalla de inicio del programa, en donde se expone la ecuación integral en la que se basan los cálculos del mismo.

Figura 5.1 Pantalla inicial del software Prati Armati



Fuente: Prati Armati, 2005.

Luego de esta pantalla viene la de introducción de datos. Para la utilización de este programa solo es necesaria la introducción de los datos del suelo previamente determinados en el laboratorio. En el programa tiene predeterminado 6 tipos de suelos para el posible análisis del comportamiento con las raíces vetiver. Entre los tipos de suelo disponibles se encuentran los siguientes: Arcilla limosa orgánica, Limo arcilloso inorgánico, Arena limosa, Arena uniforme, Arena fina y Grava arenosa. Esto limita el uso del programa a estos tipos de suelos. Es posible que en las versiones más nuevas del mismo se puedan analizar otros tipos de suelos adicionales a los que ya están.

Es importante tomar en cuenta, que el creador de este programa recomienda verificar que el factor de seguridad mínimo, establecido por el código de diseño de cada país se cumpla previamente a la utilización de esta herramienta.

Para ejemplificar el diseño, se utilizaron taludes imaginarios. Para ello, se escogieron dos tipos de suelo, disponibles en el programa, similares a los estudiados en esta investigación. Estos suelos son: Limo arcilloso inorgánico y Arena limosa.

En la figura 5.2 y 5.3 se presentan las pantallas de introducción de datos para ambos suelos.

Figura 5.2 Pantalla de introducción de datos del software Prati Armati para el suelo Limo arcilloso inorgánico

PRATI ARMATI Srl - Via Martiri di Belfiore 3 - 20090 Opera (MI) - Italy - Tel.: +39-02-57619146 - Fax: +39-02-57604165
www.vetiver.it - info@vetiver.it

Sh.Do So E RG ver. 2

1 Introduction | 2 Soil | 3 FS Graph | 4 Roots Area Graphic | 5 Shear Resist. graph

Soil	Inclination (°)	Cohesion (kg/cm ²)	Saturation m (0-1)
inorganic clayed silt	60	0.2	0.3
Friction angle(°)		Density (kg/cm ³)	
40		0.0017	

Plant	% of roots area	Diameter min	Diameter max
VETIVER	0.10 %	0.5 mm	1.5 mm

Depth cm	Nr of plants per sqm	Open analysis saved
100 cm	10	Recalculate data

Fuente: Prati Armati, 2005.

Figura 5.3 Pantalla de introducción de datos del software Prati Armati para el suelo Arena limosa

PRATI ARMATI Srl - Via Martiri di Belfiore 3 - 20090 Opera (MI) - Italy - Tel.: +39-02-57619146 - Fax: +39-02-57604165
 www.vetiver.it - info@vetiver.it

Sh Re So ENG ver. 2

1 Introduction | 2 Soil | 3 FS Graph | 4 Roots Area Graphic | 5 Shear Resist. graph

Soil	Inclination (°)	Cohesion (kg/cm2)	Saturation m (0-1)
silty sand	35	0.1	1
Friction angle(°)		Density (kg/cm3)	
31		0.00163	

Plant	% of roots area	Diameter min	Diameter max
VETIVER	0.10 %	0.5 mm	1.4 mm

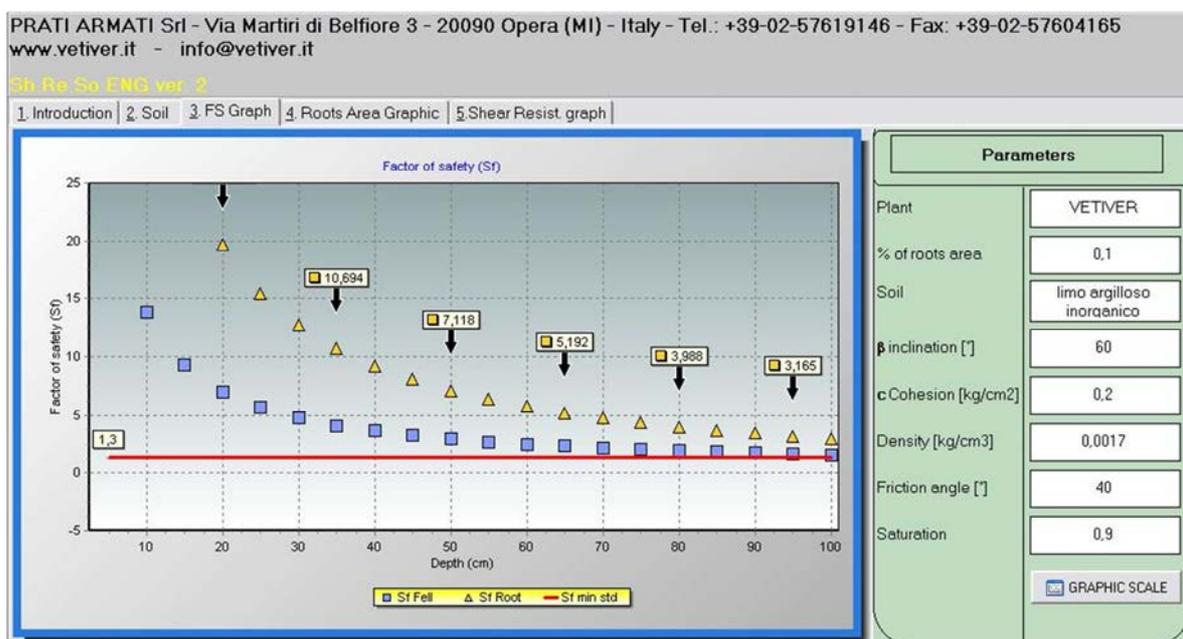
Depth cm	Nr of plants per sqm	Open analysis saved
200 cm	10	Recalculate data

Fuente: Prati Armati, 2005.

A partir de la introducción de datos, el programa inicia el cálculo del incremento en el esfuerzo cortante así como en el factor de seguridad para los parámetros de suelo introducidos.

Una vez finalizada la introducción de datos al programa, se toca el botón de "Recalculate data", con esta orden el programa realiza los cálculos de manera automática. Luego, automáticamente pasa a la siguiente pantalla, que se muestra en la figura 5.4.

Figura 5.4 Gráfico de factor de seguridad para el suelo limo arcilloso inorgánico



Fuente: Prati Armati, 2005.

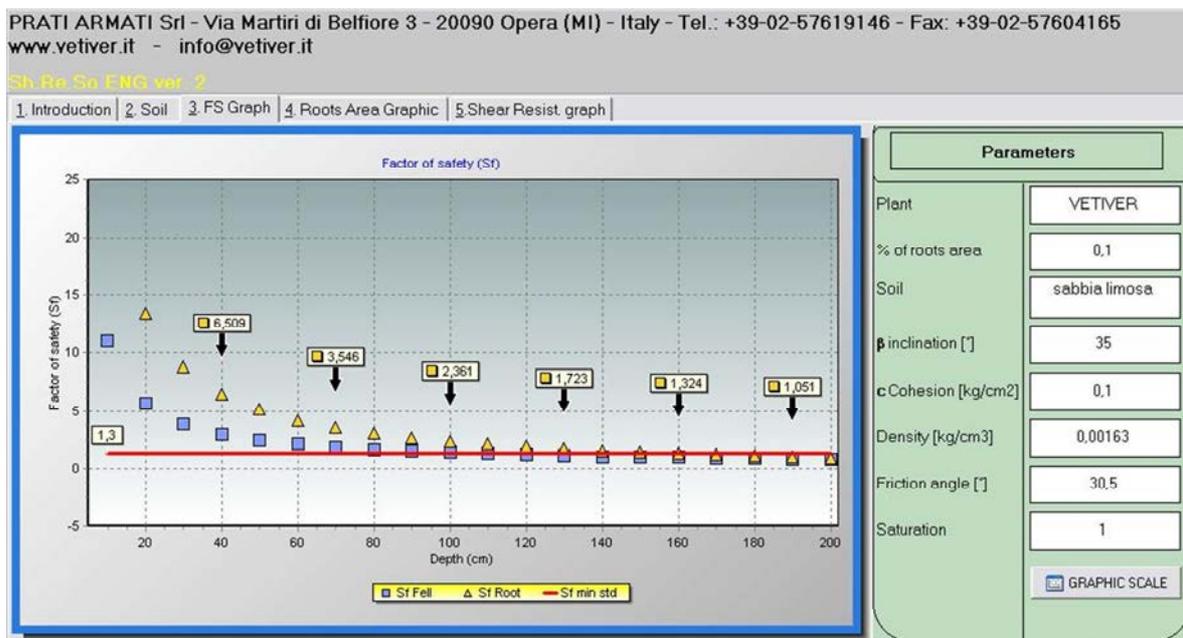
En la figura 5.4 es posible apreciar el aumento del factor de seguridad para un talud con una inclinación de 60° y propiedades similares a las obtenidas a partir de los ensayos de laboratorio realizados para el suelo obtenido a partir del muestreo realizado en la finca El Bosque en San Ramón de Alajuela.

Es posible observar, que a un metro de profundidad, el factor de seguridad sin raíces es muy cercano al mínimo permisible en el programa ($FS=1,3$). Sin embargo con la presencia de raíces este factor incrementa a uno por encima del mínimo permisible. Igualmente lo hacen los FS a menores profundidades.

Se analizó el mismo caso variando la profundidad del análisis a 2 m. En este otro análisis el factor de seguridad aumenta de uno cercano a 3, a un factor de seguridad de casi 3,7 para la profundidad de 1 m.

De manera similar se puede apreciar el aumento del factor de seguridad para el otro suelo en la figura 5.5.

Figura 5.5 Gráfico de factor de seguridad para el suelo arena limosa



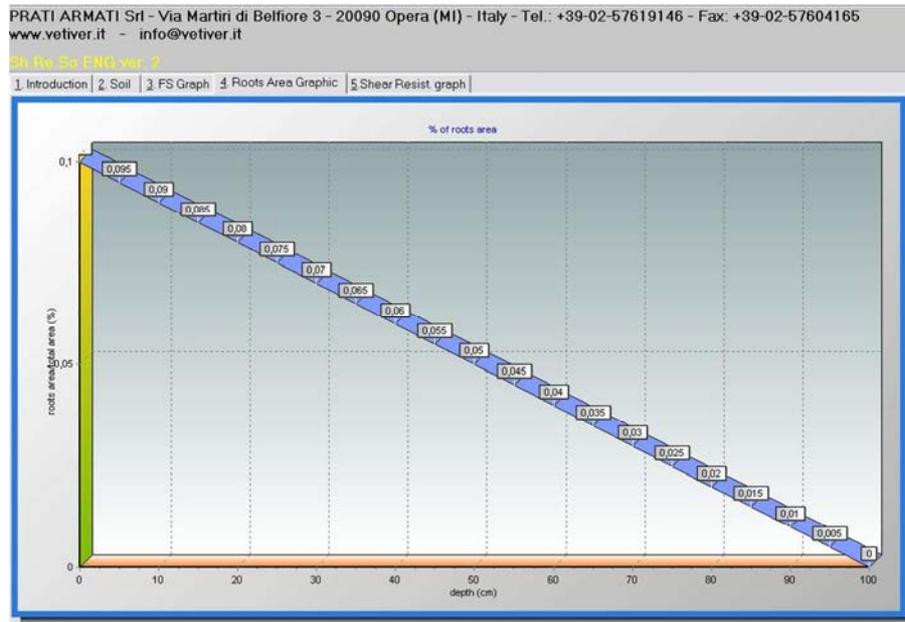
Fuente: Prati Armati, 2005.

De manera similar para la arena limosa, el factor de seguridad aumenta conforme disminuye la profundidad, es posible observar que para 1 m de profundidad el FS de suelo sin presencia de raíces se encuentra en el límite mínimo permisible para el programa, mientras que con la presencia de raíces, el FS se posiciona por encima de la línea del FS mínimo establecida por este programa para los requerimientos en Italia.

Continuando con los datos proporcionados por el programa, si se pasa a la pestaña 4, se obtiene un gráfico del área de raíces a distintas profundidades. Este se muestra a continuación.

El programa también calcula como va variando la densidad de raíces o relación de área de raíces entre área de suelo, para cada tipo determinado de suelo y condiciones de suelo específicas. Los cálculos para ambos suelos estudiados con el programa se muestran en la figura 5.6 y 5.7.

Figura 5.6 Gráfico de área de raíces contra profundidad del suelo, para el limo arcilloso inorgánico

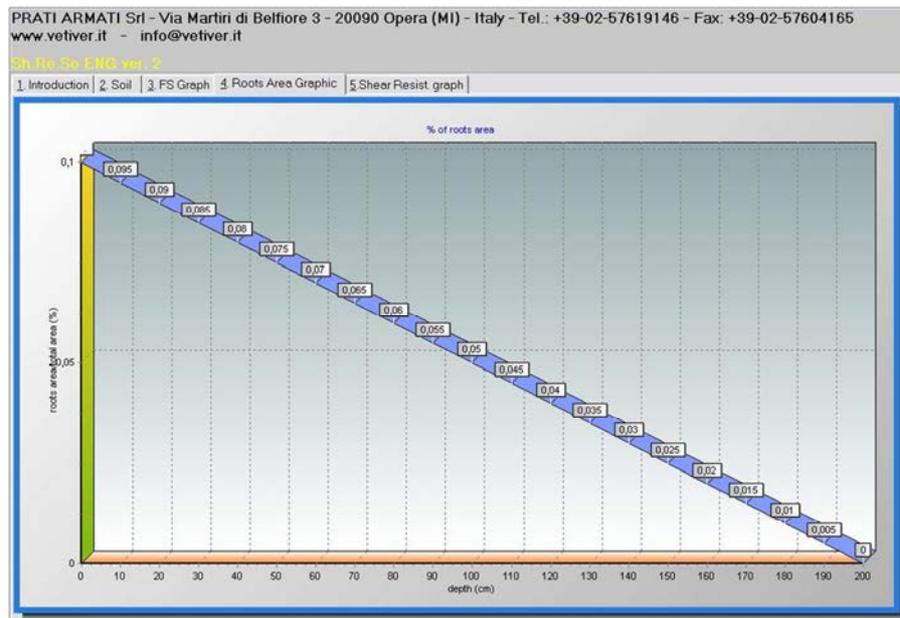


Fuente: Prati Armati, 2005.

Se puede apreciar en el gráfico cómo va disminuyendo el área de raíces conforme aumenta la profundidad del determinado tipo de suelo, según los estudios realizados.

Es interesante notar que a una profundidad de 1 m, la razón de raíces es cero. Sin embargo, si se introduce en el análisis una profundidad de 2 m, entonces esta será la que tiene la razón de raíces igual a cero.

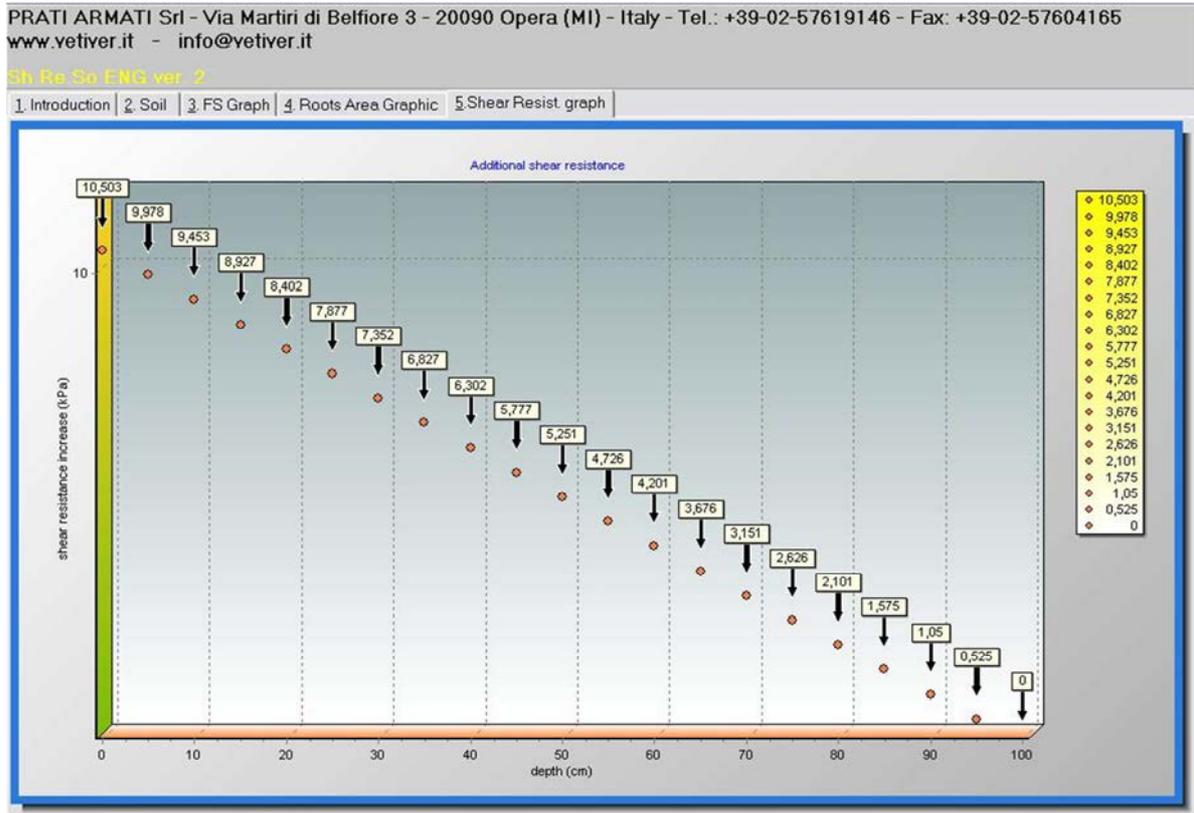
Figura 5.7 Gráfico de área de raíces contra profundidad del suelo, para la arena limosa



Fuente: Prati Armati, 2005.

Finalmente, el programa muestra el aumento de la resistencia al corte en kPa para las distintas profundidades. Esta pantalla se muestra a continuación en las figuras 5.8 y 5.9 para ambos suelos.

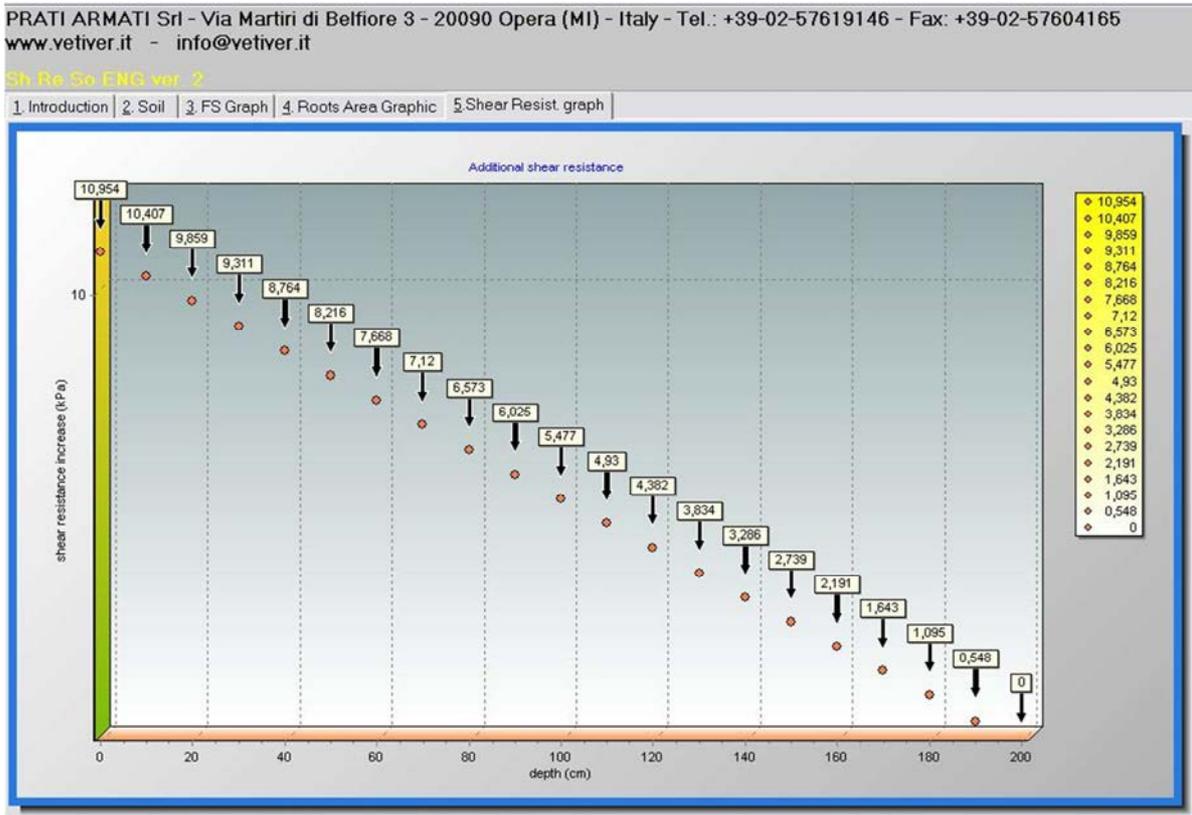
Figura 5.8 Gráfico de incremento de resistencia al corte contra profundidad del suelo, para el limo arcilloso inorgánico



Fuente: Prati Armati, 2005.

Esta parte del programa es muy interesante ya que describe como aumenta la resistencia del suelo conforme la profundidad de análisis disminuye. Estos datos pueden ser introducidos en un programa de análisis de estabilidad de taludes convencional y es otra manera de evaluar los efectos de las raíces del vetiver.

Figura 5.9 Gráfico de incremento de resistencia al corte contra profundidad del suelo, para la arena limosa



Fuente: Prati Armati, 2005.

De acuerdo con los datos obtenidos a partir del programa, las características de los taludes diseñados son las siguientes:

Talud realizado en suelo tipo limo arcilloso inorgánico:

- Pendiente: 60°
- Densidad de plantación: 10 plantas de vetiver por metro cuadrado

Talud realizado en suelo tipo arena limosa:

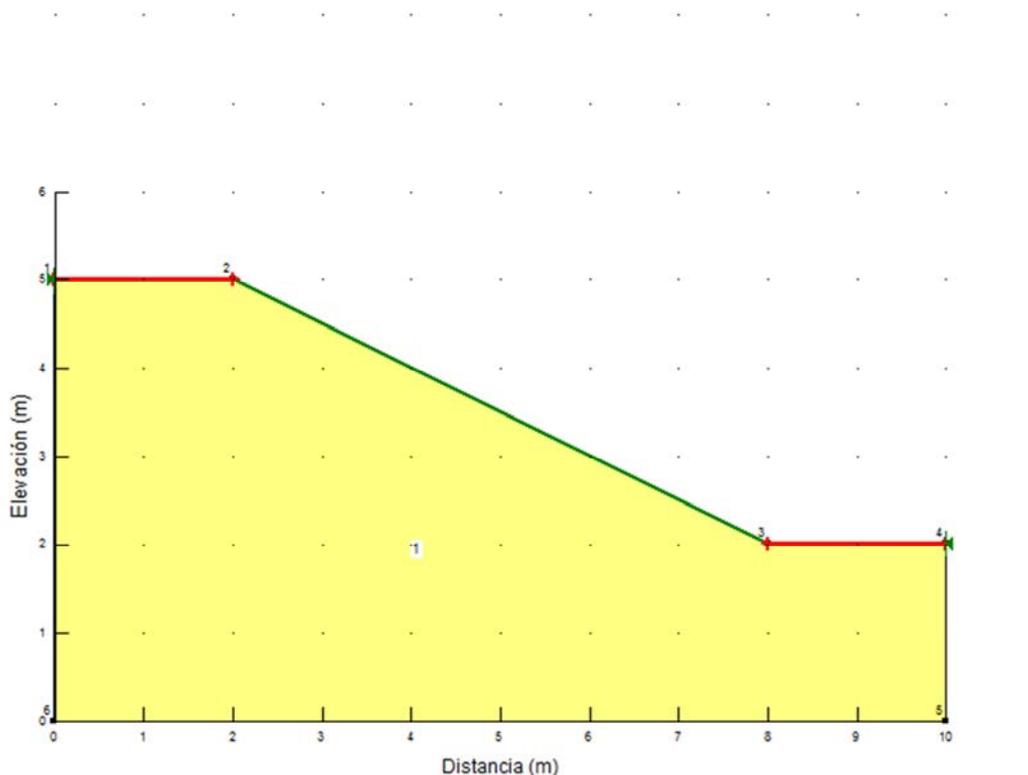
- Pendiente: 35°
- Densidad de plantación: 10 plantas de vetiver por metro cuadrado

5.2.2 Análisis de taludes utilizando el Software Slope/W

A continuación se presenta el análisis realizado utilizando el programa **Solpe/W** de **GeoStudio 2004**.

Para este análisis se definió un talud imaginario, con una pendiente 2H:1V. Se modeló el suelo menos competente de los tres sitios de muestreo, este es el del sitio de muestreo no.3, en San Jerónimo de Moravia. En la figura siguiente se muestra la geometría del talud utilizada.

Figura 5.10 Geometría del talud imaginario utilizado



Seguidamente el primer paso realizado fue definir el modelaje para medir los efectos de las raíces en la resistencia del suelo. Para lograrlo, se seleccionó el método más ampliamente aceptado y comprobado. Este método fue desarrollado independientemente y paralelamente por Waldron (1977), Wu (1976) y Brenner y James (1977) (Ver marco teórico).

Este modelo asume raíces elásticas y flexibles que se extienden verticalmente a través de una zona plana de cortante. Este modelo es la idealización del caso en el cual las raíces se encuentran en posición vertical y se atraviesan la zona de deslizamiento de un talud. Se asume que las raíces se ubican inicialmente de manera perpendicular a la superficie de falla.

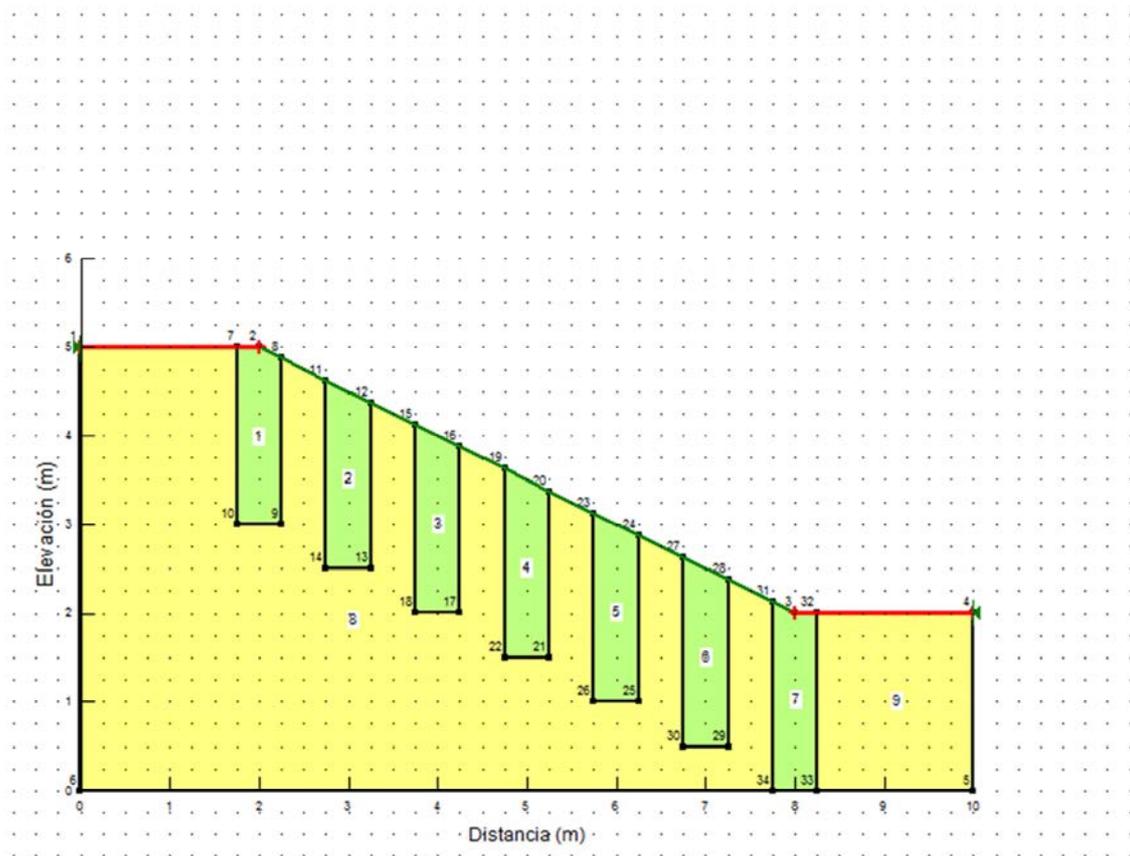
Una vez definido el modelo se procedió a realizar los cálculos de incremento en la resistencia al corte del suelo utilizando los ensayos de falla a tensión realizados. Utilizando un valor de $\frac{A_R}{A}$ de 0,5% y un valor de T_R de 38,1 kg/cm², se obtiene a partir de la ecuación 10-3 el valor de $\Delta S_R = 0,22$. Este valor es el aporte total de las raíces a la cohesión del suelo.

Para el sitio de muestreo No. 3 se tenía un valor de cohesión original sin raíces de $c = 0,23$ kg/cm² y con el incremento debido a la presencia de raíces una cohesión de $c = 0,45$ kg/cm². Por otro lado el modelo asume que el ángulo de fricción interna permanece invariante. En este caso permanece para todos los casos en 30° .

Se utilizó un peso unitario del suelo sin raíces de 1630 kg/m³, y se utilizó un peso unitario de suelo con raíces de 1400 kg/m³.

Todos los datos se introdujeron en el programa Slope/W 2004, para la realización de un análisis de estabilidad utilizando el Método de Equilibrio Límite mediante el enfoque de Morgenstern-Price. La geometría del talud reforzado con vetiver se muestra en la siguiente figura.

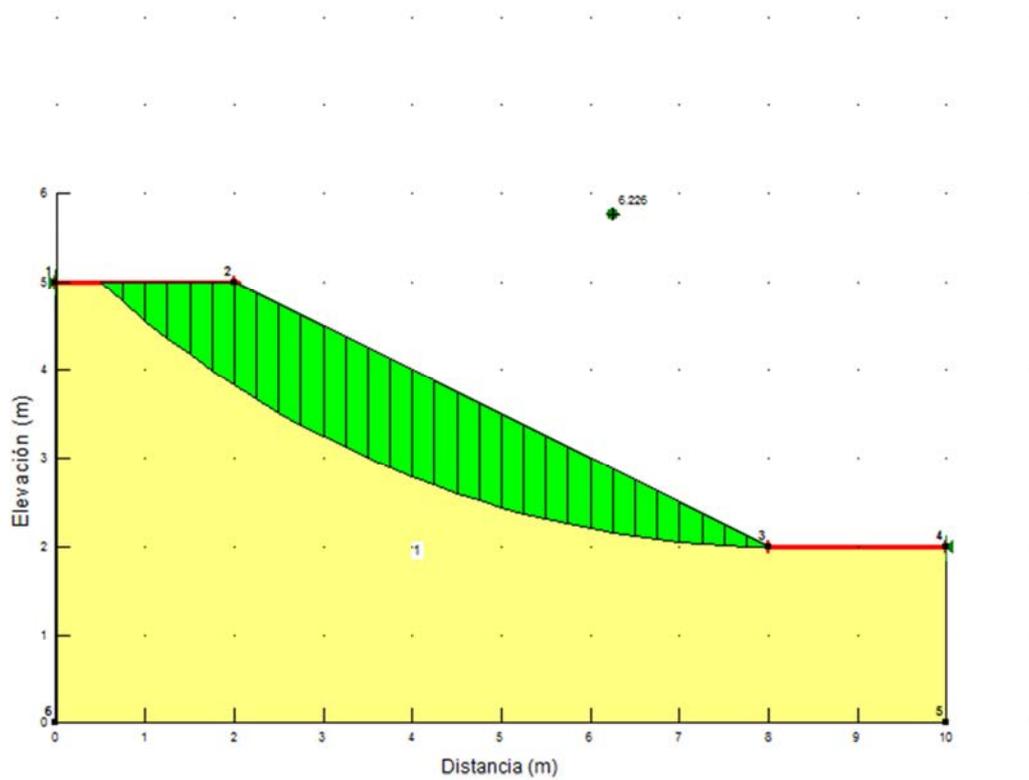
Figura 5.11 Geometría del talud imaginario utilizado reforzado con vetiver



En esta configuración de geometría se asume que las plantas de vetiver son sembradas con separaciones horizontales de 1 m y verticales de 0,5 m, en una misma hilera las plantas son sembradas a cada 0,15 m, esto quiere decir que se asume una cortina densa, asemejando un muro hacia el eje perpendicular al plano. El diámetro de las raíces se asume invariante hasta los dos metros de profundidad, esto es conservador ya que esta planta puede desarrollar raíces de 3 o 4 m. Se midió el diámetro de la muestra de raíces y este es de 50 cm en promedio por lo que el suelo se modifica en un radio de 25 cm alrededor de la planta.

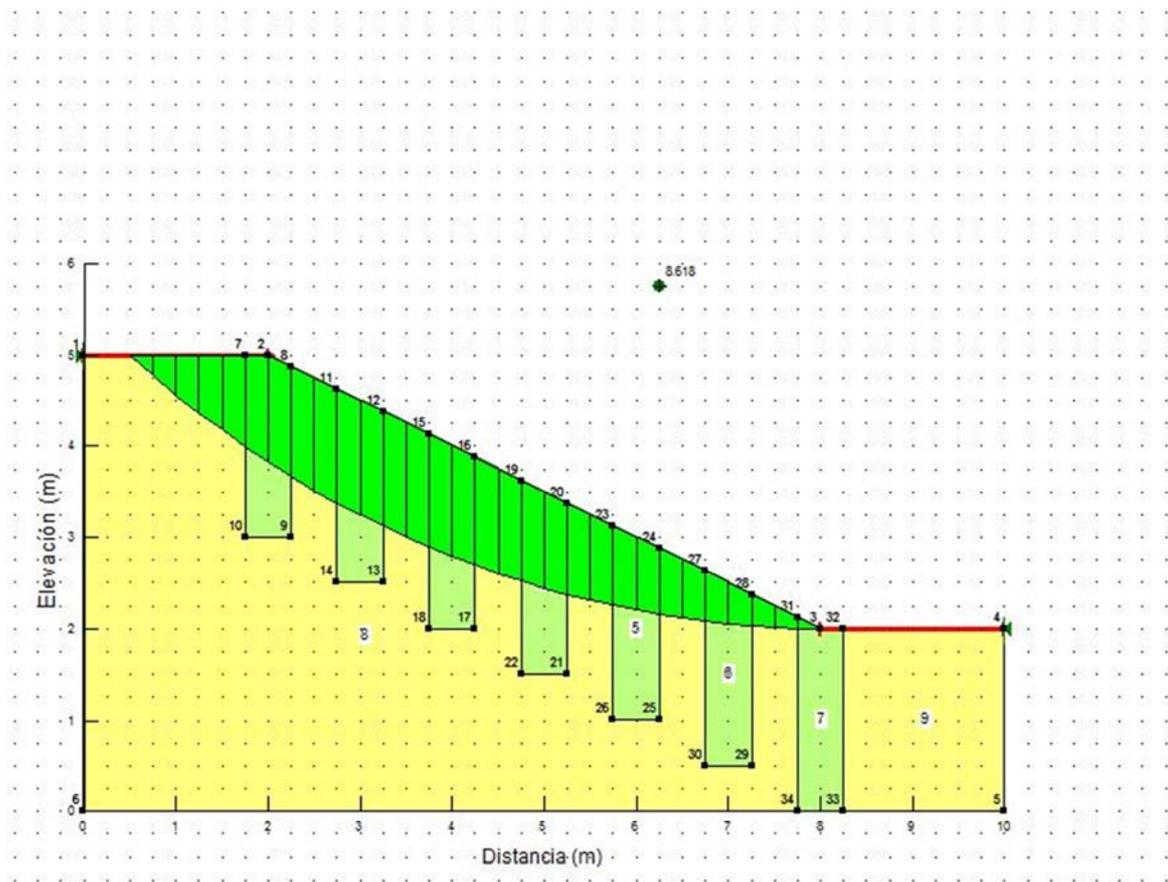
Se obtuvo el factor de seguridad (FS) para tres casos, uno en el cual la superficie de falla es medianamente superficial, otro en una superficie de falla que corta las columnas de suelo modificado con raíces y por último una falla superficial. Los tres casos se muestran a continuación.

Figura 5.12 Superficie de falla medianamente superficial del talud sin presencia de raíces



En la figura se puede apreciar la superficie de falla más crítica para el talud, se obtiene un factor de seguridad de 6,23.

Figura 5.13 Superficie de falla medianamente superficial del talud con presencia de raíces

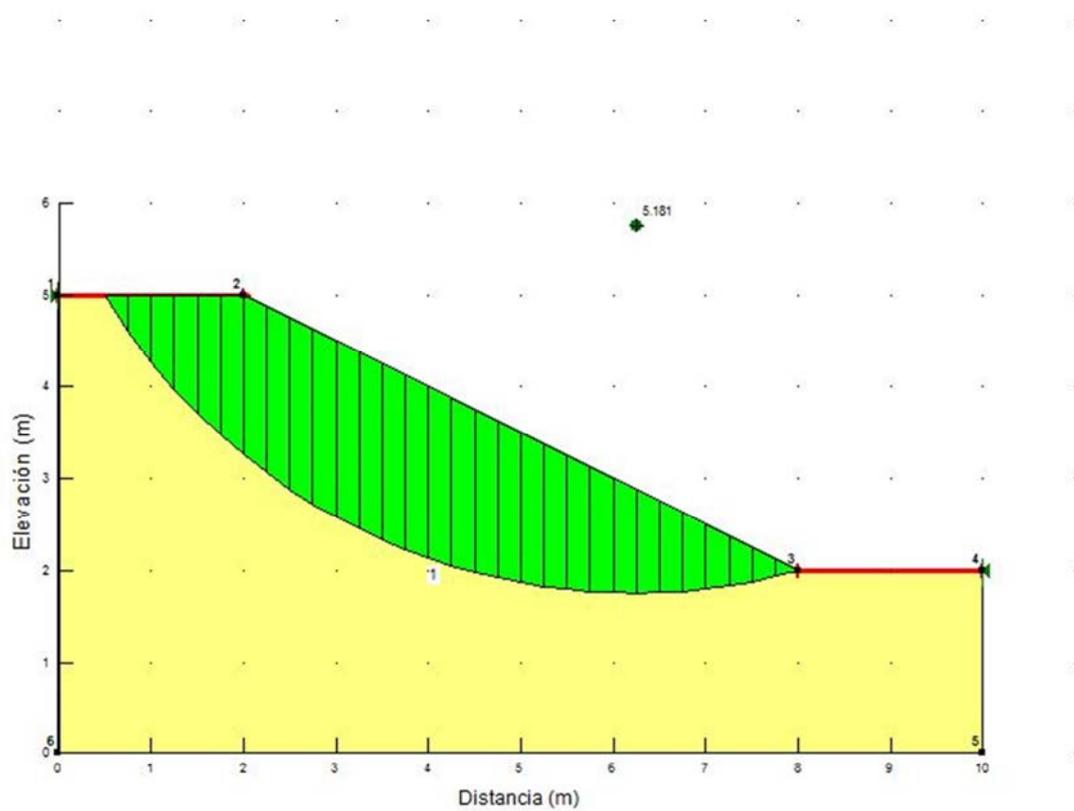


Es posible notar que en este caso, la superficie de falla corta todas las columnas, poniendo a trabajar todas las columnas de suelo reforzado con raíces. Se obtiene un incremento considerable del factor de seguridad.

Cuadro 5.14 Factores de seguridad y sus incrementos para los casos con y sin raíces de la superficie de falla medianamente superficial

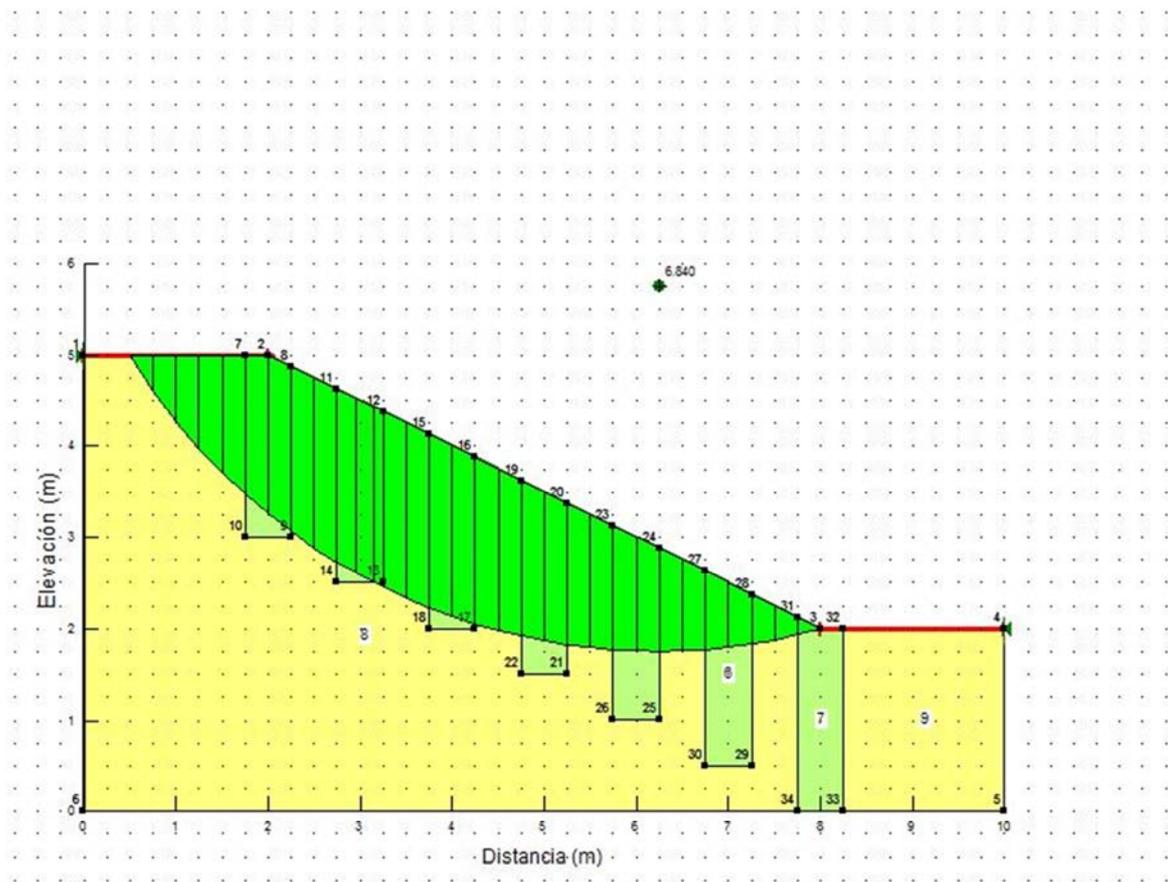
Caso 1	FS	Incremento
Suelo sin raíces	6,23	38,36%
Suelo con raíces	8,62	

Figura 5.15 Superficie de falla más profunda del talud sin presencia de raíces



En la figura de arriba se muestra una superficie de falla distinta a la más crítica, esta corta todas las columnas de suelo reforzadas con raíces.

Figura 5.16 Superficie de falla del talud con presencia de raíces



Cuadro 5.17 Factores de seguridad y sus incrementos para los casos con y sin raíces de la superficie de falla que corta todas las columnas de suelo reforzado

Caso 2	FS	Incremento
Suelo sin raíces	5,18	32,05%
Suelo con raíces	6,84	

Es posible notar que conforme más columnas de suelo reforzado atraviese la superficie de falla, mayor es el incremento del factor de seguridad. En este

Figura 5.18 Superficie de falla superficial del talud sin presencia de raíces

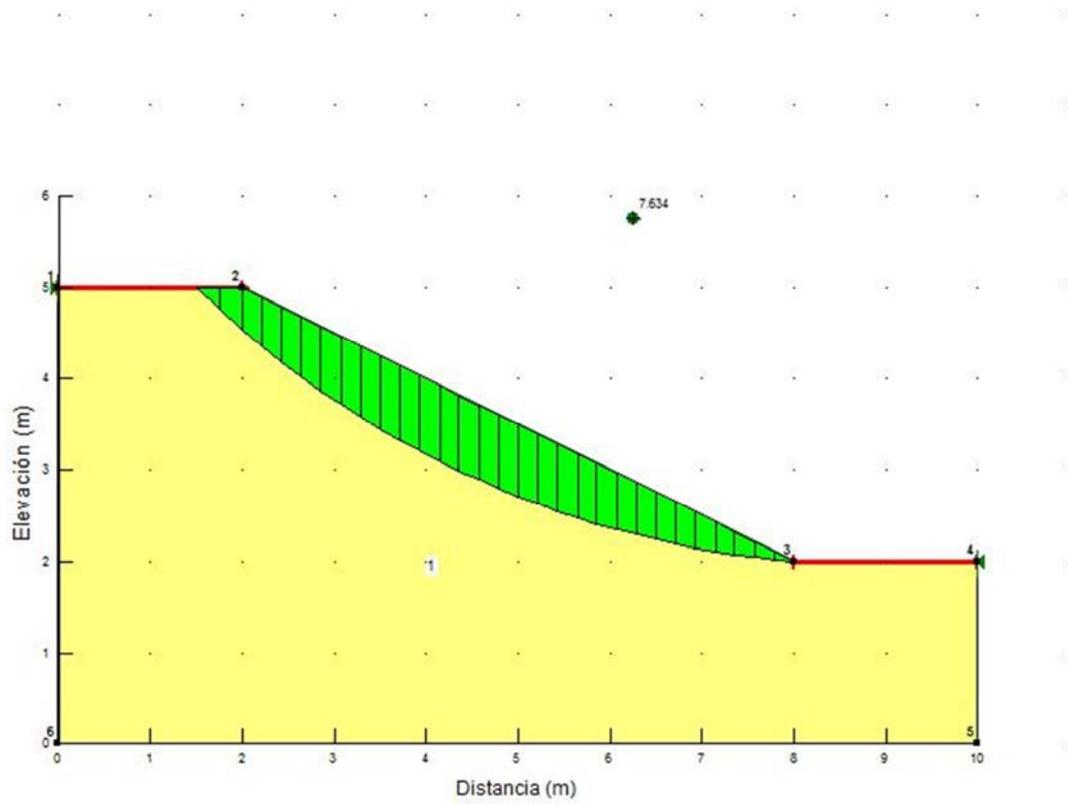
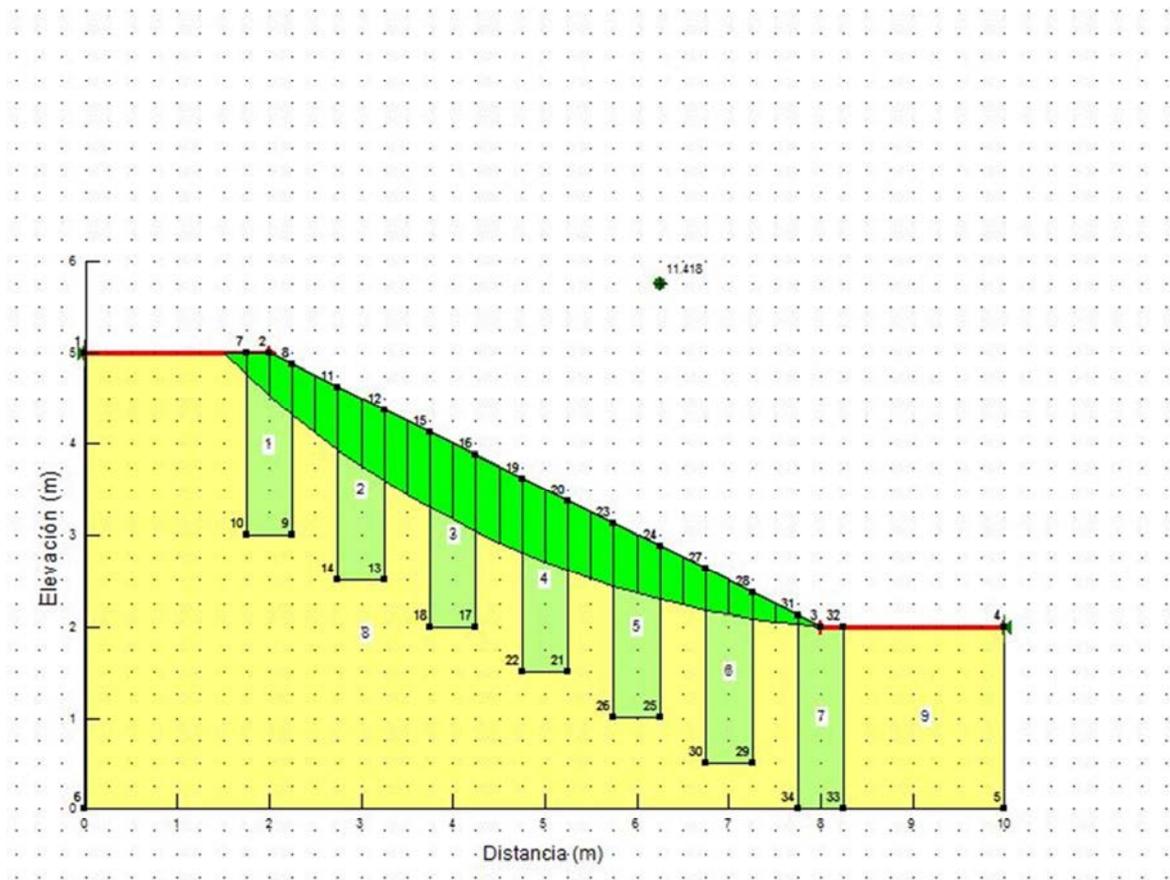


Figura 5.19 Superficie de falla superficial del talud con presencia de raíces



Cuadro 5.20 Factores de seguridad y sus incrementos para los casos con y sin raíces de la superficie de falla superficial

Caso 3	FS	Incremento
Suelo sin raíces	7,63	49,67%
Suelo con raíces	11,42	

Finalmente, es posible notar que la efectividad del refuerzo incrementa conforme la falla sea más superficial, vemos que para el primer caso, en la falla más superficial el incremento del FS es de casi un 50%, en la medianamente superficial es de 38,4% y por último en la falla más profunda es de aproximadamente 32%. Esto demuestra que en condiciones de falla superficial es en las que el refuerzo con raíces es más efectivo.

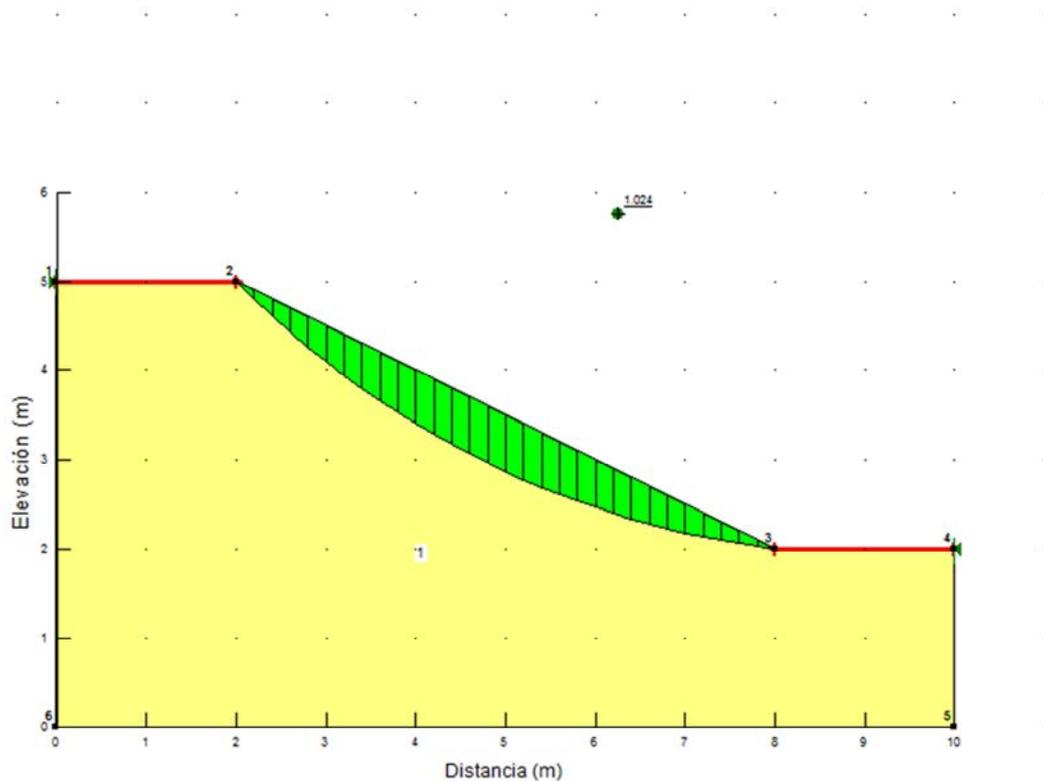
5.2.3 Análisis de sensibilidad de ϕ y c en la estabilidad con vegetación

En este apartado, se simula la condición de un talud con problemas de falla inminente, eso quiere decir, que el factor de seguridad es muy cercano a 1. Para esto se utilizó una geometría del talud igual a la del ejemplo realizado con el programa Slope/W. Sin embargo, se varió la cohesión y el ángulo de fricción de manera que el factor de seguridad fuera parecido a 1.

Para lograrlo se utilizó una cohesión muy baja de $0,001 \text{ kg/cm}^2$ y un ángulo de fricción de 25° .

Primero se analizó el caso sin raíces, la superficie de falla más crítica dada por el programa resultó ser una falla superficial, en la cual el refuerzo de las raíces es más eficiente. En la figura 5.21 se muestra el talud analizado, así como la superficie de falla más crítica.

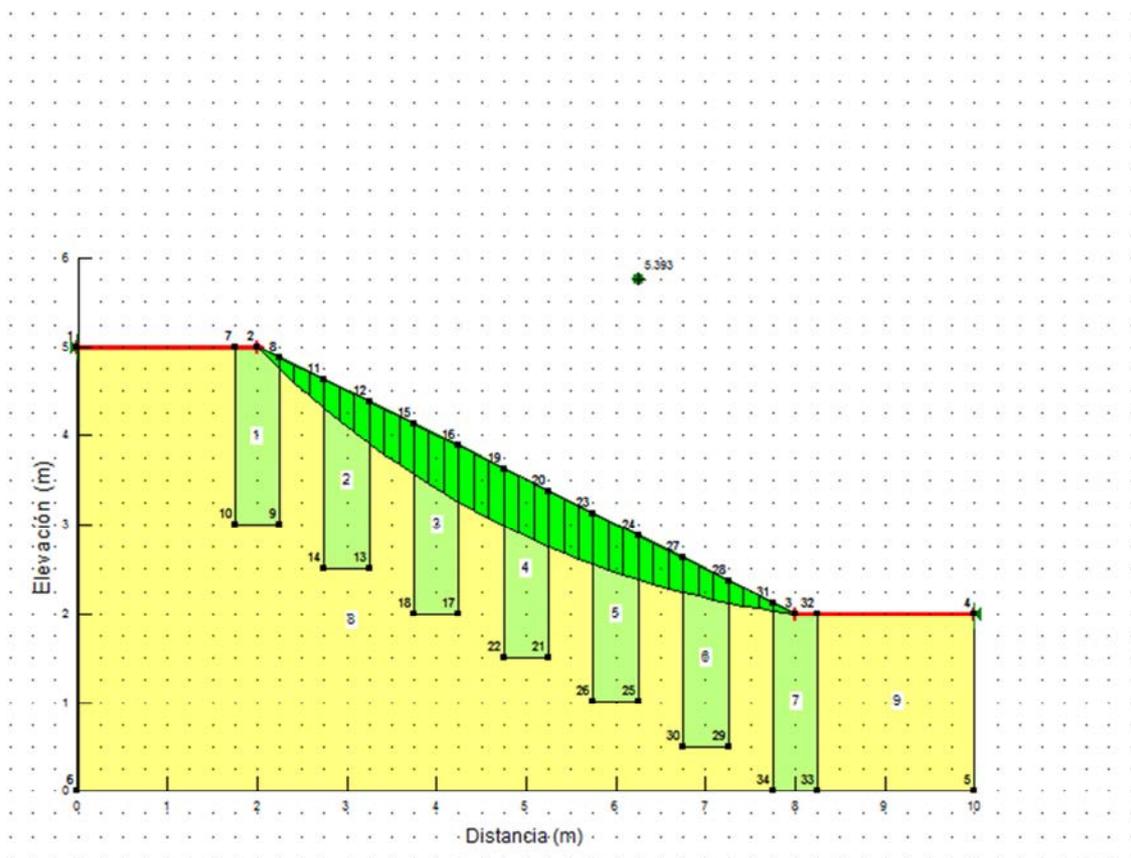
Figura 5.21 Superficie de falla más crítica



Para esta superficie de falla el programa arroja un factor de seguridad de 1,02, que es bastante cercano a 1 e indica que el talud se encuentra en un estado de falla inminente.

En la figura 5.22 se muestra la misma superficie de falla con la presencia de vegetación ya establecida.

Figura 5.22 Superficie de falla más crítica, en talud reforzado con raíces



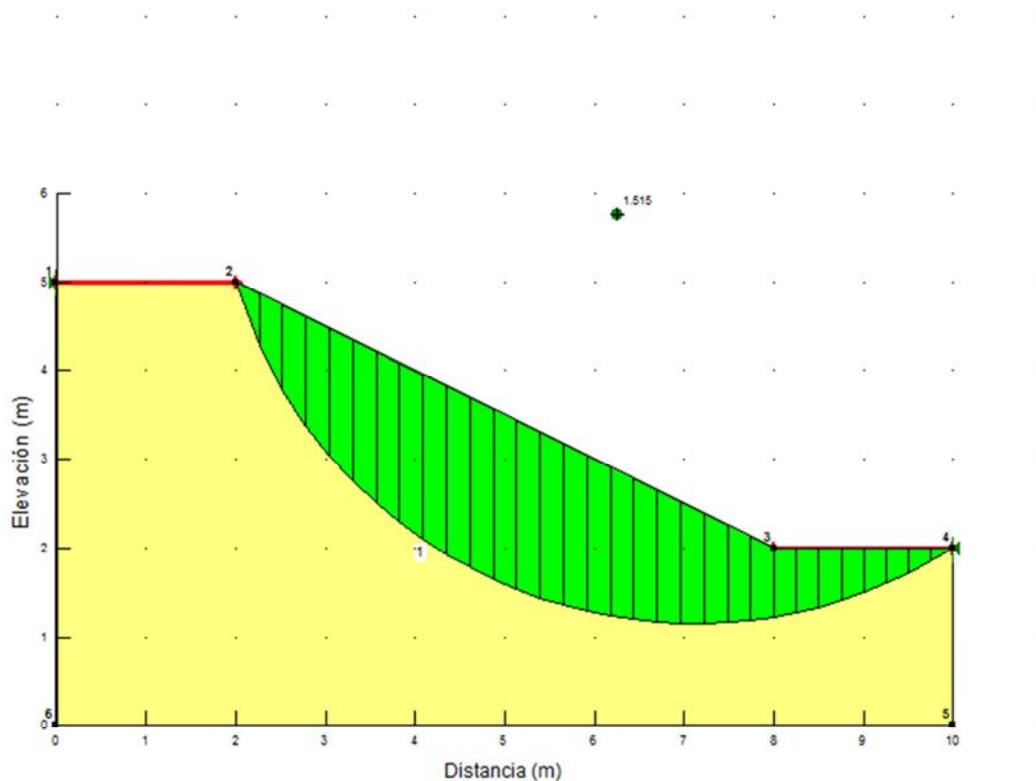
Como se puede apreciar el factor de seguridad aumenta a 5,40. Este factor de seguridad es bastante alto y no generaría ninguna preocupación de falla para este talud.

Es importante recordar e insistir, en que la vegetación no es una herramienta para intervenir casos de falla inminente. En un caso así, los se deben utilizar métodos de bioingeniería más robustos que puedan estabilizar el talud de inmediato y no tengan que esperar a que la vegetación se desarrolle por completo.

Este caso es solamente un ejemplo para demostrar como la vegetación ya establecida puede generar aumentos considerables en los factores de seguridad presentes en un talud.

Por otro lado, se va a analizar el mismo talud pero con una superficie de falla que cumpla con el factor de seguridad mínimo establecido por el CCCC (1,5 para el caso estático). En la figura 5.23 se puede apreciar dicha superficie de falla, en el talud sin refuerzo de raíces.

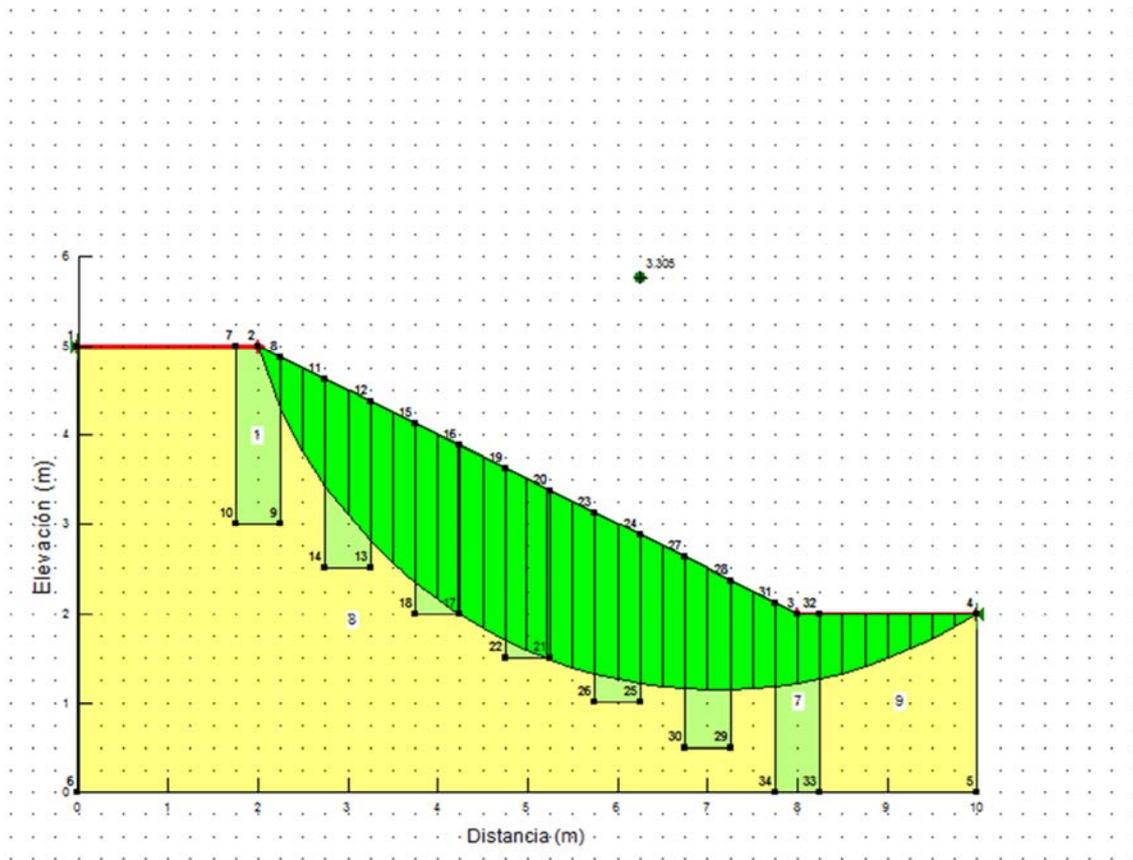
Figura 5.23 Superficie de falla con un factor de seguridad cercano a 1,5



Se puede observar que en este caso, el factor de seguridad es 1,52 que cumple con el requerimiento mínimo del CCCR.

Ahora, en la figura 5.24, se puede apreciar el aumento del factor de seguridad generado por los efectos de las raíces.

Figura 5.24 Superficie de falla con un factor de seguridad cercano a 1,5 ahora con raíces



El factor de seguridad aumenta a casi el doble del talud sin presencia de raíces. En este caso el nuevo factor de seguridad es de 3,30.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones más importantes de esta investigación:

1. Se encontró un método de bajo costo y sencillo para evaluar el efecto de las raíces en la estabilidad de taludes mediante la realización de ensayos de resistencia a la tracción de las raíces del pasto que se desea evaluar.
2. Se desarrolló un procedimiento de diseño conciso, para incluir el efecto de la vegetación en la resistencia al corte a lo largo de la superficie de falla de un talud.
3. Se desarrolló un método para introducir el efecto de las raíces de la vegetación mediante el uso del método de equilibrio límite. Esto se logra mediante el modelado de la matriz suelo-raíz como una columna de suelo cuyas propiedades se modifican de acuerdo con la resistencia a tracción de las raíces.
4. Se comprobó que la resistencia a tensión de las raíces y el área de la sección transversal ocupada por las raíces son los dos factores principales para medir el aumento de resistencia al corte generado por una planta o árbol.
5. Se demostró que el ensayo de corte directo en pequeña escala no devuelve resultados significativos en cuanto a los efectos de las raíces en el aumento de la resistencia al corte en suelos.
6. Se demostró mediante el ensayo de corte directo en pequeña escala que la presencia de raíces en el suelo incrementa la ductilidad del suelo en estados de carga bajos.
7. Se logra una promoción y difusión de algunas alternativas novedosas para la estabilización y control de erosión en suelos. Estas alternativas se caracterizan por el uso de materias primas con una baja huella de carbono y métodos constructivos que benefician a la sociedad en donde se implementen.
8. Se estudió como la vegetación ya sea arbórea o herbácea tiene una mayor cantidad de efectos positivos que negativos, haciéndola una herramienta indispensable en la protección de taludes, laderas y estructuras de retención en general.
9. Se comprobó que las raíces de alta fibrosidad son las más indicadas para la estabilización de taludes, ya que aumentan la resistencia al corte de los suelos volviéndolos más competentes contra deslizamientos y mejorando la estabilidad de los mismos.

10. Se realizó una extensa revisión bibliográfica, mediante la cual se expone y da a conocer el estado del arte en técnicas de bioingeniería y estabilización de taludes con vegetación. Se exploraron tanto las técnicas como los materiales tanto vivos como inertes para la construcción de muros verdes, así como el uso combinado de las técnicas convencionales en combinación con la vegetación, tanto para reducir el impacto visual como medioambiental.

6.2 Recomendaciones

Es de suma importancia que esta investigación continúe, ampliándose a una variedad mayor de plantas, para así extender y universalizar la metodología de diseño a todas las zonas de nuestro país. Es importante explorar las cualidades de las especies de plantas y árboles locales de cada zona para conocer su idoneidad en estas aplicaciones de estabilización. Si bien, se han realizado estudios interesantes variedades de plantas que contribuyen al control de erosión, la cantidad de estudios en el país que exploren las propiedades ingenieriles de plantas y árboles no es muy amplia. Por lo que el campo para la investigación está muy abierto.

Mediante la realización de las pruebas de corte directo en pequeña escala para obtener las propiedades del suelo con presencia de raíces, se obtuvo una idea del comportamiento general de las mismas y su acción reforzadora. Sin embargo, sería ideal poder realizar ensayos de corte directo a gran escala, construyendo una caja de corte portátil y de dimensiones representativas (por lo menos 30 cm x 30 cm x 30 cm) para poder estudiar la contribución de las raíces a la resistencia al corte en suelos. Esto permitiría medir el incremento de la resistencia en plantas ya establecidas y de edad suficiente para ser aptas para la estabilización de taludes y laderas.

Otra manera, más lenta, pero igualmente eficiente de medir este efecto, es sembrando las plantas que se quieren estudiar en un cajón de madera (de por lo menos 2 m x 2 m x 0,4 m) que tenga la posibilidad de inclinarse y que este separado en dos partes para que funcione como un mecanismo de corte y determine empíricamente la capacidad de las raíces para resistir deslizamientos superficiales.

También se podría instalar una caja de corte de gran escala en una ladera existente o en un talud nuevo, a la cual se le agregue un gancho, que permita la inducción de la falla mediante algún vehículo o tractor que jale la parte móvil. Sí a este sistema se le adicionara una celda de carga y deformímetros, entonces también se podría medir la resistencia de todo el conjunto en escala natural.

Finalmente, la recomendación más importante, es la promoción de la reducción de la deforestación. Esto contribuirá a dar una mejor calidad de vida a la sociedad en general, no solo por la menor incidencia de desastres naturales, sino también porque proporcionará un

aire más limpio para todos los habitantes. Para mayor y posterior información sobre este tema se recomienda revisar la bibliografía utilizada para el desarrollo de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Costarricense de Geotecnia: Comisión Código de Cimentaciones de Costa Rica. (2003). *Código de Cimentaciones de Costa Rica* (2nd ed.). San José, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- ASTM. (2007). *D422 - 63 (Reapproved 2007) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. West Conshohocken, PA: Autor.
- ASTM. (2010). *D854 - 10 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. West Conshohocken, PA: Autor
- ASTM. (2010). *D2210 - 10 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock Mass*. West Conshohocken, PA: Author.
- ASTM. (2011). *ASTM D2487 - 11 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA: Author.
- ASTM. (2010). *D3080 / D3080M - 10 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. West Conshohocken, PA: Author.
- ASTM. (2009). *ASTM D3282 - 09 Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. West Conshohocken, PA: Author.
- ASTM. (2010). *D4318 - 10 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. West Conshohocken, PA: Author.
- Banco Mundial. (1995). *Vetiver: La barrera contra la erosión* (3era ed.). Washington, D.C., WA: Autor.
- Bardet, J. P. (1997). *Experimental Soil Mechanics*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Brenner, R. P., & James, S. M. (1977). *Effect of roots on the shear strength of a colluvial soil, Proc., 5th Danube European Conf. Soil Mech. and Foundation Engr* (pp. 77-78). Bratislava, Eslovaquia: CSSR.
- Centeno, F. A. (2002). *"Ingeniería biotécnica y bioingeniería. Nuevas tendencias de la geotécnica para las obras de tierra, la estabilización de taludes y el control de la erosión", XVII Seminario Venezolano de Geotecnia*.
- Coppin N.J. and Richards, I.G. (1990) *Use of vegetation in Civil Engineering*.UK: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA).

- Das, B. M. (2006). *Principles of Geotechnical Engineering* (5ta ed., pp. 21-28). Toronto, Canada: Thomson.
- Deere, D. U., & Patton, F. D. (1971). *Slope stability in residual soils*. San Juan: ASCE.
- Fernández, D. (2011). *Guía práctica para control de erosión superficial en taludes usando vegetación nativa de Costa Rica*. Proyecto de graduación, Universidad de Costa Rica, San José.
- Gomis, C. J. (2006). "*Experiencias en Bioingeniería implementando el uso del vetiver (Vetiveria zizanioides, (L) Nash) en diferentes localidades de Venezuela*", *Fourth International Conference on Vetiver-ICV4*.
- Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education.
- Gray, D. H., & Leiser, A. J. (1982). *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. New York, NY: Van Nostrand Reinhold.
- Hammel, B. E., Greyum, M. H., Herrera, C., & Zamora, N. (2005). *Manual de plantas de Costa Rica: Monocotiledóneas* (Vol. 3).
- Hengchaovanich, D., & Nilaweera, N. S. (1996). "*An Assessment of Strength Properties of Vetiver Grass Roots in relation to Slope Stabilization*", *First International Vetiver Conference*.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Hong, C., Yang, X., Liu, A., Fu, H., & Wan, M. (2003). "*A Study on the Performance and Mechanism of Soil-Reinforcement by Herb Root System*", *Third International Vetiver Conference*.
- Ke, C., Feng, Z., Wu, X., & Tu, F. (2003). "*Design Principles and Engineering Samples of Applying Vetiver Eco-Engineering Technology for Steep Slope and River Bank Stabilization*" *Third International Vetiver Conference*.
- Kokutse, N., Fourcaud, T., Kokou, K., Neglo, K., & Lac, P. (2006). *3D numerical modelling and analysis of forest structure on hill slopes stability*. En: *Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides* (pp. 561-567). Tokyo, Japón: Universal Academy Press, Inc.

- Leventhal, A. R., & Mostyn, G. R. (1987). *Slope stabilisation techniques and their application*. In *Slope Instability and Stabilisation*, ed. by B. Walker and R. Fell. Rotterdam, Holanda: Balkema.
- Liu, T. K. (n.d.). "A review of Engineering Soil Classification Systems" *Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes* (5ta ed., pp. 361-382). N.p.: American Society for Testing and Materials ASTM.
- López, C. (1999). *Manual de estabilización y revegetación de taludes* (2da ed.). Desconocida, España: Entorno Gráfico.
- Lowe III, J., & Zaccheo, P. F. (1991). "Subsurface exploration and sampling" en *Foundation Engineering Handbook* (2da ed., pp. 1-71). New York: Chapman & Hall.
- Mataix, C., & López, C. (2007). "Factores ambientales: funciones y uso de la vegetación en la estabilización de laderas", *Jornadas técnicas sobre Estabilidad de Laderas en Embalses*.
- Morgan, R. P. (2005). *Soil Erosion and Conservation* (3rd ed.). Malden, MA: Blackwell Science Ltd.
- Moscoso, F. (2003). *Principios y fundamentos para aplicación de bioingeniería de suelos en taludes de corte*. Tesis, Universidad de Santiago, Santiago.
- Othman, A. R. (1989). *A note on Bamboo for Soil Stabilization and Erosion Control on Forest Road in FRIM* (Vol. 1). Malaysia: Forest Research Institute.
- Porras, G. (2000). *Uso de la vegetación para la estabilización de taludes*. Proyecto de graduación, Universidad de Costa Rica, San José.
- Rivera, H. (n.d.). *Principios de la bioingeniería*. Accesado 26 de setiembre de 2010, de <http://ecoambientes.tripod.com/index.html>
- Rivera, H., Sinisterra, J. A., & Calle, Z. (n.d.). *Restauración ecológica de suelos degradados por erosión en cárcavas en el enclave xerofítico de Dagua, Valle de Cauca, Colombia*. Cali, Colombia: CIPAV.
- Skempton, A. W. (1953). *The colloidal activity of clays*, *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 1, pp. 57-61).
- Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B. C., & Achim, A. (Eds.). (2008). *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological*

Solutions, Chapter 4: How Vegetation Reinforces Soil on Slopes (pp. 65-118). Dordrecht, Holanda: Springer

- Pollen, N., & Simon, A. (2005). *Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model*, *Water Resources Research*, 41, W07025, doi:10.1029/2004 WR003801.
- Suarez, J. (n.d.). *Deslizamientos: Técnicas de remediación* (Vol. 2). Bucaramanga, Colombia: Ingeniería de suelos Ltda.
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Ingeniería de suelos Ltda.
- *Slope stabilization and erosion control*. (n.d.). Accesado: 26 de setiembre de 2010, de <http://www.ecy.wa.gov/programs/sea/pubs/93-30/biotech.html>
- Truong, P., Tan Van, T., & Pinners, E. (2008). *Vetiver Systems Application - A Technical Reference Manual*. Vetiver.org.
- Waldron, L. J. (1977). *Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil*, *Soil Sci. Amer. J.* 41 (pp. 843-849).
- White, C.A. (1979). *Best management practices for the control of erosion and sedimentation due to urbanization of the Lake Tahoe Region of California*, *Proc., Intl. Symposium of Urban Runoff, Univ. of Ky., Lexington, Ky., pp 233-245*.
- Wu, T. H. (1976). *Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Geotechnical Engineering Report 5*. Columbus, OH: Civil Engineering Department, Ohio State Univ.
- Yan, Z. X., Yan, C. M., & Wang, H. Y. (2010). *Mechanical interaction between roots and soil mass in slope vegetation*. Lanzhou, China: Sci China Tech Sci.
- Zhou, C., & Xu, L. Y. (2011). *"Application of Vetiver System for Highway and Railway and River Bank Slope Protection in China"*, *International Workshop on Veriver*.