

**USO DEL PASTO VETIVER COMO UNA PROPUESTA DE BIOINGENIERÍA EN
LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES**

**CARLOS ALBERTO PEREA
JORGE LIZCANO DURAN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2012**

**USO DEL PASTO VETIVER COMO UNA PROPUESTA DE BIOINGENIERÍA EN
LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES**

**CARLOS ALBERTO PEREA
JORGE LIZCANO DURAN**

**Monografía para optar por el título de
Especialista en Ingeniería Ambiental**

**Director:
JAIME SUAREZ DIAZ
INGENIERO CIVIL (B.S.)
MASTER OF SCIENCE (M.Sc.)**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2012**

*A mis padres a quienes debo todo lo que soy
A mis hermanas y sobrinos
A Ivonne*

Carlos Perea

*A mis padres celestiales y terrenales por
Permitirme estar aquí en esta Escuela
que es nuestro planeta.*

*A mi querida familia por el tiempo
que me han prestado generosamente*

Jorge Lizcano

AGRADECIMIENTOS

Al I.C. Jaime Suarez, por su amable aporte e información compartida del tema en cuestión y lineamientos en la dirección de esta monografía.

Al I.Q. Crisóstomo Barajas, coordinador de la Especialización en Ingeniería Ambiental, de la Escuela de Ingeniería Química, UIS, por su disposición permanente y colaboración para llevar a buen término este trabajo.

Al amb, por facilitar las practicas y trabajos de campo y la información necesaria sobre las especie trabajada.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. CONCEPTOS GENERALES	21
1.1. TALUDES	21
1.2. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LOS TALUDES	21
1.3. BIOINGENIERÍA Y BIOTECNOLOGÍA	22
1.4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	23
1.5. PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE ESTABILIZACIÓN CON BIOINGENIERÍA.....	24
1.6. LA BIOINGENIERÍA EN LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES.....	25
1.6.1. Erodabilidad.....	25
1.6.2. Factores de la vegetación en suelos.....	26
1.7. ANTECEDENTES EN LA APLICACIÓN DE BIOINGENIERÍA PARA ESTABILIZAR MOVIMIENTO DE TALUDES.....	28
1.7.1. Casos Mundiales	28
2. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES	29
2.1. TALUDES Y LADERAS	29
2.1.1. Factores que influyen en formación de taludes y laderas	29
2.1.2. Elementos de un deslizamiento	30
2.2. PROCESOS DE DESESTABILIZACIÓN DE TALUDES.....	32
2.3. DESLIZAMIENTOS Y MOVIMIENTOS EN MASA.....	32
2.3.1. Tipos de falla de taludes.....	33
2.4. FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TALUDES	33
2.5. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES	35
2.6. OBRAS DE INFRAESTRUCTURA Y SUS IMPLICACIONES EN EL MEDIO AMBIENTE.....	36
3. LA VEGETACIÓN Y SU FUNCIÓN DE CONSERVACIÓN.....	38
3.1. EL USO DE LA VEGETACIÓN EN LAS OBRAS DE INGENIERA	38
3.2. EFECTOS FÍSICOS DE LA VEGETACIÓN	40
3.2.1. Influencia Hidrológica.....	41
3.2.2. Influencia Mecánica	41
3.2.3. Efectos mecánicos.....	42
3.2.3. Funciones de la vegetación	44
3.2.4. Limitaciones de la protección vegetal	45
3.3. EFECTOS HIDROLÓGICOS DE LA VEGETACIÓN	46
3.3.1. Intercepción	47
3.3.2. Infiltración.....	48
3.3.3. Evapotranspiración (EVT).....	50

3.3.4. Influencia de la EVT en la estabilidad de los suelos	52
3.4. EFECTO PROTECTOR DE LA VEGETACIÓN	52
4. LA SELECCIÓN DE ESPECIES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES	55
4.1. SELECCIÓN DE ESPECIES	55
4.2. CRITERIOS BIOTÉCNICOS.....	56
4.3. CRITERIOS AMBIENTALES	57
4.3.1. Bioclima	57
4.3.1.1. El nivel regional.....	58
4.3.1.2. El nivel local:	58
4.3.2. Características del sustrato.....	58
4.3.2.1. Textura y densidad	59
4.3.2.2. Fertilidad	59
4.3.2.3. pH	59
4.4. CRITERIOS FITOSOCIOLÓGICOS	59
4.5. PORQUE UTILIZAR VETIVER.	60
5. EL VETIVER UNA PLANTA ÚNICA.....	64
5.1. VETIVER (Vetiveria Zizanioides)	64
5.2. NOMBRES COMUNES.....	65
5.3. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA	66
5.4. ASPECTOS TAXONÓMICOS DEL VETIVER	67
5.5. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL VETIVER.....	68
5.5.1. Las raíces	68
5.5.2. Características fisiológicas.....	70
5.5.3. Características Ecológicas.....	70
5.5.4. Potencial de malezas y plagas.....	71
5.6. USOS DEL VETIVER	72
5.6.1. Control de la erosión	73
5.6.2. Otros Usos	76
5.7. DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE VETIVER.....	77
6. PROPAGACIÓN VEGETATIVA DEL VETIVER.....	79
6.1. QUÉ ES LA TSV?	79
6.2. PROPAGACIÓN VEGETATIVA.....	79
6.3. OBTENCIÓN DE ESQUEJES DE VETIVER	80
6.4. MANEJO DE LA ESPECIE EN VIVERO.....	86
6.4.1. Propagación en bolsa plástica.	86
6.4.2. Propagación a raíz desnuda	88
6.4.3. Cuidados y manejo	88
7. MANEJO DEL VETIVER.....	89
7.1. TÉCNICAS DE PLANTACIÓN	89
7.1.1. Calidad del material de plantación	89

7.1.2. Densidades y distancias de siembra.....	91
7.1.3. Preparación del terreno.....	91
7.1.3.1. Remodelado y control de drenaje	92
7.1.3.2. Preparación mecánica del terreno	93
7.1.3.3. Mejoras edáficas.....	94
7.1.4. Plantación o Siembra de esquejes de Vetiver.....	94
7.1.4.1. Preparación esquejes	95
7.1.4.2. Siembra.....	96
7.1.5. Cuidados posteriores a la plantación	96
7.1.5.1. Riego.....	96
7.1.5.2. Fertilización.....	97
7.1.5.3. Resiembra:.....	97
7.1.5.4. Aclareo y eliminación de malezas	97
7.1.5.5. Siegas o podas de hojas.....	97
7.1.5.6. Limitaciones y Enfermedades	98
8. ALCANCES DEL SISTEMA VETIVER Y EXPERIENCIAS	99
8.1. EXPERIENCIAS EN COLOMBIA.....	99
8.2. VENTAJAS DEL SISTEMA VETIVER (SV)	100
8.3. DESVENTAJAS DEL SISTEMA VETIVER (SV)	103
8.4. ALCANCES DEL SISTEMA VETIVER.....	104
8.4.1. Interacción Vetiver - Talud	105
8.4.2. Precauciones técnicas	109
9. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN EN TALUDES EN CANAL DE ADUCCIÓN.....	111
9.1. ANTECEDENTES.....	111
9.2. ÁREA DE ESTUDIO	113
9.3. CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES.....	114
9.4. CLIMATOLOGÍA	114
9.4.1. Precipitación	114
9.4.2. Temperatura	115
9.4.3. Humedad del aire.....	116
9.4.4. Radiación solar	116
9.4.5. Fitogeografía.....	116
9.5. GEOMORFOLOGÍA.....	116
9.6. SUELOS	117
9.7. SELECCIÓN DE ESPECIE.....	117
9.8. OBJETIVOS QUE SE PERSIGUEN	118
9.9. PREPARACIÓN DEL TERRENO	118
9.10. SIEMBRA DE ESQUEJES.....	118
9.11. MEJORAS EDÁFICAS.....	121
9.12. CUIDADOS POSTERIORES DE LA PLANTACIÓN.....	122
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFIA.....	127

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Tipos de taludes.	21
Figura 2 Nomenclatura de un deslizamiento.....	30
Figura 3: Efectos físicos de la vegetación (a) efectos hidrológicos; (b) efectos mecánicos.....	41
Figura 4: Variación de la intensidad de infiltración respecto a pendiente, vegetación y Precipitación.	49
Figura 5: Efectos de la vegetación sobre la Infiltración.....	50
Figura 6: Energía cinética de las gotas de lluvia.....	53
Figura 7 Sistema vegetal de conservación del suelo usando Vetiver	75
Figura 8 Sistema vegetal de conservación del suelo	76
Figura 9 Vetiver en la estabilización de estructuras.....	77
Figura 10 Planta de vetiver desarrollada denominada “macolla” de la cual se obtienen los esquejes.	80
Figura 11. Área productora de esquejes.....	81
Figura 12. Detalle de plantas en area de producción de esquejes de vetiver.....	82
Figura 13 Extracción de plantas de vetiver para producción de esquejes.	83
Figura 14 Corte de raíces para producción de esquejes de vetiver.	84
Figura 15 Esquejes de vetiver.....	84
Figura 16 Esquejes de vetiver.....	85
Figura 17 Desarrollo radicular de Esquejes de vetiver.....	85
Figura 18 Esquejes de vetiver para la producción en bolsa plástica en vivero.	87
Figura 19 Esquejes de vetiver en crecimiento en bolsa plástica en vivero.	87
Figura 20 Esquejes de vetiver a raíz desnuda bajo sombra.	95
Figura 21 Derecha, recuperación de talud, Izquierda producción de Macollas.....	99
Figura 22 Cultivo Vetivernet - Tolima.....	100
Figura 23. Estabilización taludes de vías - Malaysia.....	101
Figura 24. Izquierda, Zona Industrial - USA, Derecha Taludes - Senegal.	101
Figura 25 Sistema radicular típico del Vetiver.....	102
Figura 26 Talud con riesgo de deslizamiento y pérdida de vidas humanas, y estabilización con concreto. Lebrija – Girón, Santander	105
Figura 27 Izq, Talud vía sustitutiva Hidrosogamoso, Der. Talud vía Lebrija – Girón - Santander.	106
Figura 28 Talud de alta pendiente con Vetiver - Java.....	106
Figura 29 Taludes con elementos de gran tamaño, vía Lebrija – Giron - Santander.	107
Figura 30 Taludes con deslizamientos o lavados, vía Lebrija – Giron - Santander	107
Figura 31 Erosión prematura del Talud Vía sustitutiva Hidrosogamoso - Santander.	108

Figura 32 Taludes revegetalizados sin Vetiver y sin canales de manejo de escorrentías, vía Lebrija – Girón - Santander.	108
Figura 33 Taludes susceptibles de estabilización con Vetiver, Izq Vía Cúcuta – Bucarmanga, Der. Via sustitutiva Hidrosogamoso.....	109
Figura 34 Captación y canal de aduccion.	111
Figura 35 Deslizamientos en taludes del canal de aducción.	112
Figura 36 Taludes estabilizados con biotecnología, Maní forrajero y Guadua....	113
Figura 37 Taludes elegidos para establecer barreras con vetiver.....	118
Figura 38 Esquejes enraizados de vetiver listos para plantación.....	119
Figura 39 HidroGel hidratado y aplicado al sitio de plantacion.	120
Figura 40 HidroGel hidratado y aplicado al sitio de plantación.	120
Figura 41 Esquejes de vetiver plantados en curva de nivel.	121
Figura 42 Mejora edáfica con el aporte de materia organica compsostada.....	121
Figura 43 Barrera de vetiver establecida con Mejora edáfica.	122

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Ventajas y desventajas de tipos de plantas en revegetalización de taludes.	27
Tabla 2: Aplicaciones de la vegetación en Ingeniería.	40
Tabla 3: Componentes de la planta y sus funciones.....	42
Tabla 4: Porcentaje de intercepción sobre la Precipitación total anual.	48
Tabla 5: Funciones de la vegetación.	56
Tabla 6: Resistencia de las raíces de algunas plantas a la tensión.	69
Tabla 7: Especificaciones Modificadas de Ikram Ullah para la producción de calidad de material vegetativo de vetiver.	89
Tabla 8: Precipitación mensual Estación CO La Esperanza. (1020 msnm).....	115
Tabla 9: Temperatura Media Estimada.....	115

RESUMEN

TITULO: USO DEL PASTO VETIVER COMO UNA PROPUESTA DE BIOINGENIERÍA EN LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES.*

AUTORES: CARLOS ALBERTO PEREA NIÑO
JORGE LIZCANO DURAN**

PALABRAS CLAVES: Bioingeniería, Cobertura, Esqueje, Propagación Vegetativa, Talud, Vetiver, Estabilización de taludes.

En esta monografía se realiza un estudio de las diferentes clases de taludes generados en la mayoría de obras civiles, las causas de la inestabilidad y se demuestra la importancia de la vegetación para ayudar a conservarlos.

Para disminuir los riesgos que generan los taludes al medio ambiente y las personas, la ingeniería, ha diseñado tecnologías útiles cuyo objetivo es la estabilización de taludes propiamente dicha.

Entre estas obras de reducción de riesgos de desestabilización de taludes se encuentran las obras de Bioingeniería, las cuales utilizan la vegetación viva y las cuales son objeto particular del presente estudio.

El objetivo del presente estudio fue realizar un análisis y descripción detallada de la tecnología acerca de la siembra de una especie, conocida por el nombre de Vetiver, (*Vetiveria zizanioides*) caracterizando los procesos de su aplicación, las propiedades y ventajas, rescatando información sobre algunas de las experiencias que se han llevado a cabo dentro de Colombia y algunas representativas a nivel mundial.

Finalmente, se presenta una experiencia práctica en la estabilización de taludes con esta especie llevada a cabo en un canal de aducción del sistema del acueducto del área metropolitana de Bucaramanga.

El documento al final presenta las observaciones, conclusiones y recomendaciones del caso, a tener en cuenta antes de seleccionar la siembra de vetiver como la tecnología apropiada para la estabilización de taludes, y aquellas también a tener en cuenta durante y después de realizado el proceso de la aplicación.

* Monografía de grado.

** Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico - Químicas, Escuela de Ingeniería Química. Director: Ing. Civil B.S. M.Sc. Jaime Suarez Díaz.

SUMMARY

TITLE: USE OF VETIVER GRASS AS A PROPOSAL FOR BIOENGINEERING IN SLOPE STABILIZATION.*

AUTHORS: CARLOS ALBERTO PEREA NIÑO**
JORGE LIZCANO DURAN

KEY WORDS: Bioengineering, Coverage, Cutting, Vegetative Propagation, Slope, Vetiver, stabilization of slopes.

This monograph is a study of the different kinds of slopes generated in most civil works. the causes of its instability and demonstrates the importance of vegetation to help preserve them.

To reduce the risks generated by slopes to the environment and people, engineering, has designed useful technologies aimed at the proper slope stabilization.

Among these works of reducing risks destabilization of slopes we can find the works of Bioengineering, which use living vegetation and which are particular object of this study.

The objective of this study was to conduct an analysis and description of the technology on the planting of one species, known by the name of Vetiver (*Vetiveria zizanioides*) characterizing the process of implementation, properties and benefits, retrieving information on some experiences that have taken place in Colombia and some representative worldwide.

Finally, we present a practical experience in slope stabilization with this species held in adduction channel of the aqueduct system in the metropolitan area of Bucaramanga.

The document presents at the end of the text, the findings, conclusions and recommendations thereon, to be considered before selecting the planting of vetiver as appropriate technology for slope stabilization. And those also to be considered during and after being completed the application process.

* Monograph of grade

** Universidad Industrial de Santander, Faculty of Engineering Phisycal – Chemistry, School of Chemical Engineering. The Director: Ing. Civil B.S. M.Sc. Jaime Suarez Díaz.

GLOSARIO

Adaptabilidad: Capacidad de acomodarse o ajustarse. La adaptabilidad biológica es la capacidad de los organismos vivos de ajustarse a diferentes condiciones medioambientales.

Bioingeniería: rama de la Ingeniería que comprende el uso de la vegetación para la estabilización de taludes y el control de la erosión.

Condiciones climáticas: Factores del clima de una región (latitud, componentes atmosféricos climáticos, topografía, orientación y exposición, y distancia al mar) que se combinan y multiplican dando lugar a una rica multiplicidad y diversidad de matices tanto en general como en los topoclimas o climas locales en particular.

Conservación de suelos: Conjunto de practicas aplicadas para promover el uso sustentable del suelo.

Cobertura vegetal: Capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomásas con diferentes características fisonómicas y ambientales que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales.

Esqueje: Fragmento de una planta, a partir de la cual se obtiene un nuevo ejemplar genéticamente idéntico a la planta de la cual se obtiene el fragmento.

Erosión: Desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza de un fluido en movimiento. La erosión puede ser generada tanto por el agua como por el viento.

Erodabilidad: Susceptibilidad de un suelo a presentar erosiones, dependiendo de su granulometría y de los índices de plasticidad.

Estabilización de taludes: Acciones sobre un talud o ladera encaminadas a conseguir un coeficiente de seguridad admisible frente al deslizamiento posible.

Escorrentía: Proporción del agua lluvia que fluye libremente sobre la superficie del terreno.

Estolón: rama rastrera que nace de la base del tallo de algunas plantas, con raíces que producen nuevas plantas.

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

Intercepción: se denomina al volumen de agua, (expresado en mm o litros por unidad de superficie) que es retenido en las hojas de la vegetación.

Rizoma: es un tallo subterráneo con varias yemas que crece de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos

Precipitación: Cualquier tipo de agua que cae sobre la superficie de la Tierra. Las diferentes formas de precipitación incluyen llovizna, lluvia, nieve, granizo, agua nieve, y lluvia congelada.

Propagación vegetativa: Consiste en el desprendimiento natural o artificial de partes de una planta, que son capaces de crecer hasta formar una nueva planta, semejante a la planta de la cual se desprendió.

Sequía: déficit de lluvias durante un período de tiempo prolongado –una temporada, un año o varios años en relación con la media estadística multianual de una región. La falta de lluvia da lugar a un suministro insuficiente de agua para las plantas, los animales y los seres humano

Suelo: Porción arable de la capa terrestre, donde crecen la mayoría de especies vegetales.

Talud: Los taludes o laderas son porciones de suelo que presentan una superficie de inclinación respecto a la horizontal; son naturales y antropicos.

INTRODUCCIÓN

Los taludes o laderas son porciones de suelo que presentan una superficie de inclinación respecto a la horizontal. Ellos pueden ser de origen natural como los que se aprecian en las faldas de cerros, montañas y demás estructuras geomorfológicas que componen la corteza terrestre y se denominan laderas. También pueden ser de origen antrópico como los que se observan en las obras de construcción de vías, construcción de edificaciones y demás alteraciones que el hombre realiza sobre la naturaleza y se denominan taludes.

Desde la importancia del presente estudio, los taludes son estructuras de tierra que presentan movimientos, desde muy rápidos a muy lentos, debidos a diferentes factores entre ellos los climatológicos como la precipitación y los vientos entre otros, los vibratoriales por efectos de movimientos telúricos y de usos de maquinaria cercana entre otros, químicos por efectos de meteorización del suelo, físicos como la gravedad por sí misma, y el peso de obras ubicadas sobre ellos. Estos factores hacen que los taludes se constituyan en peligros y representen un riesgo tanto para el ambiente, como para las obras y los seres humanos.

Es por ello que la ingeniería, en su intento por disminuir estos riesgos ha diseñado tecnologías útiles cuyo objetivo es la estabilización de taludes propiamente dicha. Tecnologías basadas en obras de concreto como pantallas, muros de contención, anclajes, obras de control de precipitación y escorrentía como la construcción de canaletas perimetrales y de corona, obras de disipación de energía hidráulica como obras de drenajes, con filtros de perforación horizontal y filtros a base de geotextil, entre otras variadas obras que se encuentran en la literatura mundial.

Entre estas obras de reducción de riesgos de desestabilización de taludes se encuentran también las obras de Bioingeniería, las cuales utilizan materia vegetal viva y las cuales son objeto particular del presente estudio.

Las obras de bioingeniería para taludes son diversas, variadas y están en mejoramiento e investigación continuos, entre ellas se encuentra y se destaca aquella que trata acerca de la estabilización con siembra de la especie vegetal gramínea *Vetiveria zizanioides*. La tecnología basada en esta planta ha sido fuertemente desarrollada en otros países donde se han encontrado resultados ampliamente favorables en taludes aptos para la aplicación de este tipo de obras,

así como también ha presentado valores agregados en el tratamiento por fitorremediación de aguas contaminadas, control de plagas y hasta con un componente social por el uso de los elementos de la planta en la elaboración de artesanías y la preparación de perfumes.

El objetivo del presente estudio fue el de realizar un análisis y descripción detallada de la tecnología acerca de la siembra de esta especie, conocida también por el nombre de Vetiver, caracterizando los procesos de su aplicación, desde principio a fin, hasta después de la entrega de la obra, así como también se rescató información sobre algunas de las experiencias que se han llevado a cabo dentro de Colombia y algunas representativas a nivel mundial.

Con el presente trabajo se buscó establecer y describir a partir de la experiencia, los aspectos favorables y los aspectos no favorables acerca de la aplicación de esta tecnología, y se realizaron unos comentarios que sirvieron de base para tomar la decisión, teniendo en cuenta también aspectos medioambientales, acerca de la tecnología más apropiada a la hora de estabilizar un talud.

Finalmente, tomando en cuenta que la aplicación de cada tecnología es particular de acuerdo a la obra que se quiere intervenir, se mencionaron entonces los taludes que podrían ser aptos, de acuerdo a sus características, para aplicar en ellos la bioingeniería basada en el Vetiver. Revisada y objeto del presente estudio.

Se describen las características botánicas y taxonómicas de la planta, así como también las bondades y los impactos no deseables que genera la siembra de la especie Vetiver.

El documento al final presenta las observaciones, conclusiones y recomendaciones del caso, a tener en cuenta antes de seleccionar la siembra de vetiver como la tecnología apropiada para la estabilización de taludes, y aquellas también a tener en cuenta durante y después de realizado el proceso de la aplicación. Con lo anterior se espera ofrecer los lineamientos necesarios que justifiquen la apropiación o no de esta tecnología a nivel local.

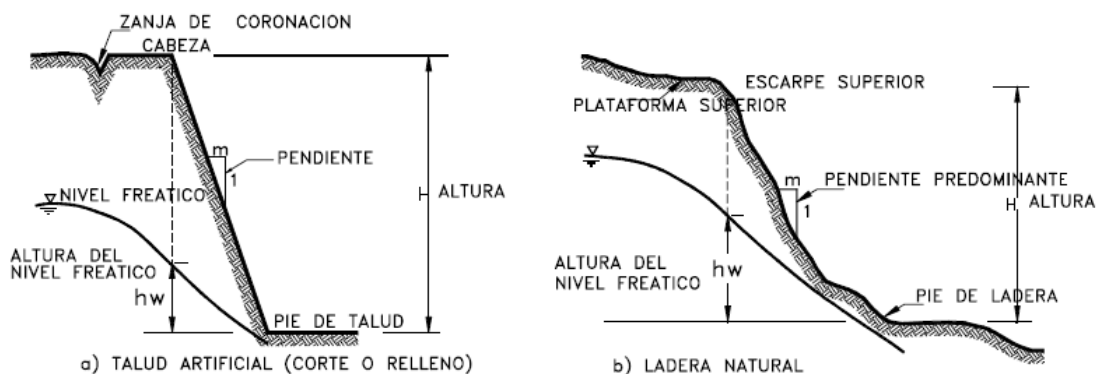
1. CONCEPTOS GENERALES

1.1. TALUDES

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Jaime Suarez, 1989).

La figura 1.1 muestra los diferentes tipos de superficies inclinadas del suelo.

Figura 1: Tipos de taludes.



(Fuente, Jaime Suarez - 1989)

1.2. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE LOS TALUDES

- **Altura**

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

- **Pie**

Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.

- Cabeza o escarpe

Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.

- Altura de nivel freático

Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.

- Pendiente

Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. (Jaime Suarez, 1989)

Para efectos del presente documento, se dará mayor relevancia a la pendiente, la cual es el elemento constitutivo que más importancia tiene a la hora de determinar cual tecnología es la más apropiada para ser aplicada en la estabilización.

1.3. BIOINGENIERÍA Y BIOTECNOLOGÍA

La bioingeniería trata acerca de la aplicación de todos los elementos de la ingeniería para satisfacer necesidades del ser humano y de la protección y conservación del medio ambiente como tal, a partir del uso de elementos bióticos, bien sea elementos de la fauna, la flora o cualquier otro elemento de los reinos de la naturaleza, como es el caso importante de uso que se le ha dado a las bacterias.

Para el caso del presente documento, la bioingeniería comprende el uso exclusivo del elemento biótico vegetación para la estabilización de taludes y el control de la erosión. El estudio dará total importancia al uso específico de la especie vegetal *Vetiveria zizanioides*,

La bioingeniería de suelos es única en el sentido de que las partes de la planta por sí mismas o sea las raíces y el follaje funcionan como los elementos estructurales mecánicos para la protección del talud. Los elementos vivos se colocan en el talud en diversos sistemas de arreglos geométricos en tal forma que ellos actúan como refuerzo, como drenaje o como barreras para los sedimentos. En el análisis de la bioingeniería se requiere tener en cuenta no solamente la ciencia de las plantas sino el comportamiento de los taludes y la mecánica de la erosión (Gray y Sotir, 1996).

A diferencia de la Bioingeniería, donde se da uso exclusivamente de los elementos bióticos para las respectivas aplicaciones, la Biotecnología se refiere a las técnicas donde los elementos bióticos, para el presente caso, la vegetación, es combinada con aplicaciones técnicas de elementos abióticos, tales como las estructuras inertes de ingeniería, caso tal de los gaviones, muros criba, etc., en los cuales se combinan los efectos benéficos de la vegetación y las otras obras de ingeniería. Ambos elementos biológicos y mecánicos deben funcionar juntos en una forma integrada y complementaria. Para el análisis de los elementos estructurales se utilizan los principios de la estática y la mecánica y para la parte de la vegetación se deben tener en cuenta los principios de la ciencia de las plantas y la horticultura o la botánica en general. El sistema biotécnico requiere que todas esas disciplinas se integren (Jaime Suarez, 1989).

1.4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Factores naturales y antrópicos han causado impactos en el suelo, los suelos por acción misma de la gravedad, movimientos traslacionales y rotacionales del planeta, movimientos en las tectónicas, repentinas erupciones de magma, meteorización del suelo y lluvias intensas traducidas en saturación del terreno y erosión son esencialmente las causas que hacen que una porción de tierra inclinada o talud presente sus movimientos, que en adelante en el texto se denominaran deslizamientos.

Desde el punto de vista de la acción antrópica, los taludes se han formado a partir de obras de alteración geomorfológica de la tierra para la construcción de vías, puentes, edificaciones en general, represas, etc. Estos taludes en la mayoría de situaciones son conformados bajo condiciones en las cuales se pierden características portantes y de cohesión naturales del suelo, características que fueron ganadas por el talud original o natural con el paso de muchos años y a través de las condiciones climáticas que lo forjaron.

Los taludes también son formados a partir de la transformación total del relieve del terreno, principalmente y como ejemplo se tienen las construcciones de vías en zonas de montaña, donde es necesario hacer cortes a la montaña como tal. Como resultado de lo anterior se tienen taludes por acción antrópica que por cuestiones de diseño vial y paisajístico, ellos deben tener ciertas características geométricas, y en adición, deben presentar también condiciones de resistencia, durabilidad y resistencia al deslizamiento, situaciones que pueden combinarse y proveerse su solución mediante la aplicación de técnicas de bioingeniería y biotecnología.

El diseño de estabilización de taludes, utilizando bioingeniería requiere tener en cuenta factores hidrológicos, hidráulicos, topográficos, geomorfológicos y geológicos, geotécnicos, vegetativos y de construcción (Jaime Suarez, 1989).

1.5. PLANEACIÓN DE PROYECTOS DE ESTABILIZACIÓN CON BIOINGENIERÍA

Para la planeación de los proyectos McCullah (2001), recomienda los siguientes pasos:

1. Identifique y forme un equipo interdisciplinario de expertos en control de erosión. Generalmente se requiere un ingeniero civil, geólogo, botánico, biólogo y un experto en control de erosión.
2. Identifique los objetivos que se desee obtener con el proyecto. Los objetivos típicos incluyen prevención de la erosión, estabilización de los taludes, protección de los canales de las corrientes, mejora de la estética y del hábitat de fauna y flora. Es muy importante determinar las causas y mecanismos del problema de erosión que se desea controlar y haber realizado un diagnóstico acertado antes de diseñar la solución.
3. Desarrolle una lista de especies vegetales con base en los objetivos y el análisis preliminar. Para la selección de las especies vegetales se sugieren los siguientes pasos:
 - Identifique las especies vegetales que crecen en las zonas vecinas o en hábitat similares. Tome nota del tipo y densidad de la vegetación existente y de la humedad presente. Busque las áreas de vegetación que crecen más vigorosas que otras, tomando nota de su exposición a la humedad, al sol, etc.
 - Identifique cuáles especies se reproducen por estaca o enramado.
 - Determine si esa vegetación tiene los atributos deseados para el proyecto, raíces, follaje, tolerancia a las inundaciones y a las sequías, hábitos de crecimiento, etc.
 - Investigue si hay suficiente material de plantas en los sitios de préstamo de vegetación en los viveros o dentro de una distancia razonable de transporte. Averigüe si los viveros pueden producir la cantidad deseada de plantas.
4. Escoja los métodos de construcción y las técnicas de biotecnología. Para determinar el mejor método, el equipo de trabajo debe resolver los siguientes interrogantes:
 - Se requiere la construcción de estructuras permanentes o una estructura provisional que se desintegre después de establecida la vegetación.
 - Los componentes biotécnicos integrados en las estructuras proveen la protección necesaria.

- Cuáles de las especies erosionadas se integra mejor con la estructura a utilizar.
- Cuál sistema provee una mejor estabilidad a largo plazo.

1.6. LA BIOINGENIERÍA EN LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

La bioingeniería de suelos usa la materia viva (vegetación) para las obras de ingeniería, principalmente las de estabilización. La ingeniería Biotecnica usa la materia viva acompañada de elementos inertes, prefabricados, mecánicos interaccionando con la materia viva.

La bioingeniería de suelos, aplicada en el control de erosión y estabilidad de taludes y riberas de corrientes utiliza principalmente como elementos estructurantes las raíces y las hojas de las plantas.

1.6.1. Erodabilidad Error! Marcador no definido.

La susceptibilidad de un suelo a presentar erosiones se conoce por el nombre de erodabilidad y esta depende de su granulometría y de los índices de plasticidad. La erodabilidad en el suelo varía de la siguiente manera:

- Es baja en Gravas bien gradadas.
- Es alta en limos uniformes y arenas finas.
- Decrece a medida que crecen los porcentajes de arcilla y contenidos orgánicos.
- Decrece en suelos con baja relación de vacíos y alto contenido de humedad.
- Se incrementa con incrementos del contenido de sodio (Na) en los suelos y decrece con el intercambio iónico del agua. (Wischmeir et all - 1971).

La Erodabilidad de la superficie es el principal factor de suelo a controlar con el uso de la bioingeniería, la forma en la cual se controla usando materia vegetal ha sido con la siembra de especies en la superficie del talud que presentan tales características que ayudan a controlar la erosión, el grado de humedad del suelo y dan una mayor cohesión al talud por el entramado de las raíces.

1.6.2. Factores de la vegetación en suelos.

Los principales controles que se manifiestan con el uso de vegetación en un talud son (Jaime Suarez, 2001):

- Intercepta la lluvia
- Aumenta la capacidad de infiltración
- Extrae la humedad del suelo
- Grietas por desecación
- Raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia al cortante
- Anclan el suelo superficial a mantos más profundos
- Aumentan el peso sobre el talud
- Transmiten al suelo fuerza del viento
- Retienen las partículas del suelo, disminuyendo susceptibilidad a la erosión.

Si el suelo estuviese desprovisto de material vegetal a causa de deforestación, este se afectaría principalmente porque (Jaime Suarez, 2001):

- Disminuyen las tensiones capilares de la humedad superficial
- Se elimina el factor de refuerzo de las raíces
- Se facilita la infiltración masiva de agua

Varios autores han realizado importantes observaciones en el uso de bioingeniería en la estabilidad de taludes, entre los cuales se pueden encontrar (Jaime Suarez, 2001):

- Gray (1974) observa que las raíces aumentan la resistencia al cortante por incremento de la cohesión aparente del suelo, reportando incrementos de resistencia hasta de 3 a 4 veces.
- Yagi y otros (1994) encontraron en pruebas de laboratorio que no existe prácticamente ninguna variación en el ángulo de fricción y la cohesión por la presencia de raíces o el aumento del porcentaje volumétrico de raíces en el suelo.
- Gray y Ohashi (1983) indicaron que la orientación de las raíces en un ángulo de 60 grados con la superficie de cortante, aumenta a un máximo la resistencia

al cortante equivalente a la dirección principal de tensión, lo cual se entiende como una resistencia generada por la tensión en las raíces.

- La resistencia a la tensión de las raíces puede ser hasta el 30% de la del acero según Schiechl (1980) y pueden extenderse varios metros por debajo de la superficie del talud.
- La resistencia promedio a la tensión de las raíces depende de las características y estructura de la planta y puede variar desde 1300 psi hasta 7000 psi (Burroughs y Thomas, 1976; Gray, 1978 y Turmanina, 1965).

A continuación en la tabla 1, se muestra un comparativo entre tipos de plantas que se usan en la revegetalización de taludes, riberas y suelos en general.

Tabla 1: Ventajas y desventajas de tipos de plantas en revegetalización de taludes.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedades para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces en ocasiones, poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles de establecer en las riberas de ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Arbustos	Variedades para escoger. Existen especies que se reproducen por estaca. Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer.
Árboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.

(Fuente, Gray y Sotir - 1996)

1.7. ANTECEDENTES EN LA APLICACIÓN DE BIOINGENIERÍA PARA ESTABILIZAR MOVIMIENTO DE TALUDES

1.7.1. Casos Mundiales

Como ejemplo en la literatura universal se encuentra el caso específico de estabilización de taludes utilizando revegetalización. El deslizamiento de Cucaracha en el corte Gaillard en el Canal de Panamá. El deslizamiento histórico de Cucaracha se reactivó en 1986 bloqueando prácticamente el canal (Berman, 1991).

Como parte de un programa combinado de estabilización se plantaron 60.000 árboles de rápido crecimiento, tales como acacias y gmelinas (Rivera, 1991). Generalmente el proceso de revegetalización de taludes se ha concentrado en el uso de pastos olvidándose de los arbustos, hierbas y árboles. Como regla general, nunca debe plantarse una sola especie, sino una sucesión de variedades en tal forma que se recupere el sistema vegetativo original. Se debe considerar además el manejo apropiado de las técnicas de vegetación para ayudar en el proceso natural de sucesión.

2. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

2.1. TALUDES Y LADERAS

En el capítulo anterior se vio que una porción de tierra que presenta algún tipo de pendiente o cambio de altura significativos se denomina Talud o Ladera, Talud cuando se origina por factores antrópicos y ladera cuando su origen se da por factores naturales.

Los taludes y laderas, durante su formación y después de ésta se ven afectados por diversos factores tanto de carácter antrópicos como naturales, estos factores afectan la estabilidad del talud a tal punto que cuando se vence la resistencia a dicha estabilidad se presentan los deslizamientos, que son movimientos de la tierra en sentido de arriba hacia abajo sobre superficies de falla e incluso volcamientos.

2.1.1. Factores que influyen en formación de taludes y laderas

Las laderas se generan naturalmente principalmente por factores como el movimiento y choques de placas tectónicas, movimiento de masas de tierra que se depositan unas sobre otras por efectos de erosión del viento y del agua como los son el aluvión y el coluvión, erupciones volcánicas, corrientes de aguas y de vientos, entre otros, que poco a poco van interactuando unos con otros y dan como resultado el relieve topográfico de la tierra.

La morfología de la tierra se separa entonces en sus diversas formas, que van desde llanos y valles, hasta las más altas montañas, pasando por todos los componentes del relieve natural. Todos estos elementos, llamados laderas, al ser intervenidos por el hombre, se denominan como taludes. Los taludes entonces se forman por las obras que el hombre realiza para su beneficio, entre las cuales comúnmente se encuentran las vías, los túneles, los puentes y demás obras de infraestructura de transportes, donde mayormente se intervienen las laderas haciendo cortes a lo largo de toda la trayectoria de la obra, convirtiéndose así en los constituyentes más importantes de los taludes.

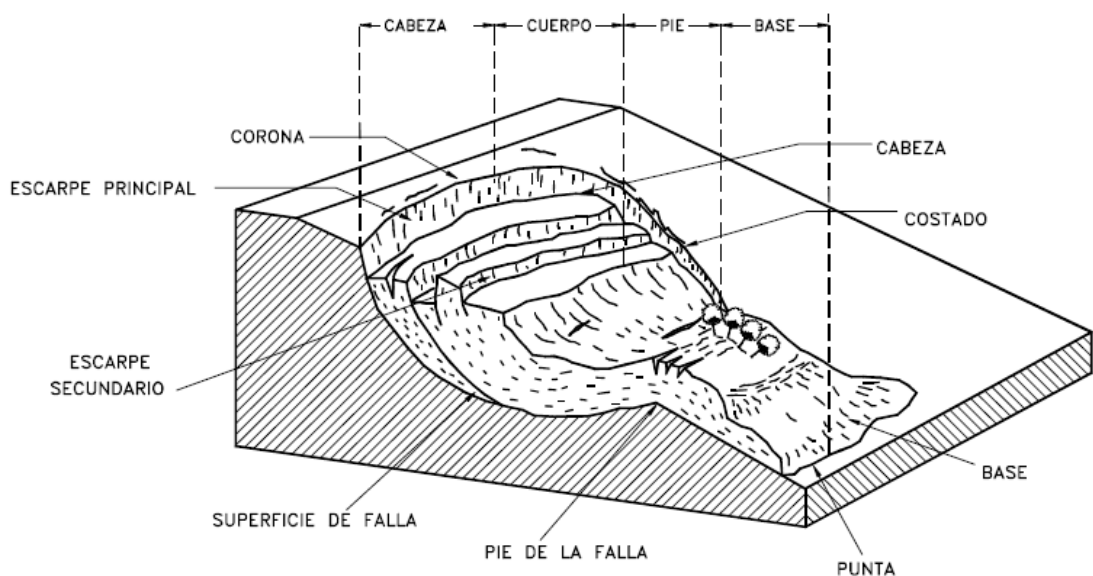
Los taludes, después de su formación, siguen siendo afectados por factores como las precipitaciones con su procesos de saturación y erosión, los flujos de

corrientes de agua y aire, la acción química de los componentes propios del suelo, la vegetación y la fauna, movimientos vibracionales, entre otros, que acompañados con los movimientos traslacionales y rotacionales y de las fuerzas de atracción gravitacional del planeta, terminan convirtiéndose en deslizamientos de diferente índole que afectan tanto la naturaleza como las obras y la vida de los seres humanos.

2.1.2. Elementos de un deslizamiento

A continuación, en la figura 2 se da una breve descripción de los elementos de un deslizamiento:

Figura 2 Nomenclatura de un deslizamiento.



(Fuente, Jaime Suarez - 1989)

- **Escarpe principal**

Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.

- **Escarpe secundario**
Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
- **Cabeza**
Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- **Cima**
El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- **Corona**
El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- **Superficie de falla**
Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.
- **Pie de la superficie de falla**
La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- **Base**
El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- **Punta o uña**
El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- **Costado o flanco**
Un lado (perfil lateral) del movimiento.
- **Superficie original del terreno**
La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- **Derecha e izquierda**
Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

Los deslizamientos son entonces el resultado de los procesos de desestabilización de un talud o ladera.

2.2. PROCESOS DE DESESTABILIZACIÓN DE TALUDES

Se deben considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación y estudio de los movimientos de tierra:

- Etapa de deterioro o antes de la falla donde el suelo es esencialmente intacto.
- Etapa de falla caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- La etapa post-falla que incluye los movimientos de la masa involucrada en un deslizamiento desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.
- La etapa de posible reactivación en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.

Para la construcción de una vía o de una obra de infraestructura es necesario hacer cortes a las laderas, cuando esto se hace, ocurre una relajación de esfuerzos y una posterior exposición a los factores ambientales, rompiéndose la posición de equilibrio químico, ambiental y físico.

Estos factores conllevan a la destrucción de la superficie que puede conducir a caídos de roca o colapso del talud. De acuerdo a las etapas, estos procesos están comprendidos en la etapa de deterioro anterior a la falla.

2.3. DESLIZAMIENTOS Y MOVIMIENTOS EN MASA

La clasificación de los modos comunes de deterioro fue propuesta por Nicholson y Hencher (1997) (Jaime Suarez, 1989).

- Caída de granos, van desprendiéndose granos del suelo.
- Descascaramiento, al contrario de lo anterior se van desprendiendo cascarras de material.
- Formación, inclinación y caída de losas de roca, van desprendiéndose losas de roca.
- Caídos de bloques, caída de bloques afectando la estabilidad del talud.
- Desmoronamiento del talud, caídas de elementos en forma continua.
- Caídos de roca, caída de la roca entera.

- Lavados superficiales y erosión, por acción de flujos de agua y viento (entre estos están la erosión laminar, en surcos, cárcavas, interna y por afloramientos)
- Flujo de detritos, combinación de elementos de suelo con agua.
- Colapso, movimiento de grandes bloques y taludes negativos.
- Dilución, por efecto de la erosión el suelo se diluye dejando negativos.
- Expansión y contracción, por efecto del agua en suelos expansivos.
- Agrietamiento cosísmico, por acción de efectos de eventos sísmicos.
- Deformaciones por concentración de esfuerzos y fatiga
- Agrietamiento por tensión

Después de la etapa del deterioro, viene la etapa de la falla, que es la aparición del plano de falla, cualquiera que esta sea, que determina el punto por el cual se presentaría el posible desprendimiento de una importante masa de tierra. A continuación se presentan las posibles fallas de un talud.

2.3.1. Tipos de falla de taludes.

Para analizar el problema del talud desde el punto de vista de bioingeniería y el alcance al cual se pueda llegar, entre otros factores, primordialmente se debe establecer el tipo de falla posible del talud, que se caracterizan por la importante cantidad de material que se desprende. Entre estos se encuentran:

Tipos de fallas comunes en los taludes (Varnes, 1978 – Suarez, 1989):

- Caídas (“Falls”): por caída libre, a saltos o rodando.
- Vuelco (“Topple”): o inclinación, rotación del bloque de tierra normalmente por debajo del centro de gravedad.
- Deslizamiento (“Slides”): Desplazamiento de la masa de tierra a lo largo de un plano definido de falla, Rotacionales y traslacionales por el plano.
- Reptación. Sin superficie de falla definida, movimiento lento.
- Esparcimiento lateral: Combinaciones de movimientos. Tipo Spread.
- Flujo (“Flow”): de roca, detritos, de suelo, de lodos,
- Avalanchas: ríos de material desprendido. Movimiento repentino y rápido.

2.4. FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE TALUDES

Los taludes son desestabilizados de acuerdo a diferentes factores que se presentan brevemente a continuación (Jaime Suarez, 1989):

- Susceptibilidad a los deslizamientos por condiciones originales del talud, desde la topografía, geología, características de los materiales y perfiles, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal, etc.
- Factores de deterioro, factores que aparecen antes de la aparición de la falla. Obedecen a circunstancias medioambientales.
- Falla progresiva por expansión o fisuración, deformación al cortante, inclinación, desmoronamiento, etc.
- Descomposición por desecación, reducción de la cohesión, lavado y remoción de los cementantes, disolución, etc.
- Erosión interna o sifonamiento.
- La tectónica y Neotectónica producen esfuerzos e inducen deformaciones, las cuales son muy difíciles de evaluar o medir.
- La erosión genera cambios topográficos que inducen esfuerzos en el talud.
- La sedimentación.
- La lluvia, la cual produce modificaciones en la humedad y presión de poros afectando la resistencia del suelo.
- Las inundaciones, al producir saturación repentina, presiones de poro y erosión.
- Los sismos, los cuales pueden producir fracturación, remoldeo, aumento de presión de poros y consiguiente, disminución en la resistencia del suelo, licuación y generación de fuerzas de tipo dinámico sobre las masas de talud.
- Las erupciones volcánicas, las cuales además del efecto vibratorio, generan cambios en temperatura y la disposición de materiales sobre el talud.
- La expansión de los suelos, etc.
- Procesos antrópicos
 - Las excavaciones o cortes que modifican la topografía original del terreno.
 - Las excavaciones subterráneas (túneles), las cuales afectan la estructura y condiciones de esfuerzos del suelo encima de ellos.
 - Los rellenos o depósitos de materiales sobre el talud, disposición de residuos, etc.
 - La irrigación que facilita la infiltración y los cambios de humedad y presión de poros.
 - Las fugas de agua de las redes de servicios.
 - El mantenimiento inadecuado de sistemas de drenaje y subdrenaje.
 - La deforestación que produce cambios hidrológicos y afecta la resistencia del suelo, al eliminar el refuerzo de las raíces.
 - Las vibraciones artificiales, tránsito de vehículos, vibraciones de maquinaria, detonaciones de explosivos, etc., las cuales generan fuerzas dinámicas y deterioro de la estructura de los materiales.
 - La disminución repentina del nivel de agua como en el caso del desembalse de una presa.

2.5. ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

La estabilización de taludes utiliza diversos métodos, tanto desde el punto de vista del control en la etapa del deterioro, hasta en el control en la etapa de la falla del talud.

Entre numerosos métodos se pueden encontrar las obras de estabilización de taludes con infraestructura de ingeniería, obras de bioingeniería y obras de biotecnología, que básicamente es la combinación de las dos anteriores.

La estabilización de un talud comprende varios factores a tener en cuenta (Suárez, 1989):

1. Determinar el sistema o combinación de sistemas de estabilización más apropiados, teniendo en cuenta todas las circunstancias del talud estudiado.
2. Diseñar en detalle el sistema a emplear, incluyendo planos y especificaciones de diseño.
3. Instrumentación y control durante y después de la estabilización.

Entre las obras que se encuentran en la literatura universal se pueden enumerar las siguientes:

1. Conformación del talud o ladera: Conformación de masas de tierra hasta lograr un punto de equilibrio de fuerzas.
2. Recubrimiento de la superficie: Se garantizan las condiciones de humedad hasta un punto de estabilidad freática y se minimizan las acciones del viento y del agua.
3. Control de agua superficial y subterránea: se abaten los niveles freáticos, evitando el empuje del agua sobre el talud y se controlan los procesos de escorrentía superficial, subsuperficial así como también los procesos de infiltración.
4. Estructuras de contención: Aplicación de fuerzas que contrarrestan las fuerzas que originan el movimiento de la masa de tierra:
 - Muros de contención en tierra armada, Geotextil
 - Muros de contención en concreto
 - Pilotes
 - Anclajes
 - Pantallas Ancladas
 - Gaviones

5. Mejoramiento al suelo: mejoramiento químico de las condiciones intrínsecas del suelo, ángulo de fricción y cohesión.
6. Bioingeniería: Reemplazo y simulación de las anteriores técnicas usando materia vegetal viva
7. Biotecnología: Combinación de todas las anteriores técnicas, enfatizando el uso de materia vegetal viva y materia inerte.

Las técnicas para estabilización de taludes, así como todo proyecto de ingeniería tiene sus características económicas propias que adquieren importancia a la hora de definir cual método de estabilización usar.

Hay técnicas que requieren de una inversión de costos iniciales alta, pero que tienen un comportamiento económico en cuanto a mantenimiento y duración constantes y bajo los cuales son propicios cuando el proyecto es desarrollado por situaciones que requieren de una solución inmediata y por entidades que no prestarían, por cuestiones de administración pública, el adecuado mantenimiento a lo largo de la vida útil del proyecto.

Por otro lado hay técnicas de baja inversión inicial, pero se debe tener en cuenta que requieren de una alta inversión en mantenimiento, tal es el caso de los proyectos que se encuentran localizados dentro de las instalaciones de entidades que cuentan con la capacidad administrativa y técnica de realizar los mantenimientos necesarios a lo largo de la vida útil del proyecto.

Para el caso de las técnicas de bioingeniería, se puede decir que estos proyectos requieren de una moderada inversión inicial pero así también requieren de una moderada inversión a lo largo de la vida útil, debido a que trabaja con materia vegetal viva, la cual requiere de mantenimiento mientras se establece la especie sembrada, se realizan las podas, los cortes y el tratamiento necesario para su mantenimiento en óptimas condiciones de operación. Es por ello que la tendencia en bioingeniería es a usar especies resistentes que requieran de un bajo mantenimiento y sean auto-sustentables a lo largo de la vida útil del proyecto.

2.6. OBRAS DE INFRAESTRUCTURA Y SUS IMPLICACIONES EN EL MEDIO AMBIENTE

Cada vez que el ser humano requiere de la construcción de una obra de infraestructura se impactará el medio ambiente tanto en su relieve como en las condiciones de fauna, flora, e incluso hasta climáticas entre otras.

Para el caso del presente estudio, se dio mayor importancia a las obras de infraestructura que tuvieran alta repercusión sobre la morfología de la tierra, entre las cuales se pueden mencionar, las vías, los canales de conducción de aguas, cortes en el terreno para construcción de caminos, loteos de viviendas y demás, en los que sea necesario construir y estabilizar taludes tanto en la etapa de deterioro como en la etapa de falla del talud.

Las vías impactan fuertemente la morfología del terreno, e incluso las condiciones de drenaje y de flujos internos de agua, debido al hecho que se hacen cortes en el terreno natural, cortes a la ladera donde se liberan esfuerzos de cohesión de años en los que el suelo ha estado consolidándose, presentándose así, entre otros impactos, el redireccionamiento de los flujos de agua superficial, subsuperficial, subterránea dependiendo de la profundidad de la obra, y otros impactos como el desprendimiento de material de suelo, aparición de fallas en la estructura del terreno que conllevan a la aparición de los movimientos de tierra o deslizamientos.

Cuando un talud es construido, el terreno que antes estaba en condiciones naturales de cohesión, comienza a interactuar con otros agentes del medio ambiente como los agentes químicos presentes en el aire, en el agua y en la composición misma del suelo, lo que acelera los procesos de meteorización y descomposición del mismo. También el talud se enfrenta a los procesos de saturación y de erosión generados por las precipitaciones, las corrientes de aire, así como también el desecamiento en épocas de sequía. Por otra parte, no solo se corta la continuidad de los elementos inertes, sino que así también se corta la continuidad de los elementos bióticos, como lo son los bosques, los ecosistemas bióticos fundamentados tanto en los bosques como en los flujos de agua, y por otro lado los caminos migratorios de diversas especies, que al aparecer en medio de una vía sufren por las circunstancias de ser aplastados o arrollados por los vehículos que ahora son parte del paisaje de los alrededores.

3. LA VEGETACIÓN Y SU FUNCIÓN DE CONSERVACIÓN

3.1. EL USO DE LA VEGETACIÓN EN LAS OBRAS DE INGENIERA

Desde tiempos remotos se conoce el uso de la vegetación para controlar la erosión y estabilizar pendientes, con base en experiencias pasadas y métodos empíricos. A partir de los años treinta comienza a resurgir esta práctica del uso de la vegetación de manera más científica y metódica y, en los últimos diez años, ha venido ganando popularidad debido al mayor nivel de conciencia sobre los asuntos ambientales y a la disponibilidad de conocimiento y parámetros que le dieron credibilidad a estas ideas.

La experiencia recogida permitió a ciertas civilizaciones el desarrollo de métodos empíricos en el uso de la vegetación para enfrentar estos problemas. A partir de la tercera década del siglo XX, comienzan a surgir nuevamente este tipo de prácticas de manera más científica y metodológica y, a partir de la última década ha ido ganando terreno en el campo de la ciencia, debido a la mayor preocupación por los asuntos ambientales, y a la mayor disponibilidad de conocimiento al respecto y sus parámetros asociados, otorgando de esta forma mayor credibilidad a estas ideas. (Francisco J. Moscoso, 2003).

Existen registros que datan de tiempos antiguos en que la vegetación, ya fuera viva o muerta, era usada por la gente como un medio para mejorar la estabilidad de pendientes.

Algunos ejemplos de esto son:

- Utilización de la caña alrededor de la gran muralla china.
- Utilización de la caña en los Zigurats de Bagdad.
- Utilización de sauces para la estabilización de diques durante la dinastía Ming.
- Utilización para la estabilización de terraplenes y las riberas de los ríos por los agricultores de la India.” (Hengchaovanich, 1998).

Aunque la utilización de obras de bioingeniería es muy popular, no siempre son efectivas para resolver los problemas de erosión. Las fallas de estructuras de bioingeniería generalmente no han tenido la publicidad que han tenido los éxitos y

existe la tendencia a sobre-estimar la capacidad de la vegetación. (Jaime Suarez, 1989).

El uso de la vegetación en obras de ingeniería civil requiere no solamente conocimientos de ingeniería sino también información relativa a las propiedades de las plantas, su estructura, altura, grosor y rigidez de los tallos, profundidad, densidad y distribución de las raíces, aptitud para el régimen climático del sitio, interacción con el agua y el suelo, resistencia a la sumergencia al pisoteo y a la quema, resistencia a la tensión, etc. No se puede diseñar un sistema de protección vegetal sin la cooperación de un especialista en plantas o por lo menos sin su consejo. Esta cooperación se requiere para seleccionar el sistema de plantas a utilizar y el sistema apropiado de siembra, crecimiento y conservación. (Jaime Suarez, 1989).

En general la utilización de vegetación para estabilización de pendientes dependerá en gran medida de las condiciones climáticas, así por ejemplo los países mediterráneos son menos vulnerables que los tropicales húmedos, puesto que en los últimos, las precipitaciones son intensas y prolongadas, aumentando los riesgos de deslizamientos masivos, inclusive cuando las pendientes hayan sido bien diseñadas construidas con factores de seguridad apropiados. Los campos de aplicación de las técnicas de bioingeniería son muy variados, y con ellas se obtienen resultados altamente satisfactorios. (Francisco J. Moscoso, 2003).

En la siguiente tabla 2, se muestra las diversas actividades antrópicas que afectan en medio natural de cualquier manera.

Tabla 2: Aplicaciones de la vegetación en Ingeniería.

Campos de aplicación		Restauración en Minería	Carreretas y ferrocarriles	Construcciones	Rellenos Sanitarios	Aeropuertos	Canales	Drenajes de Zonas Húmedas	Embalses	Costas y Protección de orillas	Edificios	Recreo	Transporte por Tuberías
		Funciones											
Estabilidad de pendientes	Cortes y Terraplenes												
	Taludes Rocosos												
Control de erosion	Esorrentía Superficial												
	Cárcavas y Barrancos												
Control de erosion	Canales de Caudal continuo												
	Canales de Caudal discontinuo												
	Embalses												
Control Erosión Eólica													
Pantallas vegetales	Cortavientos												
	Antiruidos												
Protección de Superficies y pisoteo													
Protección de cuencas hidrologicas													

(Fuente, López – 2000)

3.2. EFECTOS FÍSICOS DE LA VEGETACIÓN

La vegetación es la interfase de interacción entre el suelo y la atmósfera, que se manifiesta a través de una serie de efectos hidrológicos y mecánicos, tal como se muestra en la figura 3.1.

Por lo tanto la vegetación puede jugar un papel importante en el control de procesos erosivos y como elemento de protección y conservación del suelo, por la influencia que ejerce sobre él, tanto en la superficie, protegiendo y sosteniendo el suelo, como en profundidad, aumentando la resistencia y la cohesión de los terrenos. Además, tiene una influencia significativa en el nivel de humedad y en su capacidad de retención de agua. (Francisco J. Moscoso, 2003).

La influencia de la vegetación en las condiciones de los taludes puede definirse de dos maneras, p. ej. Influencias hidrológicas y mecánicas:

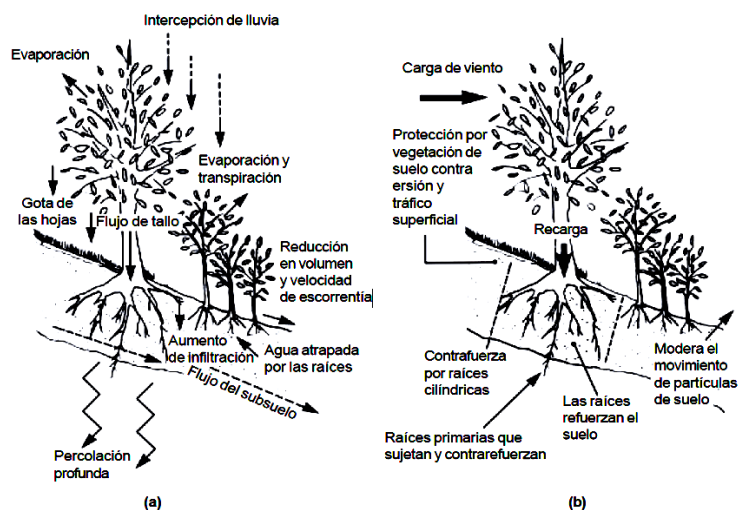
3.2.1. Influencia Hidrológica

La vegetación influye sobre la velocidad y el volumen del flujo del agua hacia y sobre una superficie de talud mediante los procesos de intercepción, flujo radicular, evaporación de gotas en las hojas, evapotranspiración e infiltración;

3.2.2. Influencia Mecánica

La vegetación aumenta la fortaleza y competencia del suelo en el cual está creciendo y por lo tanto contribuye a su estabilidad.

Figura 3: Efectos físicos de la vegetación (a) efectos hidrológicos; (b) efectos mecánicos.



(Fuente, Coppin y Richards - 1990)

La bioingeniería utiliza los efectos mecánicos e hidrológicos benéficos de una comunidad de plantas para cumplir una función de ingeniería. La vegetación puede aumentar la resistencia del suelo al agrietamiento, proteger de la erosión laminar una superficie de suelo expuesta y atrapar las partículas de suelo que se deslizan por el talud. Las habilidades de la bioingeniería se encuentran en la movilización de los efectos benéficos de la vegetación en cualquier situación. La vegetación que es seleccionada para las condiciones particulares del lugar, que se establece bien y se siembra con suficiente densidad, puede proporcionar una eficaz protección a la superficie de un talud.

Las diferentes partes de una planta que cumplen funciones específicas desde el punto de manejo geotécnico se muestran a continuación en la tabla 3.2.

Tabla 3: Componentes de la planta y sus funciones.

Parte de la planta	Función
Raíz	Anclaje, absorción, conducción y acumulación de líquidos
Tallo	Soporte, conducción y producción de nuevos tejidos
Hojas	Fotosíntesis, transpiración

(Fuente, Suárez - 1989)

3.2.3. Efectos mecánicos

El efecto mecánico generado a partir de la presencia de vegetación está compuesto por una serie de fenómenos físicos involucrados que, a partir de las características propias del tipo de vegetación y suelo, interactúan otorgando un efecto total de variación en la resistencia al deslizamiento.

Las raíces cumplen una función primordial en los efectos mecánicos de las plantas, sobre los suelos. Estos efectos están relacionados con la estructura, la relación área/raíz, la extensión lateral, la resistencia y profundidad de las raíces.

E igualmente cumplen una función muy importante de absorción. Grandes cantidades de agua son absorbidas por las plantas junto con minerales y productos que la planta requiere para su alimentación. Los principales factores que determinan el desarrollo de las raíces son:

1. Disponibilidad de nutrientes en el suelo.
2. Disponibilidad de oxígeno.
3. Contenido de Humedad.
4. Succión o presión osmótica.
5. Temperatura del suelo.
6. Niveles de toxinas y elementos patogénicos.
7. Sistema de poros.

Desde el punto de vista de la estructura de las raíces, una alta densidad o concentración de raíces fibrosas de pequeño diámetro pueden ser más efectivas para control de erosión superficial que unas pocas raíces de gran diámetro y tamaño, como son las raíces pivotantes.

La mejor protección contra la erosión se logra con una malla densa de raíces finas que alcance profundidades de al menos 50 centímetros. Un incremento en el porcentaje de área ocupado por raíces finas, produce una disminución exponencial en la erosión (Jaime Suárez, 1989)

La cantidad de raíces generalmente disminuye con la profundidad. El término relación de área de las raíces, se refiere a la fracción del área total de superficie a una determinada profundidad que está ocupada por raíces. Este término es utilizado para caracterizar un sistema determinado de cobertura vegetal. Otra forma de analizar la densidad radicular es mediante los estudios de "Biomasa radicular". El sistema consiste en arrancar plantas enteras con la totalidad de sus raíces las cuales se pesan. (Jaime Suárez, 1989)

La extensión lateral de las raíces, depende de la especie vegetal y el tipo de suelo; en algunos casos las raíces se extienden varias veces el ancho del follaje, situación que se presenta en suelos arenosos y mixtos, que en suelos pesados.

Los factores que más afectan la resistencia de las raíces son su diámetro, orientación y ambiente de suelo. La resistencia de las raíces depende de la densidad del sistema radicular, la resistencia propiamente dicha de las raíces, su longitud, diámetro, rugosidad superficial, dirección de las raíces y dirección de los esfuerzos principales. (Jaime Suárez, 1989)

La profundidad de las raíces también tiene relación con la especie y el tipo de suelo, siendo en suelos mixtos, donde las raíces alcanzan su mayor distancia vertical.

La profundidad de refuerzo de las raíces de los pastos es de solo 30 centímetros comúnmente, pero algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos. Las raíces de los pastos pueden alcanzar profundidades de 0,5 a 0,75 metros y en casos excepcionales hasta 1,5 metros. Las raíces de árboles y arbustos generalmente profundizan uno a tres metros con una densidad de raíces muy alta en el primer metro, la cual disminuye con la profundidad.

Las raíces retienen las partículas de suelo y lo permeabilizan lo que resulta en:

1. Moderar el movimiento del suelo, reduciendo la Erodabilidad
2. Un aumento de su resistencia al corte a través de una matriz de fibras flexibles.

3. Red de fibras superficiales que crea un efecto de estera (petate) flexible, que controla el estrato subyacente.

Las raíces penetran el estrato profundo lo que brinda:

1. Anclaje en el estrato firme, fijando el manto del suelo a un subsuelo o manto rocoso estable.
2. Apoyo para el manto de suelo ladera arriba a través de la contra fuerza y barrera que producen las raíces.

Árboles altos, de manera que:

1. El peso puede sobrecargar el talud, aumentando los componentes de fuerza normales y talud abajo.
2. Al estar expuesto al viento las fuerzas dinámicas se transmiten al suelo.

Los tallos y las hojas cubren la superficie del suelo, de manera que:

1. Se absorbe el impacto del tráfico, lo que protege la superficie del suelo de daños.
2. El follaje se aplana en flujos de alta velocidad, cubre la superficie del suelo y brinda protección contra flujos erosivos.

3.2.3. Funciones de la vegetación

La vegetación desempeña seis funciones principales que contribuyen a proteger un talud. Estas funciones están vinculadas a las características de las plantas que se requieren para realizar la función y a las especies idóneas disponibles.

- Atrapa el material erosionado que baja por el talud. Esta función la realizan los tallos de la vegetación. El movimiento puede ocurrir producto de la gravedad o con la ayuda del agua.
- Protege el talud contra la erosión superficial producto de la escorrentía y del salpique de las gotas de lluvia. Para ser eficaz se requiere una cobertura continua de vegetación baja. Las plantas de porte alto por si solas no protegen el talud ya que la velocidad terminal de las gotas de lluvia ocurre a unos dos metros aproximadamente.
- Apoya una masa de suelo por la contra fuerza y barrera que producen las raíces. Esto se puede lograr con vegetación grande y pesada, como árboles, en la base del talud o a micro escala con una densa red de raíces de pasto que hacen contra fuerza a pequeñas cantidades de suelo.

- Refuerza el suelo por la presencia de una red de raíces que incrementa la resistencia del suelo al fraccionamiento. El grado de reforzamiento eficaz depende de la forma de las raíces y del tipo de suelo.
- Drena el exceso de agua del talud. La configuración de la plantación de la vegetación puede mejorar el drenaje del exceso de agua del talud, evitando la saturación y la caída repentina del material. La vegetación también puede ayudar a reducir la presión capilar dentro del talud.
- Mejora el entorno local, en particular el suelo y el micro clima. Esto promueve el crecimiento de otra vegetación ya sea de manera natural o mediante el manejo.

Además de la principal función de ingeniería de la planta (véase tabla 3.2), estas deben:

- Tener semilla o material vegetativo disponible para la siembra en el área en cantidades suficientes.
- Ser fácil de propagar en las grandes cantidades que se requieren para obras extensas.
- Tolerar sitios con deficiencia de nutrientes que a menudo están sujetos a estrés de agua.
- Ser robustas y capaces de recuperarse de continuos movimientos en el talud o de aterramiento por despojos de erosión.
- Tener pocas probabilidades de convertirse en maleza invasora.
- Requerir poco mantenimiento después de sembradas.

3.2.4. Limitaciones de la protección vegetal

El establecimiento exitoso de vegetación en un talud está determinado por muchos factores tales como: época de siembra, pendiente del talud, localización, y composición de los materiales del talud. Las épocas ideales de plantación son las semanas anteriores a la temporada de lluvias, se puede realizar el establecimiento en épocas secas disponiendo de un programa adecuado de riego.

La pendiente de los taludes tiene un efecto importante en el esfuerzo requerido para establecer la cobertura vegetal. Para taludes de pendiente alta se requiere colocar elementos de anclaje para los pastos y bermas para los árboles. En taludes de pendiente fuerte se aconseja no sembrar árboles, sino arbustos para disminuir las fuerzas del viento sobre ellos.

Si los materiales son muy duros se puede requerir la excavación de cajas profundas para la siembra de cada arbusto y deben utilizarse cantidades importantes de suelo orgánico o fertilizantes.

Con referencia a la localización del talud, los taludes que reciben la exposición directa del sol de la tarde presentan mayores dificultades para la vegetación, que los que reciben el sol de la mañana o poseen condiciones de sombra relativa.

Deben analizarse, además, los factores relacionados con la presencia del hombre: Pisoteo, quemas, basuras, humo de los vehículos, etc. (Jaime Suárez 1989).

3.3. EFECTOS HIDROLÓGICOS DE LA VEGETACIÓN

Los procesos de erosión hídrica están estrechamente relacionados con las rutas que sigue el agua en su paso a través de la cobertura vegetal y su movimiento sobre la superficie del suelo. Su fundamento descansa, por tanto, en el ciclo hidrológico. Durante una tormenta, parte del agua cae directamente sobre el suelo, bien porque no hay vegetación, o bien porque pasa a través de los huecos de la cubierta vegetal. Esta fracción de la lluvia se denomina precipitación directa. Parte de la lluvia es interceptada por la cubierta vegetal, desde donde vuelve a la atmósfera por evaporación, o llega al suelo goteada por las hojas, a lo que se llama drenaje foliar, o fluye por los tallos hacia abajo.

La precipitación directa y el drenaje foliar son los responsables de la erosión por salpicadura. La lluvia que llega al suelo puede almacenarse en pequeñas depresiones o bien infiltrarse en el suelo contribuyendo a su contenido de humedad o, por percolación, a recargar los acuíferos. Cuando el suelo es incapaz de almacenar más agua, el exceso se desplaza lateralmente por el interior del suelo y a favor de la pendiente, como flujo sub-superficial o contribuye a la escorrentía superficial provocando erosión en forma de regueros y cárcavas.

La velocidad con que el agua pasa al interior del suelo se conoce como velocidad de infiltración y es la que ejerce el control más importante sobre la generación de escorrentía superficial. El agua que se mueve en el interior del suelo por la gravedad es fijada y retenida por las fuerzas capilares formando una delgada película alrededor de las partículas que componen el suelo. Durante una tormenta, se llenan de agua los espacios entre dichas partículas, disminuyendo las fuerzas capilares de manera tal que la velocidad de infiltración comienza alta al iniciarse la

tormenta, y disminuye hasta el valor representado por la máxima velocidad estabilizada a la que el agua puede pasar a través del suelo..”, Urbano, 1997.

3.3.1. Intercepción

La cubierta vegetal intercepta y retiene una proporción variable del volumen de precipitación recibida. Parte de la precipitación interceptada se almacena en las hojas y tallos, desde donde regresa a la atmósfera por evaporación. El resto de la intercepción, denominada drenaje foliar o precipitación temporalmente interceptada, pasa al suelo *escurriendo* por los tallos, ramas y troncos, o *goteando* desde las hojas.

Del fenómeno de intercepción se derivan entonces importantes consecuencias para la conservación y protección del suelo y por tanto también de los taludes.

- Reducción del volumen de precipitación que alcanza la superficie del terreno y, por lo tanto, la cantidad de agua capaz de producir remoción y movilización del suelo.
- Retraso de la llegada de la lluvia al suelo, disminuyendo la intensidad de Precipitación.
- Evita el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo, disipando la energía erosiva al frenar su caída.

La cantidad de agua interceptada varía según la cantidad de cubierta vegetal y las características de las precipitaciones como la cantidad, intensidad y duración.

Otro factor que interviene en la intercepción, es la intensidad de las lluvias. Es así como con intensidad moderada el volumen de agua interceptada puede alcanzar el 100% de la precipitación recibida; mientras que con aguaceros intensos no suele superarse el 25%.” López, 2000.

Según Gregory y Walling (1973), (Jaime Suárez, 1989) dependiendo de la intensidad de la lluvia y del cubrimiento y tipo de vegetación en un bosque tropical, puede interceptarse hasta un 60% del total de la lluvia anual.

Parte de la lluvia interceptada es retenida y evaporada y parte alcanza finalmente, la tierra por goteo o por flujo sobre las hojas y troncos. Es importante determinar el

tiempo entre la lluvia y el goteo para analizar el efecto hidrológico de cada tipo de vegetación. La tabla 4 muestra porcentajes de interceptación para diferentes tipos de vegetación.

Tabla 4: Porcentaje de interceptación sobre la Precipitación total anual.

Tipo de vegetación	Interceptación (%)	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
Bosque		
Taiga	10	15
Templado caducifolio	15	25
Templado coníferas	25	35
Tropical	25	35
Pastizales	25	40
Maíz	25	30
Cereales	20	25

(Fuente, Mataix - 2000)

3.3.2. Infiltración

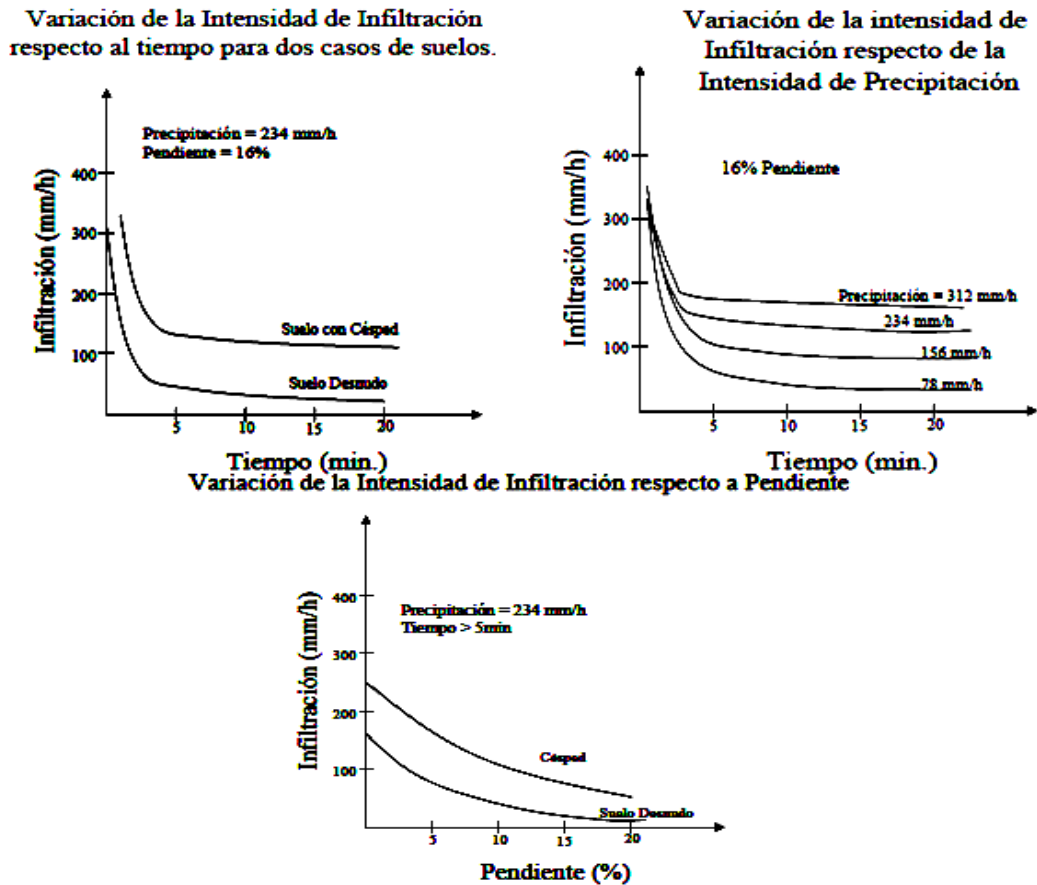
La tasa de infiltración o permeabilidad, por percepción, indudablemente aumenta en suelos provistos de vegetación.

El incremento en la infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua debida a la vegetación determina que, bajo las mismas condiciones edáficas, de precipitación y de pendiente, los volúmenes de escorrentía producidos en un evento de precipitación sean menores en suelos vegetados que en suelos desnudos. Además de retrasar el momento de aparición de escorrentía.

La consecuencia inmediata de lo anterior es que, a mayor infiltración, menor será el número de eventos erosivos al año, ya que se requiere de precipitaciones mayores para que se produzca un incremento de la escorrentía.

La acción de la cubierta vegetal que determina estos efectos se resumen en los siguientes gráficos de experiencias realizadas por López, 2000.

Figura 4: Variación de la intensidad de infiltración respecto a pendiente, vegetación y Precipitación.



(Fuente, López - 2000)

En la figura 4 se ilustra el comportamiento de dos tipos de suelos, con diferentes coberturas, mostrando que en un suelo con césped la infiltración es mayor que en un suelo desnudo, para una misma precipitación en un periodo de tiempo igual.

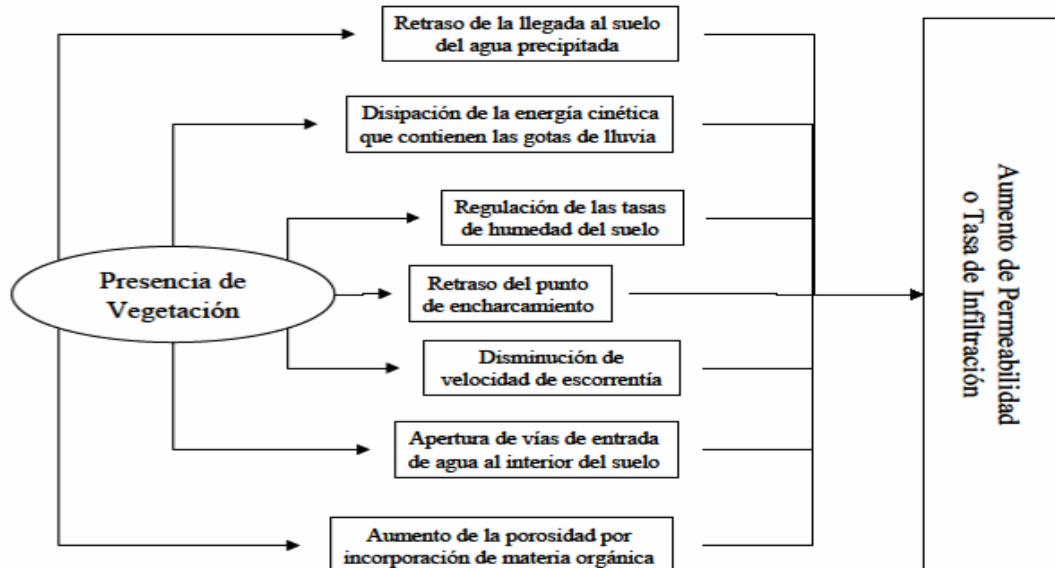
En general, si la intensidad de la lluvia es menor a la capacidad de infiltración del suelo, no se produce escorrentía superficial y la velocidad de infiltración es igual a la intensidad de la lluvia. Si esta es superior a la capacidad de infiltración, la velocidad de infiltración iguala a la capacidad de infiltración y el excedente forma escorrentía superficial. Lo anterior se cumple en su generalidad, pero hay casos en que la relación entre capacidad de infiltración e intensidad de precipitación no es tan clara.

Cuando el contenido de humedad está por debajo del valor de la capacidad retención de agua, la presión del agua en los poros es menor que la presión atmosférica y el agua queda retenida en los capilares por fuerzas de tensión o succión. Cuando se alcanza la capacidad limitante, todos los poros del suelo están llenos de agua, y la presión en ellos iguala a la presión atmosférica, la tensión disminuye a cero y la superficie se encharca. (Francisco J. Moscoso, 2003).

Esto explica porque en suelos arenosos que tienen bajos niveles de almacenamiento capilar producen escorrentía muy rápidamente, aunque su capacidad de infiltración no haya sido superada por la intensidad de precipitación.

En la siguiente figura 5, se muestran los efectos de la vegetación en la infiltración.

Figura 5: Efectos de la vegetación sobre la Infiltración.



(Fuente, Francisco J. Moscoso - 2003)

3.3.3. Evapotranspiración (EVT)

Este concepto hace referencia al conjunto de pérdidas de agua en forma de vapor por concepto de evaporación de la lluvia interceptada y transpiración de las plantas.

Su efecto es una disminución de la humedad en el suelo. Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo, tiene un determinado potencial de evapotranspiración y se obtiene generalmente, una humedad de equilibrio dependiendo de la disponibilidad de agua lluvia y nivel freático.

La vaporización tiene lugar en un espacio que se extiende desde las capas superficiales del suelo hasta la altura extrema alcanzada por la vegetación, denominada superficie evaporante.

Los procesos mencionados, evaporación y transpiración, se influyen mutuamente, por lo que, para poder medir la pérdida de agua sobre superficies vegetadas, es necesario recurrir a este concepto, que suele expresarse en m^3/ha , mm de altura de agua, o l/m^2 .

La EVT depende de los siguientes factores (al igual que la evaporación):

- Energía disponible para la vaporización del agua. Radiación solar.
- Déficit de saturación de la atmósfera o déficit hidrométrico.
- Temperatura del aire
- Velocidad y turbulencia del viento
- Naturaleza y estado de la superficie evaporante
- Periodos críticos

Junto a los efectos benéficos, la EVT también puede provocar efectos adversos. Es así como en ciertos suelos la extracción prolongada de agua por las raíces puede conducir a la desecación y agrietamiento del suelo. Una vez formadas estas grietas, la permeabilidad y la capacidad de infiltración del suelo, se incrementan en forma permanente respecto a sus condiciones originales y con ello aumenta el riesgo de deslizamiento en las capas superficiales. (Mataix 2000)

Diferentes autores mostraron que en las plantas de vetiver ocurre una importante cantidad de evapotranspiración. Sin embargo, se necesita llevar a cabo investigaciones adicionales para recopilar mas información y dar mayor sustento. Debido a su masiva y profunda red radicular, se anticipó que el vetiver sería capaz de abatir la humedad del suelo y reducir, de esta forma, la presión del agua en los poros; en consecuencia, puede incrementar la succión en condiciones de saturación parcial. Desde el punto de vista geotécnico, esta situación tendría efectos beneficios en la estabilidad de las pendientes al incrementar el reforzamiento mecánico provisto por las raíces.

En investigaciones realizadas en Australia sobre la competencia por la humedad del suelo entre setos vivos de vetiver y sorgo, se descubrió que efectivamente existía una competencia, en la que se vieron afectados los cultivos adyacentes al vetiver. Sin embargo, en general, permaneció intacta la función del vetiver en la conservación del agua (mediante la infiltración) y del suelo (por la retención de sedimentos). Esto obedece a que la inclinación en los terrenos agrícolas es normalmente leve y pocas veces excede el 15%, en contraposición con las pronunciadas gradientes de las carreteras. En consecuencia, la distancia entre surcos entre el intervalo vertical (IV) es bastante separada. Por esto, los cultivos en los surcos internos alejados de los setos vivos de vetiver, no sufren la competencia e incluso pueden obtener humedad adicional de la infiltración y retención de aguas escurridas.

Por otro lado, en las construcciones civiles, las pendientes pueden variar de 30 a 60% y del 60 al 180%, por lo que la distancia entre los setos de vetiver para un intervalo vertical de 1,0 m es bastante reducida. Por consiguiente, el abatimiento de la humedad en tales pendientes sería mayor, lo que representa una ventaja adicional del vetiver en el proceso de estabilización de pendientes.

3.3.4. Influencia de la EVT en la estabilidad de los suelos

Uno de los principales efectos de la Evapotranspiración de las plantas sobre el suelo es que disminuye su contenido de humedad respecto al de su máximo potencial.

Las plantas succionan el agua a través de las raíces, y la retornan a la atmósfera en forma de vapor, de tal manera que, en condiciones similares, los suelos vegetados suelen tener un contenido menor de agua que los suelos desnudos. Esta disminución de humedad tiene importantes efectos negativos y positivos sobre la estabilidad y resistencia de los suelos y en el régimen hidrológico superficial.

3.4. EFECTO PROTECTOR DE LA VEGETACIÓN

Las características morfológicas de las plantas, especialmente el tipo de hoja y la estructura del ramaje, determinan la proporción de agua interceptada que alcanza el suelo por goteo, el tiempo de almacenamiento temporal del agua en las plantas y el tamaño alcanzado por las gotas de goteo.

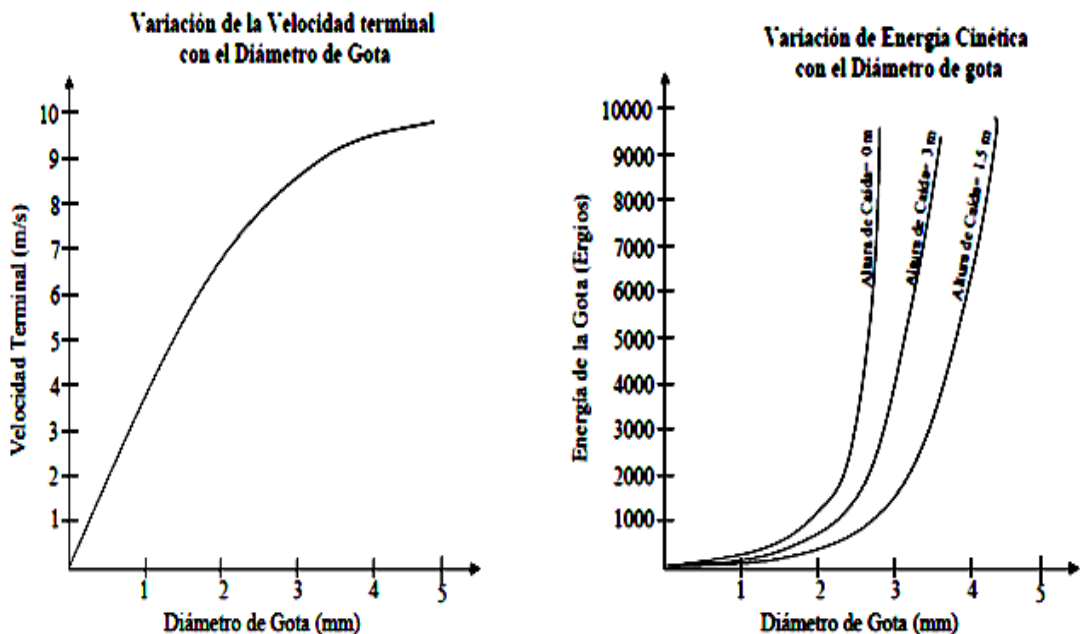
El tamaño de las gotas de goteo es un factor que determina el potencial erosivo por salpicadura, ya que tanto la energía cinética como la velocidad de impacto, son función de la masa. Ambas, velocidad final y energía cinética aumentan exponencialmente con el diámetro de las gotas.

El tamaño de las hojas de las plantas, influye en el papel protector de la vegetación de dos maneras:

Como efecto positivo, las hojas de mayor tamaño otorgan un mayor tiempo de almacenamiento de la lluvia en ellas, prolongando la llegada del agua al suelo durante el evento de precipitación y disminuyendo con ello la intensidad y el potencial erosivo de la lluvia.

Como efecto negativo, en las hojas anchas las gotas interceptadas se unen por coalescencia, originando gotas de tamaño superior a las que se originan en plantas de hoja pequeña (hasta 5 y 6 mm de diámetro). La mayor masa de estas gotas determina que se produzca una aceleración mayor, de forma tal que la altura necesaria para que las gotas recuperen su velocidad inicial de caída (la que llevaban antes de la intercepción) es significativamente menor a la que necesitan gotas de tamaño más pequeño. (Francisco J. Moscoso, 2003)

Figura 6: Energía cinética de las gotas de lluvia.



(Fuente, Urbano - 1997)

El nivel de protección de la vegetación, es función entonces de la combinación de los siguientes factores:

- Altura
- Grado de cubierta
- Tamaño de las gotas

Si la cubierta vegetal está pegada al suelo, o tiene una altura inferior a 0.3 m, el volumen de agua de goteo suele ser pequeño y, no se alcanzan velocidades suficientes para que la erosión por salpicadura sea significativa. En este caso, la pérdida de suelo decrece exponencialmente al incrementarse el grado de cubierta. Cuando la vegetación tiene entre 0.3 y 0.5 m. de altura, la pérdida de suelo decrece linealmente con el incremento de cubierta.

Finalmente, la cubierta vegetal proporciona al suelo un efecto de aislamiento, al provocar un microclima en las zonas próximas, reduciendo de esta forma las variaciones de temperatura y humedad. Esto disminuye la agresividad de los procesos de meteorización mecánica que actúan por ruptura de los agregados del suelo.

4. LA SELECCIÓN DE ESPECIES PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

Para rehabilitar áreas degradadas por el efecto de construcción de obras civiles, particularmente en taludes, es absolutamente necesario establecer una cobertura vegetal que lo proteja y lo integre paulatinamente al paisaje, situación un tanto difícil, puesto que este proceso debe hacerse con rapidez, con el propósito de evitar la erosión hídrica y eólica, que naturalmente afectan en gran medida las superficies inclinadas.

En este sentido surge la necesidad de utilizar especies vegetales que tengan las características apropiadas para adaptarse a las condiciones medioambientales del lugar y permitan iniciar el proceso de sucesión ecológica, con el consiguiente paso de conformación edáfica.

4.1. SELECCIÓN DE ESPECIES

La selección de especies tiene por objetivo central la búsqueda e identificación de los vegetales que cumplan con las condiciones de estabilización de taludes y que a la vez posean la capacidad de adaptabilidad necesaria para su uso de acuerdo a las condiciones ambientales existentes en la zona de trabajo.

Por tratarse de seres vivos, el comportamiento de las especies vegetales es dinámico, por lo que se debe tener mucho cuidado en la selección de la especie vegetal apropiada para cada caso particular, teniendo en cuenta experiencias locales y las condiciones medioambientales en que crecen las diferentes especies vegetales.

Ciertos tipos de planta son intrínsecamente mejores que otras para objetivos de estabilización específicos. La vegetación maderable posee raíces más profundas y más resistentes que las plantas herbáceas y pastos, y provee un mejor refuerzo y efecto de arco.

En la tabla 1. del capítulo 1 se revisaron algunas ventajas y desventajas de algunos tipos de vegetación de los que generalmente son usados en obras de bioingeniería de taludes.

Para la elección de especies, se deben tener en cuenta los siguientes criterios que deben ser tomados en consideración:

- Criterios biotécnicos
- Criterios ambientales.
- Criterios fitosociológicos

4.2. CRITERIOS BIOTÉCNICOS

La vegetación a utilizar debe cumplir su función como elemento estructural estabilizador o protector. Se debe entonces tener en cuenta estos requerimientos a la hora de privilegiar una u otra acción, ya que dependiendo de estos se recurre a la función de recubrimiento y protección de plantas fibrosas, superficiales y muy extendidas capaces de crear cubiertas densas y continuas por ejemplo para el caso del control de la erosión.

Por el contrario, si el efecto que quiere lograrse es de estabilización frente a procesos de remoción en masa, lo adecuado sería buscar en la vegetación el efecto de anclaje y reforzamiento en plantas con sistemas radiculares fuertes, profundos y de rápido desarrollo, que además, presente tallos de gran resistencia y una relación entre biomasa del sistema radical y la biomasa de la parte aérea, alta. (Francisco J. Moscoso, 2003).

En la siguiente tabla 5 se presentan las funciones y características deseables de especies vegetales para la estabilización de taludes, al momento de hacer la selección.

Tabla 5: Funciones de la vegetación.

Función	Características deseables
Contención y captura	Ramificación desde la base
	Tallos fuertes y flexibles
	Rápido crecimiento de la parte aérea
	Capacidad de rebrote
	Propagación rápida por esqueje y brotes de raíz
Revestimiento y cubierta	Superficie de crecimiento extensiva y densa
	Sistema radicular extendido, fibroso y superficial
Refuerzo y Soporte	Raíces profundas y fuertes
	Rápido crecimiento del sistema radicular
	Alta relación entre biomasa de la raíz y parte aérea
	Alta tasa de transpiración a través de las hojas

(Fuente, Francisco J. Moscoso - 2003)

De esta forma entonces, la morfología de las plantas y su ciclo vital son factores determinantes en la adecuación de las diferentes funciones asociadas a la vegetación.

En el caso del vetiver, con base en la función y característica deseables de la vegetación utilizada en la estabilización de taludes, se convierte en una especie privilegiada, en el momento de seleccionar especies, por su estructurado y fino sistema de raíces, y su sobresaliente resistencia a la tracción y poder de penetración, y densa cobertura en la superficie y su capacidad de adaptación a condiciones extremas de suelos y humedad.

Igualmente por estas cualidades mencionadas, el vetiver puede ser considerado como una planta protectora, en tierras deterioradas y abandonadas. Plantado como una cobertura o una serie de barreras, estabiliza suelos erosionables (particularmente pendientes empinadas), creando un microclima que permite a otras plantas tener una oportunidad de establecerse. Al formar una densa cortina subterránea que sigue las curvas de nivel del terreno, las raíces impiden la formación de surcos, cárcavas y túneles.

4.3. CRITERIOS AMBIENTALES

La capacidad de adaptación y tolerancia de los vegetales es diferente de acuerdo a cada especie, cuestión por lo que las especies seleccionadas deben cumplir con estas propiedades, expresando su capacidad para prosperar en el medio de crecimiento.

Dicho de otra forma, los criterios ambientales son los que tienen relación con las condiciones que ofrece la zona a revegetalizar.

Los factores ambientales se pueden agrupar de la siguiente forma:

- Bioclima
- Características del sustrato

4.3.1. Bioclima

Considera la combinación de los factores climáticos que determinan el crecimiento de la vegetación y la supervivencia de las especies que forman una comunidad

ecológica. Este factor ambiental por cierto no es modificable, y el éxito de la repoblación estará en hacer una buena elección de la combinación de especies vegetales a emplear que se adapten perfectamente a las condiciones de la zona de crecimiento. Sin embargo, el diseño y gestión de la revegetalización puede moderar su influencia.

Para el adecuado estudio de este factor, es necesario distinguir 2 escalas de trabajo:

4.3.1.1. El nivel regional: En esta escala los factores que determinan el tipo de bioclima son:

- Altitud
- Latitud
- Distancia del mar

4.3.1.2. El nivel local: Llamado también microclima, definido evidentemente por las condiciones locales que modifican las características climáticas generales. En este nivel, las condiciones microclimáticas están determinadas por:

- Exposición y orientación de las superficies a repoblar.
- Naturaleza del suelo y tipo de cobertura.
- Características fisiográficas locales.
- Régimen de humedad.
- Circulación atmosférica y régimen de vientos.
- Cercanía a cursos de agua.

4.3.2. Características del sustrato.

El medio edáfico es un sistema que actúa con y sobre la vegetación de manera dinámica e interdependiente. Es quien proporciona los nutrientes y agua a las plantas, además del oxígeno para el proceso de respiración de los sistemas radiculares.

En situación contrapuesta al bioclima, este factor es modificable a través del uso de técnicas de preparación y tratamiento del suelo, adecuando sus propiedades a los requerimientos de los vegetales.

Las propiedades fisicoquímicas del suelo que actúan sobre la vegetación y, que deben considerarse en el proceso de selección de especies son los siguientes:

- Textura y densidad
- Fertilidad
- PH

4.3.2.1. Textura y densidad: Determinan las posibilidades y el tipo de enraizamiento como a su vez la capacidad de almacenamiento e intercambio de agua con las plantas. De esta forma entonces habría que esperar que las especies propuestas para suelos altamente arcillosos, requieran del uso de plantas adaptadas a esas condiciones edáficas, tanto en sus sistemas radicales como en su fisiología.

4.3.2.2. Fertilidad: Referida a la presencia de macro nutrientes (N, P, K) y micro nutrientes (Ca, Mg, S, Na, metales traza) . En el caso de sistemas edáficos muy pobres, es conveniente incluir dentro de la selección de especies, plantas leguminosas que son capaces de fijar el nitrógeno propio, con lo que además de ser capaces de sobrevivir y prosperar en suelos adversos, su actividad mejora las características del suelo.

4.3.2.3. pH: Las condiciones extremas de este parámetro resultan tóxicas para gran mayoría de las plantas, además de determinar el grado de asimilabilidad de determinados nutrientes. Si se da el caso de estas condiciones extremas, será indicado el uso de especies especialmente adaptadas (especies acidófilas y basófilas).

En el caso del vetiver, es una planta que sobrevive en unas condiciones, extremas de clima y suelos. Puede resistir un amplio rango de pH, creciendo en suelos con una acidez de 3.0 y puede sobrevivir en alcalinidades con un pH alto entre 10.5 a 11.

4.4. CRITERIOS FITOSOCIOLÓGICOS

Como la vegetación no es un elemento estático, debe tenerse en consideración a la hora de la decisión que se está haciendo uso de un sistema dinámico que establece una compleja red de interrelaciones entre las distintas especies e individuos y su entorno medioambiental, sujetos a continuos cambios y evoluciones.

El estudio de los procesos de sucesión vegetal arroja elementos que pueden acercarse a la predicción de la evolución de la composición específica y de la estructura de la vegetación establecida y, en función de ellos se puede decidir que especies se van a utilizar, su proporción, y especificar una gestión del espacio tratado que asegure la permanencia de las especies sobre las que recaen las funciones de estabilización y/o protección de los taludes manejados.

El vetiver produce un aceite con un contenido aromático fuerte que hace que la planta resulte desagradable para los roedores y otras plagas; muchos agricultores de la India afirman que impide asimismo que aniden ratas en la zona. Debido a que el denso sistema radicular repele a los rizomas de otras gramíneas, las hileras de barreras impiden que aquellas penetren en el predio agrícola y se conviertan en maleza. Además, las hojas afiladas y duras de la planta ahuyentan también a las serpientes.

Estas propiedades no deseables en la planta, que la hacen un tanto asociable y que podrían parecer perjudiciales, pueden convertirse en situaciones benéficas, teniendo en cuenta que los roedores en algunos casos se convierten en plagas y transmisores de enfermedades, al igual que si no permite la proliferación de malezas cuando se utiliza en cultivos agrícolas, esto resulta en un enorme beneficio en ahorro de costos de mano de obra que sería necesaria para la eliminación de las malezas.

En cuanto a ahuyentar culebras, esta es una aseveración un tanto desproporcionada teniendo en cuenta que la planta crece por encima de los 1.5 m. y las culebras son rastreras, pero si así fuera, sería un control natural que evitaría mordeduras y pérdidas de vidas humanas y además la vida de estos reptiles, teniendo en cuenta que en nuestro medio es costumbre eliminarlas sea cual sea la razón.

Igualmente establecido en barreras serviría para evitar el paso de personas y animales, a sitios a los cuales el ingreso está prohibido como acequias, acueductos, taludes, estanques, que por motivos diferentes no deben ser objeto de afectación alguna.

4.5. PORQUE UTILIZAR VETIVER.

Habiendo desarrollado los criterios generales que se aplican para la selección de la especie a usar en la aplicación de bioingeniería para obras de tierra, a

continuación se presentan una serie de consideraciones acerca del porque el Vetiver es una opción optimizada para su uso en obras de bioingeniería.

El vetiver (*Vetiveria zizanioides* L.) es una planta que presenta alta adaptabilidad a diferentes tipos de suelos y climas. Además posee numerosas características que la convierten en una valiosa alternativa en muchas partes del mundo, para la conservación de los suelos y el agua, la protección y la estabilización de infraestructuras, la prevención de desastres naturales por deslaves, y la restauración y la protección del ambiente.

Las características particulares del sistema radical de esta planta abundante y fibrosa que puede explorar hasta más de tres metros de profundidad contribuyen en el mejoramiento de algunas de características físicas de suelos. Por ejemplo la incorporación del vetiver en suelos con alta compactación ha permitido una leve reducción de la densidad aparente, incrementos importantes en la conductividad hidráulica, aumento del espacio poroso total y microporosidad.

En los capítulos posteriores se describen las bondades de esta especie y sus aptitudes para adaptarse a nuestro medio, donde es común observar la afectación de los suelos por la construcción de numerosas obras civiles, especialmente de obras para vías.

En este tipo de obras se modifican y afectan los suelos a través de la construcción de taludes, que presentan inestabilidad por cualquiera de los movimientos en masa y deslizamientos descritos en el capítulo 2 de esta monografía.

En todas estas situaciones de inestabilidad que se presentan en los taludes recién conformados, con pendiente pronunciada a muy pronunciada (25>45%), donde los árboles y arbustos no se desarrollan bien (ni tampoco los pastos comunes); es especialmente en estas situaciones que el vetiver puede desempeñar una función única.

Las aplicaciones de la planta viva de vetiver y la utilización de sus partes cosechadas en diversos escenarios del desarrollo sustentable como proyectos comunitarios, protección de infraestructuras y mitigación de desastres, agricultura sostenible, protección ambiental, producción artesanal e industrial responsables, paisajismos entre otros: se ven fortalecidos por los conocimientos y experiencias aportados por la investigación tanto en el ámbito global, como en el regional y local.

En cada caso esta gramínea única ha hecho gala de las mismas extraordinarias características que hacen de ella un sistema ideal, de bajo costo y no limitado a un lugar específico, para controlar la erosión del suelo y aumentar la humedad de éste, entre ellas:

- No se conoce ninguna otra hierba que la iguale en resistencia y diversidad.
- Cuando se planta correctamente, la *V. zizanioides* forma rápidamente un cerco espeso y permanente.
- Tiene un sistema radicular fuerte y fibroso que penetra y fija el suelo hasta una profundidad de tres metros y puede resistir los efectos de la tunelización y el agrietamiento.
- Es perenne y requiere un mínimo de mantenimiento.
- Es prácticamente estéril, y debido a que no produce estolones ni rizomas, no se convierte en maleza.
- Su corona se halla bajo la superficie, lo que la protege contra el fuego y el exceso de pastoreo.
- Sus hojas y raíces han demostrado ser resistentes a la mayoría de las enfermedades.
- Una vez establecida, por lo general no resulta apetitosa para el ganado. Las hojas nuevas, sin embargo, son sabrosas y pueden utilizarse para forraje. (En Karnataka, India, un cultivar de *V. zizanioides* seleccionado por los agricultores tiene hojas más tiernas que resultan más apetitosas para el ganado).
- Ese cultivo es también más espeso y más resistente a la sequía que algunos de los demás cultivares disponibles.)
- Es tanto xerófita como hidrófita y una vez establecida puede resistir sequías, inundaciones y prolongados períodos de anegamiento.
- No compete con las plantas para cuya protección se la utiliza. Los cercos de vetiver han demostrado que no sólo no producen efectos negativos en el rendimiento de los cultivos alimentarios plantados en su vecindad, sino que hasta pueden llegar a aumentarlo.
- Se cree que posee micorrizas que fijan el nitrógeno, lo que explicaría el hecho de que se mantiene verde durante todo el año.
- Es barata y fácil de establecer como cerco y de mantener, así como de eliminar, si no se desea conservarla.
- Crece en cualquier tipo de suelo, con prescindencia de la fertilidad, el pH o la salinidad de éste. Ello incluye arenas, esquistos, suelos de grava e incluso suelos tóxicos debido a su contenido de aluminio.
- Crece en una amplia variedad de climas. Hay información de que crece en zonas con una precipitación media anual de entre 200 y 6.000 milímetros y temperaturas entre -15 a 55 °c.
- Es una planta perfectamente adaptada, de modo que aun cuando todas las demás plantas de los alrededores han sido destruidas por la sequía, las inundaciones, las plagas, las enfermedades u otras circunstancias adversas, el vetiver permanece en su lugar para proteger al suelo de las próximas lluvias.

Si se aplican correctamente, los sistemas vegetales de conservación del suelo y la humedad, especialmente el sistema vetiver, han demostrado ser más baratos y más eficaces.

5. EL VETIVER UNA PLANTA ÚNICA

5.1. VETIVER (Vetiveria Zizanioides)

El vetiver es una planta gramínea, perenne, con vida útil de más de cien años, de rápido crecimiento y muy resistente a propagación de plagas, extremadamente resistente a sequías, anegamiento permanente, a la contaminación y a la salinidad.

Es una especie vegetal, que cuando se siembra correctamente, puede formar una sólida cobertura, que puede prevenir la erosión, formar terrazas naturales, incrementar el almacenamiento de la humedad del suelo y proteger cultivos vecinos que no compiten con él. Una vez establecida esta planta puede resistir a sequías e inundaciones; crecerá en suelos altamente ácidos o alcalinos; puede recuperar vertederos de minas; y puede estabilizar cortes en vías y rellenos, terraplenes de ferrovías y riveras de ríos. Las raíces únicas de esta planta, pueden absorber excesos de nitratos y fosfatos y puede tolerar niveles altos de elementos tóxicos tales como arsénico, mercurio, aluminio, níquel, hierro, cromo, manganeso y contener su propagación. (John Greenfield, 2002)

El vetiver es una planta que puede proteger presas y puertos de la sedimentación. Es una planta que puede mejorar la producción de cultivos a través de la conservación de la humedad y nutrientes. Una planta que es tolerante y resistente al fuego, pero crecerá solamente donde sea plantada por el hombre. Una planta que puede pasar de más de 200 años como cobertura natural, pero que puede ser fácilmente destruida si no es bien cuidada.

Por siglos la gente de la India, donde es nativo, ha conocido esta planta (una grama tropical) que en occidente ha sido poco conocida y muy descuidada recientemente. Entre sus múltiples atributos, el pasto ofrece un control práctico y sostenible para la erosión, simple, barato y a gran escala en las regiones tropicales y semiáridas.

El término gramínea cubre una gran cantidad de plantas cuyo número esta cerca a las 10.000 especies en 660 géneros. Gramínea es la más importante ecología y económicamente de todas las familias de plantas. Mucha gente piensa que las gramíneas son pastos o campos; consideran que una gramínea es poco diferente de otra y que todos los pastos son bastante transitorios por naturaleza.

5.2. NOMBRES COMUNES

Vetiver es una gramínea conocida mundialmente. Se conoce comúnmente con estos nombres: Vetiver, Pachuli, Baúl de pobre, Grama de la india, Pasto violeta, Zacate violeta.

Posiblemente el nombre común más extendido es khus hindu o khus khus (o khas khas), en su nativa India. Este nombre parece haber alcanzado otras regiones de los trópicos, a través de antiguas rutas comerciales y por recientes migraciones humanas, pero hoy en día a veces es usado indiscriminadamente para cualquier vetiver, del norte o sur de la India.

El otro nombre común generalizado, vetiver (que significa la hierba que se saca), viene del tamil, del sureste de la India y Sri Lanka y parece referirse históricamente a la especie "sin flores" del sur de la India. Fuera del sur de Asia, parece ser el nombre más común en las naciones de occidente y otros países donde fue probablemente introducido como una planta de aceites esenciales.

Otros nombres comunes con el que se conoce el Vetiver en otros países del mundo son:

- Iran/Persia: Bikhiwala, Khas
- Malasia: Nara wastu, Nara setu, Naga setu, akar wahgi (raiz fragante), Rumpu wahgi (hierba fragante), Kusu-kusu.
- Hausa(Niger): Jema
- Fulani(Africa Occ.): So"dornde, so"mayo, Chor"dor"de, Ngongonari, Zemako.
- Wolof(Senegal): Sep, Tiep
- Fulani(Africa Occ.): Toul
- Tukulor(Guinea): Semban
- Mende(Liberia): Pindi
- Susu(Guinea): Barewali
- Temne(Sierra Leona): An-wunga-ro-gban
- Singales(Sri Lanka): Saivandera, Savandramul
- Tailandia: Faeg

5.3. CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Por años, los botánicos han reflexionado sobre la verdadera identidad de las plantas, incluyendo las gramíneas. Muchas gramíneas no son realmente importantes y suficientes para dedicar recursos y tiempo en su categorización, porque no están llamados a cumplir una tarea específica. Sin embargo el Vetiver, debido a sus excelentes cualidades, se ha convertido en lo suficientemente importante como para clasificarlo y separarlo definitivamente de sus parientes cercanos. Con esta planta, debe haber pocas dudas en los países que están adoptando el sistema vetiver, de que están utilizando la especie y tipo correcta. (John Greenfield, 2002).

Inicialmente cuando fue descubierto por los occidentales, el vetiver fue trabajado con muchos nombres, lo cual se puede explicar por su confuso reconocimiento botánico, en los siglos recientes. La taxonomía fue por mucho tiempo enredada: *Vetiveria zizanioides*, fue mencionado en la literatura, bajo una veintena de nombres botánicos y literalmente por docenas de nombres comunes y locales.

Esta especie no fue identificada ni botánicamente clasificada hasta el año 1896, cuando accidentalmente científicos y químicos, quienes no tenían las herramientas que tenemos hoy en día para clasificar plantas, trabajaron en laboratorios, invernaderos y campos para descubrir los secretos del vetiver, conocidos muy bien como mitos tradiciones.

Por cerca de 100 años, hasta 1.999, la clasificación taxonómica del vetiver (el nombre completo aceptado) ha sido *Vetiveria zizanioides* (L) Nash. La "L" se refiere a Linneo, el gran botánico sueco, quien estandarizo el uso de la botánica binomial (dos nombres) a finales del año 1.700: él coloco el vetiver en el género *phalaris*, que ha sido cambiado muchas veces desde entonces. El otro nombre binomial comúnmente usado (especialmente en Europa) ha sido *V. zizanioides* (L) Stapf, el cual se refiere precisamente a la misma especie de planta. Irónicamente Stapf se basó en la definición de Nash de 1.903, de *Vetiveria zizanioides* citada en su pieza maestra en 1.906. (John Greenfield, 2002)

El vetiver ahora tiene un nuevo nombre científico: *Chrysopogon zizanioides* (L) Roberty. Es importante anotar que este nuevo nombre de la especie se refiere exactamente al mismo grupo de plantas similares, con los dos nombres científicos más antiguos dados anteriormente; solamente ha cambiado el nombre del género. Esta revisión fue determinada a regañadientes por J.F. Veldkamp, editor de gramíneas para la Flora Malesiana de la Universidad de Leiden y durante un largo

tiempo asesor voluntario de la red mundial del Vetiver, después de muchos años de estudio del género *Vetiveria*, publicado en la versión revisada de la revista *Austrobaileya* (Veldkamp 1.999). La documentación taxonómica clásica de Veldkamp, confirmó la antigua creencia entre botánicos, de que no hay consistentes diferencias morfológicas (flora) entre los géneros *Vetiveria* y *Chrysopogon*, una conclusión soportada por la toma de muestras de ADN (Adams, et al. 1998). Debido a que *Chrysopogon*, fue el primer género mencionado, bajo las reglas de prioridad botánica, Veldkamp no tuvo más elección que convertir *Vetiveria* en *Chrysopogon*. Veldkamp señaló que el nombre *Vetiveria* “indudablemente será continua y ampliamente usado a pesar de las usuales quejas de los taxonomistas siempre pensando en cambiar nombres”. (John Greenfield, 2002)

Dada la extensa bibliografía de literatura que hace referencia al Vetiver como *Vetiveria zizanioides*, el nombre seguirá siendo ampliamente utilizado y muy probablemente seguirá siendo el nombre preferido de los productores de Vetiver y sus usuarios.

Siendo *Vetiveria zizanioides*, la clasificación botánica más utilizada, en adelante esta será la clasificación utilizada por los autores para referirse al Vetiver.

5.4. ASPECTOS TAXONÓMICOS DEL VETIVER

Los aspectos taxonómicos de la especie son: tiene raíces ramificadas y esponjosas que alcanza hasta tres metros de profundidad. Los tallos son erguidos con altura entre 0.5 y 1.5 metros. Las hojas son relativamente rígidas, largas y angostas un tanto afiladas, de 75 centímetros de largo y hasta 8 milímetros de ancho. Las flores en forma de panícula con 15 y 40 centímetros de largo; los nudos y pedicelos sin vellosidades.

No tiene estolones, tiene rizomas muy cortos (2-3 mm) y un sistema radicular masivo finamente estructurado que puede crecer muy rápidamente. Posee tallos rígidos y enhiestos, que pueden mantenerse firmes hasta en un flujo de agua relativamente profundo. Forma nuevas raíces a partir de nodos cuando está enterrado en contacto con el suelo.

Hay diez especies conocidas del pasto vetiver y cientos de cultivos diferentes que muestran diferencias fenotípicas distintas que pueden ser explotadas dependiendo de la necesidad. Por ejemplo, tipos gruesos, con hojas fuertes y rectas pueden

soportar velocidades altas de la escorrentía y probablemente son mejores para el control de erosión en cárcavas; los tipos suaves son mejores para forraje.

Forma densas barreras cuando se siembran las plantas en proximidad entre si y constituye un eficaz dispersor de agua, una barrera de desvío y un filtro de sedimentos.

5.5. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DEL VETIVER

Que hace especial al vetiver?; La respuesta se encuentra en las raíces, en las características fisiológicas y ecológicas de la planta y en su inherente habilidad para crecer sin convertirse en mala hierba y sin atraer plagas. . (John Greenfield, 2002).

5.5.1. Las raíces

El vetiver tiene un masivo, finamente estructurado sistema de raíces, que es único. No se ha encontrado otra planta con raíces similares a las raíces del vetiver. La raíz del vetiver tiene una característica que lo diferencia de otras raíces de pastos y arboles; la característica es el poder de penetración. La fuerza innata y vigor de la raíz del vetiver, les permite penetrar a través de suelos difíciles, hardpan, o capas de rocas con fracturas; incluso se las arreglan para perforar capas asfálticas. Sin rizomas o estolones, las raíces de la planta crecen rectas hacia abajo con una masa tan densa como la cantidad de hojas que produce por encima del suelo. Estas raíces penetran 3 a 4 metros en el sustrato antes del adelgazamiento; pero en un caso en Tailandia, ellas fueron encontradas a una profundidad de 6 ms. (John Greenfield, 2002)

Las raíces son de especial interés, debido a su sobresaliente resistencia a la tracción. Investigaciones realizadas por Hangchaovanich y Nilaweera, muestran que la resistencia a la tensión, de las raíces del vetiver estuvo en el orden de 75 MPa (Mega pascales – medición de la resistencia a la tracción confinada) o aproximadamente un sexto del acero suave- y variable entre el 40 a 120 MPA (Hangchaovanich y Nilaweera, 1.996). En el campo, por supuesto, el uso del acero es costoso y escaso, y el acero se empieza a deteriorar tan pronto es instalado. Por el otro lado el vetiver es barato, denso, y solamente prolifera con el tiempo, lo que ayuda a explicar porque se está convirtiendo en la cobertura favorita de la ingeniería. (John Greenfield, 2002)

Los resultados de la investigación se muestran en la siguiente tabla 6, donde se evidencia la superioridad de las raíces de Vetiver en la resistencia a la tracción.

Tabla 6: Resistencia de las raíces de algunas plantas a la tensión.

Nombre botánico	Nombre común	Resistencia a la tensión (MPa)
Salix sp.	Sauce	9-36*
Populus sp.	Alamos	5-38*
Alnus sp.	Alisos	4-74*
Pseudotsuga sp.	Abeto de Douglas	19-61*
Acer sacharinum	Arce plateado	15-30*
Tsuga heterophylla	Cicuta del oeste	27*
Vaccinum sp.	Gaylussacia	16*
Hordeum vulgare	Cebada	15-31*
----	Zacate, hierbas	2-20*
----	Musgo	0,002-0,007*
Vetiveria zizanioides	Pasto vetiver	40-120**

(Fuente; *Wu, 1995, **Hengchaovanich y Nilaweera, 1996)

Asimismo, debido a su denso y masivo sistema radicular subterráneo, el pasto vetiver ofrece un mayor incremento en la resistencia al cortante por unidad de concentración de fibra (6-10 kPa por kg de raíz por m³ de suelo) en comparación con 3,2-3,7 KPa por kg de raíz de árbol por m³ de suelo.

Como resultado de su investigación en la estabilización de autopistas, Hangchaovanich y Nilaweera, expresaron que las raíces del vetiver básicamente se comportan como clavos en el suelo o tacos, comúnmente usados en trabajos de estabilización de taludes de alto enfoque.

El sistema de raíces profundas del Vetiver, también hace a la planta capaz de resistir severas sequías. En los años 90s, no solo sobrevivió a la peor sequía en Queensland, Australia, sino que continuó creciendo a lo largo de la sequía.

El vetiver, desarrolla nuevas raíces y brotes de la corona y nudos, cuando la planta es enterrada y atrapada en los sedimentos. La planta continuará creciendo y cubrirá el nivel de la superficie, con el nuevo nivel de desarrollo formando eventualmente terracetas. En la India donde el Vetiver fue plantado a través de pendientes del 2%, como parte de la demarcación de linderos de predios, formo terrazas de más de 3 m. de altura, lo cual es un ejemplo claro de la cantidad de

suelo que el agricultor podría perder, si el vetiver no hubiera sido plantado en su predio. (John Greenfield, 2002)

5.5.2. Características fisiológicas

El vetiver es una planta que sobrevive en unas bajas condiciones, donde otras plantas no pueden vivir. Tolerará prolongadas sequías, incendios, inundaciones, inmersiones y temperaturas extremas de -15°C a 55°C, (en Australia) y muy extremas (en la India y África). En algunos casos puede ser la única planta que sobrevive. Sus habilidades para rebrotar rápidamente después de ser afectado por sequías y especialmente por incendios, como también por heladas, sal, y otras condiciones adversas es bastante sobresaliente e inigualable por otras plantas. Puede resistir un amplio rango de pH, creciendo en suelos con una acidez de 3,0 y puede sobrevivir en alcalinidades con un pH alto entre 10,5 a 11.

El vetiver puede soportar un alto nivel de suelos salinos, sódicos y ácido de sulfato, haciéndola una planta única en la conservación bajo esas condiciones (Truong, et al. 1.996). Sus particularidades son especialmente apreciadas, cuando la planta ha sido usada para estabilizar y rehabilitar residuos de minas y rellenos sanitarios, porque es altamente tolerante a niveles tóxicos de aluminio (Al), Manganeso (Mn), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Níquel (Ni), cobre (Cu) y Arsenico (As) (Toung y Claridge 1.996). (John Greenfield, 2002).

5.5.3. Características Ecológicas

Por sus cualidades superiores, el vetiver puede ser considerado como una planta protectora, en tierras deterioradas y estériles. Plantado como una cobertura o una serie de barreras, estabiliza suelos erosionables (particularmente pendientes empinadas), creando un microclima que permite a otras plantas tener una oportunidad de establecerse. A este respecto, se ha probado a sí mismo, en la rehabilitación de sitios de minas y en la estabilización de cortes en autopistas, terraplenes de vías férreas y canteras.

Después que árboles y arbustos se han establecidos en estos sitios, ellos empiezan a dar sombra a la cobertura del vetiver, reemplazándola como agente estabilizador. Y aunque el vetiver es altamente considerado como un pionero no intrusivo en la rehabilitación de tierras, a pesar de haber sido desplazado, él de hecho permanece en el sitio.

Por ejemplo en los años 80's, un pedazo de selva clareada en Trinidad, fue limpia, despejada y quemada y plantada con cítricos. Inmediatamente después de la quema, cuando el suelo fue denudado y vulnerable a la erosión, dos barreras de vetiver rápidamente se materializaron, previniendo algunos problemas con la erosión del suelo. Aunque estas coberturas fueron plantadas años antes, la tierra desde entonces había sido abandonada y revertida en jungla. Las coberturas fueron totalmente cubiertas y sombreadas; sin embargo la tenacidad del pasto, fue bien demostrada al rebrotar nuevamente, después de años de persistir en las penumbra.

Igualmente, esta tenacidad viablemente sostenida bajo densa sombra es fuertemente exhibida en los campos de caña en Fiji, donde las barreras de contorno de vetiver fueron completamente cubiertas por los cultivos de cañas, por lo menos durante 10 años meses, cuando el dosel cultivo se ha cerrado, demostrando así, una sobresaliente característica de la resiliencia del vetiver. Cuando la caña de azúcar es cosechada, la cobertura es inmediatamente expuesta a plena luz solar, un choque que mataría muchas plantas. Y si eso no es suficiente para la planta, entonces a menudo es quemada, con los residuos de la caña – o en áreas donde no queman los residuos, las coberturas son cortadas hasta el suelo, porque las hojas producen una paja excelente largamente perdurable. A pesar de este horrible manejo, las coberturas continúan funcionando perfectamente.

Los cultivadores de caña de Fiji, también han encontrado que cuando las coberturas de vetiver están verdes, sirve de guardafuego, para quemar los residuos.

Aunque el Vetiver es tolerante a algunas condiciones extremas de suelo y clima, es altamente intolerante a la sombra, durante su establecimiento. Para obtener una buena cobertura sostenible, debe ser plantados y desarrollado a pleno sol.

5.5.4. Potencial de malezas y plagas

Es importante que algunas plantas usadas en protección ambiental o cultivos económicos, no puedan evitar convertirse en malezas u hospederos de plagas para otros cultivos importantes. Muchos cultivos de pasto vetiver (Vetiveria zizanioides, la única especie recomendada para el control de erosión en suelos y otros usos) han sido rigurosamente probados por su esterilidad en los Estados Unidos, Australia, India y muchos otros países donde está siendo usado extensivamente. En la India, donde el Vetiver ha sido usado por cientos de años,

como un cultivo esencial para aceite, no ha mostrado ningún potencial invasivo fuera del rango de su hábitat.

5.6. USOS DEL VETIVER

El vetiver pertenece a un género de pastos de pantano, tradicionalmente considerado dentro de las diez especies más viejas del mundo, una de las cuales se distribuye por todo el mundo.

La gente ha usado el vetiver por lo menos 3.000 años, y posiblemente durante 5.000 años como fuente de fragancias y medicina. De las especies, *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash, ha demostrado ser el más extensamente usado para el control de erosión. En Malawi y en los países occidentales de África, *V. nigrítana* es muy usado en la conservación de suelos y agua, lo cual es muy bueno, excepto en periodos críticos, donde puede ser reemplazado apropiadamente por *V. zizanioides*, por su más largo y efectivo sistema radicular.

La gente de la India continúa usando el vetiver y sus productos para las necesidades del hogar, esteras para el desierto, perfumes y medicina. Antes de 1896, no fue una planta de mucha importancia, excepto en Indonesia, donde empresarios lo usaban para producir aceite. En el proceso de cosechar las raíces, los trabajadores sacaban las plantas fuera de las profundas acequias, dejando huellas marcadas para la erosión en cárcavas. De hecho, debido a la erosión causada por este método de cosechar las raíces, el vetiver ganó una mala reputación, aunque no fue la planta la causante del problema. (John Greenfield, 2002)

En el siglo XX, el vetiver fue reutilizado para diferentes propósitos: agricultores plantaron coberturas del pasto a través de los contornos para detener la erosión en jardines de té y en cañales. Este reciente intento en la conservación del suelo vegetal, parece haber coincidido con la súbita conciencia mundial de la necesidad de hacer algo para detener la erosión del suelo, o al menos detenerla.

Sin embargo, los especialistas en conservación, instruidos en las técnicas de Ingeniería, por lo general no se sintieron atraídos por la utilización de métodos vegetativos en el control de la erosión, ya que a lo largo del tiempo e incluso ahora, no hay nada en las zonas templadas, que se pueda comparar con el vetiver.

Trabajos mas recientes (Banco Mundial: Vetiver barrera contra la Erosión/1.987), proponen aprovechar una de las mayores bondades del vetiver en el control de la erosión y convertirlo en un sistema vegetal de conservación del suelo y la humedad.

5.6.1. Control de la erosión

La erosión laminar es la forma más perjudicial de erosión, principalmente debido a que con frecuencia no se la reconoce y, por ende, pocas veces se la trata. Este tipo de erosión, provocada por las precipitaciones, es responsable de la pérdida de miles de millones de toneladas de suelo desnudo cada año. A medida que las gotas de lluvia golpean el suelo, se desprenden de éste partículas de tierra que luego el agua arrastra al escurrirse.

Este escurrimiento continúa despojando a las zonas desprotegidas, de su valiosa tierra vegetal y se convierte en el agua barrosa que luego desemboca en los desagües, arroyos y ríos.

La erosión laminar da origen a otras formas más impresionantes de erosión: surcos y cárcavas, por ejemplo, que han sido objeto de la mayor parte de los esfuerzos de conservación realizados hasta la fecha.

Los efectos de la erosión laminar pueden apreciarse más fácilmente en las zonas boscosas que carecen de mantillo y en campos o tierras estériles en que hay unos pocos árboles en pie donde la pérdida de suelo deja al descubierto las raíces de los árboles. Ello permite que el agua pase con facilidad por debajo de los troncos de los árboles y entre sus raíces. Una vez que toda la tierra que los sustenta y les da vida es arrastrada por el agua, también los árboles terminan por ser arrancados del suelo.

En las zonas en que no es posible ni practicable contar con una cubierta forestal, pueden usarse barreras vegetales para detener la pérdida de suelo.

La plantación de arbustos y gramíneas de raíz fibrosa como barreras siguiendo las curvas de nivel del terreno reduce la velocidad del escurrimiento, desvía el agua, debilita su poder erosivo y la hace depositar su carga de valiosa tierra detrás de los cercos de plantas en hilera. Como resultado de ello, el agua se escurre por la

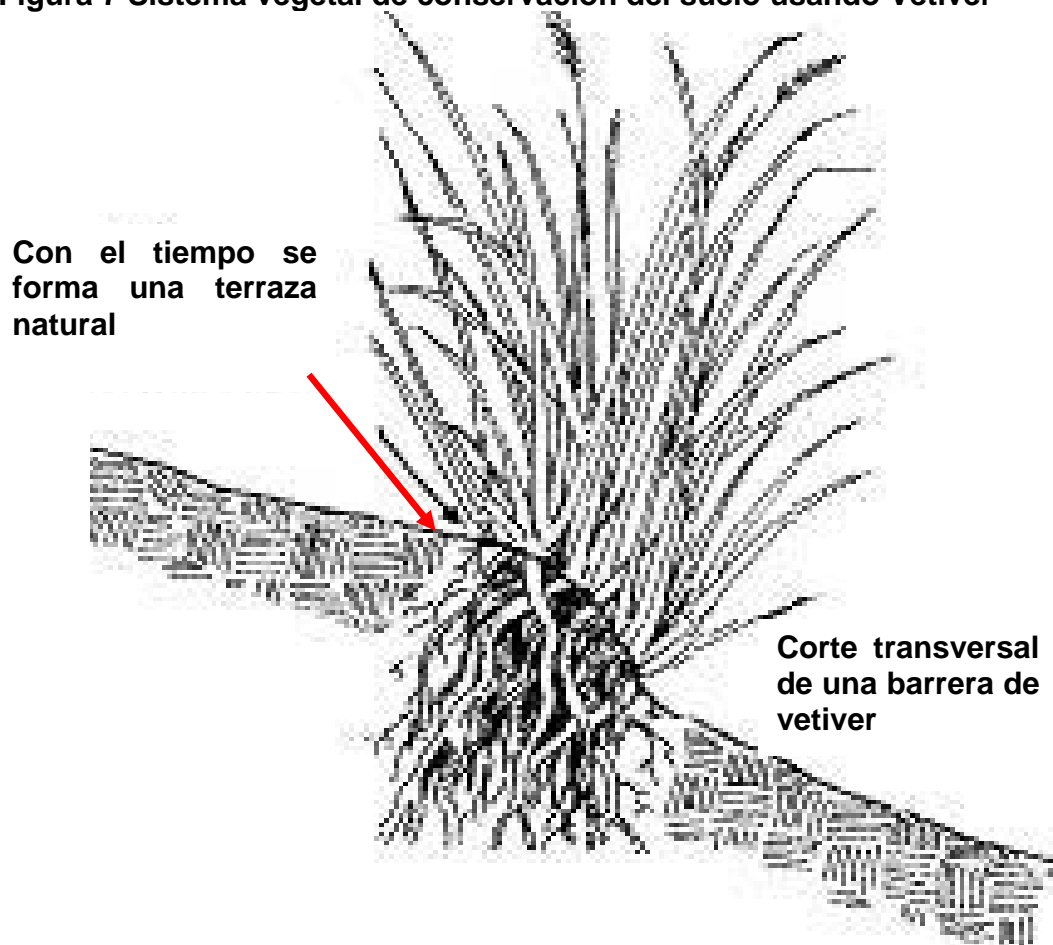
pendiente con suavidad y, si las barreras se han plantado a intervalos verticales correctos no provoca posterior erosión.

El masivo y finamente estructurado sistema de raíces del vetiver y la posibilidad de formar barreras en curvas de nivel, se están convirtiendo en una alternativa en el control de la erosión para evitar la pérdida del suelo que es alarmante en suelos cultivados, a causa de la erosión laminar.

Utilizando barreras vivas con vetiver, se crea un sistema natural de protección del suelo que a su vez conserva la humedad y evita pérdidas por erosión.

Con el correr del tiempo, el sistema vegetal que se forma con las barreras del vetiver produce los siguientes efectos: el agua que se escurre deja atrás su carga de tierra, la hierba echa retoños a través de ese limo y se crea una terraza natural. La terraza se convierte luego en una característica permanente del paisaje, en una barrera protectora que conservará su eficacia por decenas de años. Lo anterior se muestra en la figura 7.

Figura 7 Sistema vegetal de conservación del suelo usando Vetiver



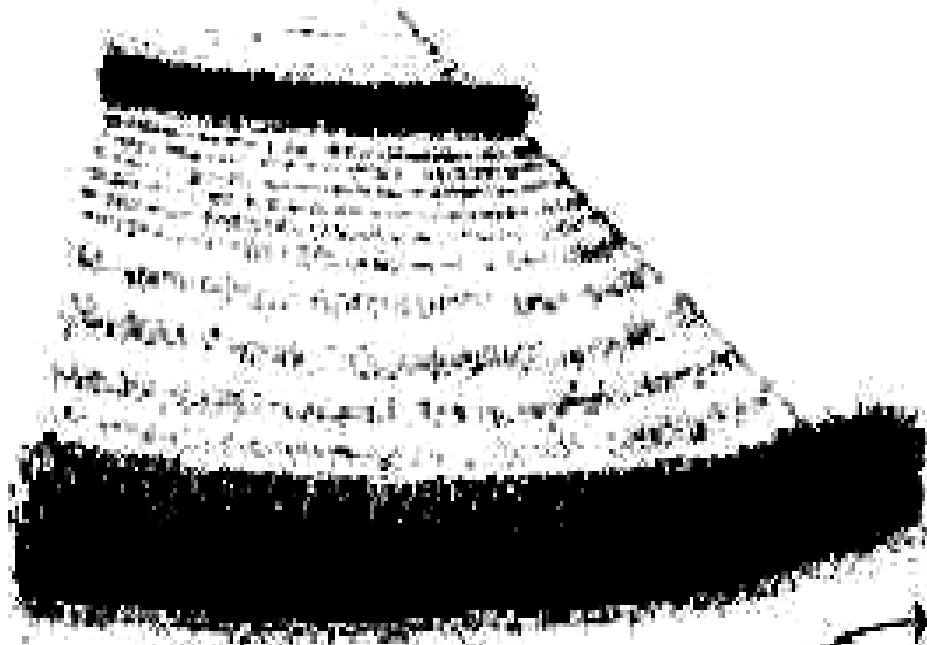
(Fuente, Banco Mundial - 1987)

Cuando el escurrimiento llega hasta las barreras de vegetación, se hace más lento, se esparce, se desprende de su carga de limo y fluye a través de las hileras de las barreras; entretanto, gran parte del agua penetra en la tierra. No hay pérdida de suelo y tampoco hay pérdida de agua debido a la concentración del escurrimiento en zonas determinadas. Un sistema vegetal de estas características, no requiere obras de ingeniería y los agricultores pueden hacer todo el trabajo ellos mismos.

Aunque en ciertas circunstancias pueden formarse cercos espesos en el plazo de un año, generalmente se requieren entre dos y tres años para que se establezca una barrera de densidad suficiente como para soportar lluvias torrenciales y proteger el suelo.

Para que el vetiver resulte eficaz como método de conservación del suelo, el sistema vegetal debe formar barreras como se muestra en la Figura 8.

Figura 8 Sistema vegetal de conservación del suelo



(Fuente, Banco Mundial 1987)

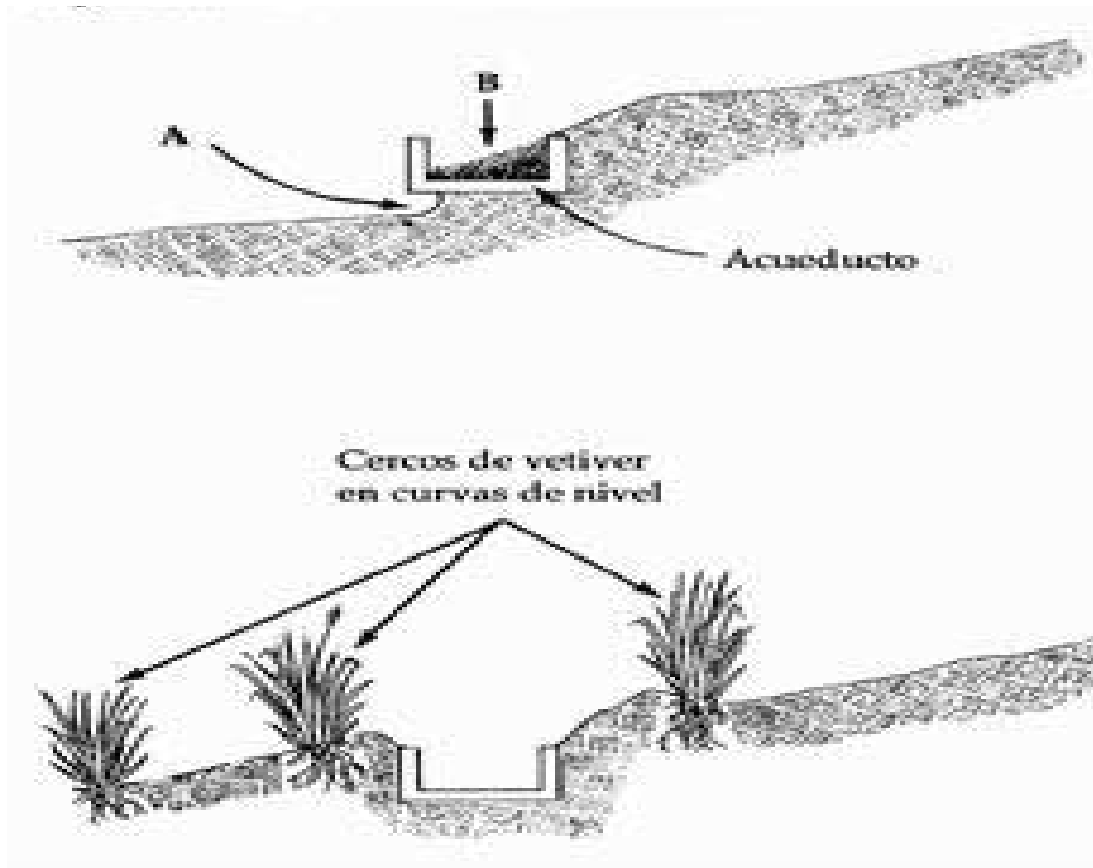
En cultivo las plantas o barreras de vetiver ocupan muy poco espacio y no compiten con otras plantas. Las raíces se extienden sólo unos 50 cm alrededor de la planta. Sólo en casos de aguda sequía puede haber problemas de competencia, pero sólo con plantas de raíces pequeñas que estén plantadas a menos de 0.70 cm del vetiver. Además las raíces del vetiver, gracias a la acción de micorrizas con las que están asociadas incrementa de forma significativa el aporte de nitrógeno al suelo.

5.6.2. Otros Usos

Otros usos normales del pasto vetiver son material para techos, artesanías, mulch, forraje, papel, usos medicinales, almohadillas perfumadas, repelente para insectos.

También se ha utilizado en la estabilización de estructuras como presas, canales y caminos, como se muestra en la figura 9.

Figura 9 Vetiver en la estabilización de estructuras



(Fuente, Banco Mundial - 1987)

5.7. DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE VETIVER

Esta planta tiene sus orígenes en la India, pero se distribuye en Europa, América del Norte, América del Sur, el Medio Oriente y la región del Mediterráneo. Sus zonas de siembra son a nivel de los cinco continentes, se encuentra distribuido en los siguientes países y regiones del mundo:

- África; Burundi, Camerún, El Congo, Etiopía, Gabón, Gambia, Ghana, Guinea, Kenia, Malawi, Nigeria, Ruanda, Senegal, Somalia, Suráfrica, Tanzania, Togo, Uganda, Zambia y Zimbabue.
- América Central: Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá.
- Asia del Este: Camboya, Indonesia, Laos, Malasya, China, Taiwán, Tailandia y Vietnam.

- Europa: Albania, Italia, Portugal, España, Reino Unido.
- Océano Indico: Madagascar, Mauritania.
- Norteamérica: México y Estados Unidos.
- El Pacífico: Australia, Islas Cook, Fiji, Guamo, Hawaii, Nueva Zelandia, Papúa y Nueva Guinea, Filipinas, Samoa, Islas Salomón, Tonga.
- Suramérica: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Paraguay, Perú, Surinam, Uruguay y Venezuela.
- Sur del Asia: Bután, India, Nepal. Pakistán, Sri Lanka.
- Indias Occidentales: Antillas, Cuba, Republica Dominicana, Haití, Puerto Rico, Islas Vírgenes.

6. PROPAGACIÓN VEGETATIVA DEL VETIVER

6.1. QUÉ ES LA TSV?

La tecnología que se basa en el empleo del vetiver como herramienta recibe varios nombres, siendo los más comunes VGS (Vetiver Grass System), SPV (Sistema Pasto Vetiver), TSV (Tecnología de Sistemas Vetiver) o simplemente TV (Tecnología Vetiver), utilizadas en la conservación de suelos y humedad, estabilización de taludes, rehabilitación de campos de cultivo, recuperación de suelos y control de erosión.

La Tecnología de Sistemas Vetiver (TSV) es originada por la Bioingeniería, una conjunción de varias disciplinas de la biología y las ingenierías agrónoma y civil, que interactúan para el diseño, instalación y mantenimiento de barreras vivas, usando al vetiver como planta matriz para el control de erosión, estabilización de taludes, filtro de sedimentos, recuperación de cuencas, control de flujos y de inundaciones, tratamiento de aguas servidas y biorremediación de suelos contaminados. La experiencia internacional sobre protección de infraestructuras, que data de 1.908 en Malasia, (RLAV. op. cit.), así como en otras aplicaciones de la Bioingeniería es amplia y está abundantemente registrada a través de las diferentes redes regionales del vetiver, y muy particularmente, por la red mundial (www.vetiver.org).

6.2. PROPAGACIÓN VEGETATIVA

El vetiver (*V.zizanioides*) no produce semillas que germinan en condiciones normales en terreno, por lo tanto no se propaga por semillas, no produce rizomas ni estolones y por lo tanto no se convierte en maleza. Básicamente el medio de propagación más utilizado con esta especie es su sistema radicular, el cual se divide dejando una parte del tallo de 15 a 20 cm de largo para luego ser sembrado.

La planta crece en grandes macollas (nombre común dado a la planta y sus numerosos hijuelos) a partir de una masa radicular muy ramificada y "esponjosa" (Figura 6.1) y sus tallos erguidos alcanzan una altura de entre 0,5 y 1,5 metros.

Crece erecta y sus rígidos tallos son capaces de formar un seto vivo denso en 3 a 4 meses.

El proceso de propagación es una etapa muy importante para el buen establecimiento de la planta y como ya se conocen algunas características del pasto vetiver, esta actividad será más comprensible y fácil de realizar. La mejor forma de propagarlo es por esquejes que asegurara tener una planta con las mismas características genéticas.

Figura 10 Planta de vetiver desarrollada denominada “macolla” de la cual se obtienen los esquejes.



(Fuente, Autores - 2012).

Una macolla de vetiver puede producir entre 20 -30 esquejes a los 4-6 meses de edad y al plantar una hectárea a una densidad de 0,50 x 0,50 cm. se puede obtener 800,000 a 1,200,000 esquejes /ha. (Figura 10)

6.3. OBTENCIÓN DE ESQUEJES DE VETIVER

Un esqueje se define como un material de propagación asexual compuesto de fragmentos de tallos y hojas (20 cm. de alto) con una pequeña cantidad de raíces (no más de 5 cm.). Cuando no se dispone de esquejes y se van a propagar por

primera vez es necesario adquirir este material del campo de los agricultores que ya tiene experiencia en su manejo.

Figura 11. Área productora de esquejes.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 12. Detalle de plantas en area de producción de esquejes de vetiver.



(Fuente, Autores - 2012).

Normalmente la propagación es con dos propósitos:

- Tener plantas proveedoras de esquejes en parcelas planas y uniformes, (Figura 11 y Figura 12)
- Para la conservación del suelo y agua y contrarrestar la contaminación y otros usos múltiples.

Para la obtención de los esquejes, se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se extraen las plantas del área de producción, se elimina la tierra de las raíces y se lavan con agua. El sistema radicular es demasiado extenso y fuerte como para poder extraer la gramínea a mano (Figura 13).
2. Se cortan las hojas y tallos hasta la altura de 20 cm.
3. Se separan las plantas de la mata en 3 o 4 partes y se limpian las hojas secas y podridas de los lados.
4. Se cortan las raíces hasta unos 5 cm. de la base y se lavan con chorros continuos de agua limpia para no tener residuos de suelo (Figura 14)
5. Estos esquejes ya separados en forma individual con un mínimo de 3 brotes u hojas (Figura 15) se juntan en paquetes bien amarrados de 20 a 50. y se remojan en una bandeja con agua sumergiéndolas unos 5 cm. durante unos 2-5 días (Figura 16). Si fuera necesario esta agua de las bandejas puede contener un poco de fertilizantes fosfórico o hormonas del crecimiento para acelerar el enraizamiento, pero esta práctica se limitara solo en caso extremos

- y no se acostumbra porque saldría más costoso. Si es para trasplantarla a campo definitivo pueden ser necesarias estas prácticas.
6. Cuando la raíces tiene un tamaño de 0.5-1 cm. ya se pueden trasplantar. (Figura 17)
 7. Si se tienen esquejes ya extraídos y todavía no se ha preparado el campo o tomara todavía unos días para trasplantarlo se pueden colocar en camas con sustrato húmedo

Figura 13 Extracción de plantas de vetiver para producción de esquejes.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 14 Corte de raíces para producción de esquejes de vetiver.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 15 Esquejes de vetiver.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 16 Esquejes de vetiver.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 17 Desarrollo radicular de Esquejes de vetiver.



(Fuente, Autores - 2012).

6.4. MANEJO DE LA ESPECIE EN VIVERO

El manejo en vivero de la especie Vetiver ofrece varias alternativas. Se puede reproducir en bolsa o se puede tener un área destinada a la producción de esquejes que pueden utilizarse para la misma producción en bolsa o llevarse directamente a campo a raíz desnuda.

6.4.1. Propagación en bolsa plástica.

Los esquejes de los semilleros de las parcelas o aéreas de producción, se pondrán en bolsas plásticas negras de 5 x 15 cm, en sitios de crecimiento en viveros, donde enraizaran y alcanzaran la altura apropiada para llevarlos a campo. Para la producción en bolsa, se siguen los siguientes pasos:

Se usan plantas o esquejes de los semilleros de las áreas de producción, con edades de 4-5 meses de edad.

1. Se cortan las hojas del macollo a una altura de 30 cm.
2. No usar plantas que han floreado. Aplicar al semillero una mezcla de 100 kilos /ha de 15-15-15 (N₂, P₂O₅ y K₂O) mezclado con compost a razón de 5 tn /ha.
3. Irrigar estos macollos y dejar que salgan nuevos brotes o que las hojas emerjan durante 15 días. Excavar alrededor de los macollos y separar los esquejes en forma individual y cortarlos hasta los 20 cm. de altura. Cortar las raíces lo más corto posible para permitir la salida de nuevas raíces y más fuertes. Extraiga las hojas viejas y lavarlas con agua limpia y amarrarlas en paquetes de 50 o 100 esquejes y luego colocarlos en agua hasta una profundidad de 5 cm. en un área sombreada durante 2-4 días. Hasta que aparezcan nuevas raíces.
4. Después se colocan estas plantas en bolsas plásticas pequeñas con un sustrato 3:1:1 de tierra vegetal: cascarilla de arroz: compost respectivamente. También se puede usar una mezcla 3:1:1 de suelos arenoso: ceniza de arroz: compost respectivamente. (Figura 18)
5. Después se llevan a campo abierto para que reciban la radiación solar durante unos 45- 60 días y en este periodo ya tendrá 3-5 brotes y estará listo para plantarlo en el campo definitivo (Figura 19).
- 6.

Figura 18 Esquejes de vetiver para la producción en bolsa plástica en vivero.



(Fuente, Jaime Suarez - 2000)

Figura 19 Esquejes de vetiver en crecimiento en bolsa plástica en vivero.



(Fuente, Jaime Suarez - 2000)

Con este sistema de producción se garantiza el total prendimiento de los esquejes y una baja mortalidad en campo, cuando las plántulas sean plantadas, pero el hecho de tener que transportarlas con la bolsa, hace que los costos de establecimiento sean altos. Esto se compensaría con la necesidad de realizar

menos sustituciones de plántulas por mortalidad en campo. Igualmente este sistema es muy apropiado cuando el vetiver se establece como barreras, en sitios con alguna escasez de humedad.

6.4.2. Propagación a raíz desnuda

Este método es el más barato y permite el transporte de gran cantidad de material. Comparado con el trasplante en bolsas de plástico, hay un riesgo si suceden problemas de falta de agua durante la fase de prendimiento en campo definitivo ya que el crecimiento de las raíces será lento. Para hacer esto los operarios deben tener un mayor cuidado.

En la producción de esquejes a raíz desnuda, se sigue el siguiente procedimiento:

1. Usar las macollas de plantas de 4-6 meses.
2. Cortar a 30 cm. las hojas y tallos
3. Eliminar las plantas que han floreado
4. Aplicar 10 gramos de una mezcla de 15:15:15 (N_2 , P_2O_5 y K_2O) en forma localizada al costado de los macollos y después incorporarlo.
5. Irrigar las plantas y dejar que salgan nuevos brotes durante 15 días. Escarbar alrededor del macollo y separar los esquejes en forma individual y cortarlo a 20 cm. de altura y luego cortar las raíces tan corto como sea posible.
6. Amarrarlos en paquetes de 50 a 100 esquejes.
7. Sumergirlas en una bandeja con agua.
8. Colocar estas bandejas con los paquetes de esquejes bajo sombra por 2-5 días.
9. Después llevarlo al campo definitivo cuando se tiene una humedad adecuada o con los inicios de las lluvias.

6.4.3. Cuidados y manejo

Como cualquier plántula en crecimiento en vivero, el Vetiver necesita de cuidados, como riegos, deshierbes y fertilización, para garantizar plántulas sanas y vigorosas para llevar a campo.

El vetiver es intolerante a la sombra, como se ha mencionado antes, por lo tanto necesita abundante riego, con plena exposición solar y estar protegido de daños de animales que pueden causar retraso en su crecimiento.

7. MANEJO DEL VETIVER

7.1. TÉCNICAS DE PLANTACIÓN

Aun cuando el vetiver parece ser un pasto muy resistente, cuando se trata de sembrarlo es bueno tomar en cuenta algunos consejos, especialmente cuando se vaya a utilizar solo o como parte de una medida de bioingeniería. Dado que el vetiver desempeña funciones de ingeniería, también se debe considerar como un "material de ingeniería" y, para ser catalogado como un buen material en este campo, debe ser sometido a especificaciones estrictas y a procedimientos de control de calidad antes de que pueda emplearse.

7.1.1. Calidad del material de plantación

Se deben emplear buenos materiales de siembra, con retoños maduros y en pleno crecimiento, y evitar el uso de retoños viejos. Cuando se requiera usar el vetiver para situaciones muy específicas, sería útil buscar ecotipos particulares que sean más apropiados para dicha aplicación, por ejemplo, variedades tolerantes a la sal o al frío que hayan sido ensayadas previamente o sometidas a experimentos satisfactorios. En la tabla 7.1 se muestran las especificaciones modificadas de Ikram Ullah, para la obtención de material de calidad.

Tabla 7: Especificaciones Modificadas de Ikram Ullah para la producción de calidad de material vegetativo de vetiver.

Item	Descripción
General	El seto vivo de vetiver se usa como un sistema de bioingeniería para complementar los trabajos de ingeniería. Por tanto, debe ser de buena calidad y uniforme.
Tipo de Planta	La planta deberá ser de la especie <i>Vetiveria zizanioides</i> . Solo deberán usarse tipos que no produzcan semilla.
Materiales para siembra	i) Se deberá usar retoños jóvenes y de crecimiento vigoroso. No se deberá usar material viejo con formación de cañas, ni ramas de cañas. ii) Las plántulas de cultivo de tejidos (las plántulas procedentes del cultivo de tejidos, deberán transferirse a bolsas de plástico y nutrirse por lo menos 8 semanas dentro del criadero antes de plantación en campo).
Inspección	Raíz: La planta deberá tener una masa radicular joven y

Item	Descripción
de la planta	<p>activa. Se deben desechar las raíces viejas antes de la siembra.</p> <p>Puntas de los tallos: Las puntas deberán tener 5 o mas retoños en activo crecimiento. Se deberán descartar los retoños senescentes</p>
Manipulación de las plantas	Las plantas se deben manipular y transportar con sumo cuidado para evitar dañarlas
Plantación en campo	<p>i) Las plantas especificadas de vetiver deberán sembrarse en filas.</p> <p>ii) Se deberá cavar una zanja de 15 cm de ancho por 23 cm de profundidad (6 pulgs. x 9 pulgs.).</p> <p>iii) En suelos de difícil manejo, la zanja a llenarse podría necesitar tierra superficial de otro sitio.</p> <p>iv) La distancia entre las plantas (centro a centro) no deberá ser mayor a 15 cm.</p> <p>v) Inmediatamente después de la siembra, y según el análisis del suelo, se deberá aplicar un fertilizante apropiado para asegurar una buena y continua nutrición de las plantas por 2 años.</p>
Establecimiento y mantenimiento	<p>i) Durante el primer mes de establecimiento de las plantas, deberán reemplazarse todas las fallas y deslaves.</p> <p>ii) Durante el primer mes deberán reemplazarse todas las plantas de lento crecimiento que no se recobren de los daños de la plantación. Esta situación es aparente debido a que los retoños no crecen o no se producen nuevos.</p> <p>iii) La poda (recorte del pasto) para mantener la altura de las plantas en 40 cm, deberá realizarse en el segundo, cuarto y sexto mes. Posteriormente, el intervalo entre podas será determinado por las necesidades propias de cada terreno.</p> <p>Para asegurar el buen desarrollo de los setos vivos, no deberán recibir la sombra de malezas, en especial de las trepadoras.</p>
Calidad de los setos vivos	<p>Al tercer mes, las plantas deberán estar en pleno desarrollo. Los setos vivos no deberán tener fallas ni plantas enanas.</p> <p>Al sexto mes, los setos vivos deberán estar en pleno funcionamiento, tener un crecimiento uniforme y las puntas de los tallos deberán estar bien densas, todo a satisfacción del supervisor del campo.</p>

(Fuente, Ikram Ullah, Banco Mundial - 1987)

7.1.2. Densidades y distancias de siembra

Para que el sistema basado en Vetiver, ofrezca el máximo de protección, las barreras deben estar espaciados a un intervalo vertical (IV) adecuado. El IV es la distancia vertical que media entre cercos al bajar la pendiente. La distancia efectiva medida a lo largo del terreno, denominada tramo de superficie, depende de la inclinación de la pendiente.

Generalmente, la siembra sigue patrones diseñados con este fin. El intervalo vertical (IV) varía entre 75 cm y 2,0 m. Para lograr líneas y niveles precisos, es útil emplear herramientas de agrimensura tales como un nivel de mano y una baliza de topógrafo. Se recomienda que el espaciamiento entre plantas sea de 15 cm (6-7 plantas/ml).

Es importante anotar que el diseñador deberá tener en cuenta variables tales como la cohesión del suelo, el ángulo de fricción, las cargas del talud propias y externas y los niveles freáticos, así como también conceptos de la biología y la agrología para determinar las distancias de espaciamiento tanto en vertical como en horizontal de la siembra de cada planta, para garantizar la estabilidad del talud, dentro de los alcances de las bondades del vetiver, desde el punto de vista de la bioingeniería, así como también de su combinación con otras técnicas biotecnológicas.

7.1.3. Preparación del terreno

La cantidad y calidad de materia orgánica incide sobre los diversos procesos bioquímicos y químicos en el sistema edáfico y representa la base de la fertilidad de los suelos, expresada a través de los efectos directos o indirectos que ejercen estas fracciones orgánicas en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Suelos orgánicos, con algún contenido de nutrientes siempre serán recomendables, para lograr el desarrollo de cualquier vegetación.

En general, los taludes presentan condiciones inadecuadas para el desarrollo de vegetación, estas son producto del proceso de construcción de estos, tales como la pobreza edáfica y la compactación de los materiales que lo conforman.

Para establecer la vegetación es necesario realizar una serie de acciones de preparación con el objetivo de corregir las deficiencias mencionadas, creando en la zona de actuación condiciones topográficas, de drenaje y calidad del sustrato adecuadas.

Hay generalmente tres tipos de medidas que se utilizan para la preparación del terreno de los taludes:

- Remodelado y control del drenaje.
- Preparación mecánica del sustrato.
- Mejoras edáficas

Es adecuado para las labores de preparación y siembra, que estas se desarrollen en lo posible durante la construcción del talud, pues de lo contrario se crean condiciones de accesibilidad bastante deficientes que obligan al uso de maquinaria no convencional que encarece los costos y dificulta la realización de las operaciones, llegando incluso a la imposibilidad de actuar sobre el terreno.

En la preparación del terreno, la pendiente del talud debe ser lo suficientemente homogénea para garantizar el prendimiento de las plántulas.

7.1.3.1. Remodelado y control de drenaje: Comúnmente, la cabecera del talud, pie y bordes laterales, presentan perfiles de alta pendiente, que ofrecen condiciones adversas a la revegetalización y mayor exposición de la estructura a los efectos de la erosión provocada por la escorrentía superficial, la acción eólica y el desecamiento. Por esta razón es que los perfiles deben ser redondeados, facilitando de esta forma el enraizamiento de la vegetación y disminuir o eliminar los efectos de la erosión.

Si se presentan taludes con superficies susceptibles a erosión tales como líneas de erosión laminar, regueros, cárcavas y zonas de abarrancamiento, deben ser tratados para su desaparición, creando una superficie lisa y perfilada. Las irregularidades menos profundas pueden tratarse con el uso de arado o niveladoras, que deben aplicarse por la línea de máxima pendiente.

En caso de que los materiales sean muy erosionables, la longitud de la pendiente muy extensa, o los eventos de precipitación sean de una intensidad alta, el rol de la vegetación frente a los procesos asociados será limitado, debiendo de esta

manera actuar sobre estos para minimizar la intensidad y/o prevenir los procesos erosivos y sus efectos.

Las medidas a tomar en esta dirección deben apuntar hacia los dos factores que determinan estos procesos erosivos:

- Volumen de escorrentía, reduciendo el ingreso de agua al interior del talud.
- Velocidad de escorrentía, disminuyendo la longitud efectiva de la pendiente.

La reducción del volumen de escorrentía a través de la disminución del ingreso de agua, se hace a través de la construcción de cunetas en la cabecera del talud, interceptando estas las aguas de escorrentía generadas en el entorno del talud y, conduciéndolas hacia fuera de la estructura a través de la pendiente dada a la canaleta en los bordes del talud. (Francisco J. Moscoso, 2003)

Por su parte, la reducción de la velocidad de escorrentía a través de la reducción efectiva de la pendiente, se hace mediante la construcción de una serie de bermas o banquetas, transversales a la línea de máxima pendiente y con contrapendiente de 0.5 - 1%, las que deben tener una zanja en su interior que conduzca el agua interceptada a través de una caída transversal a la línea de máxima pendiente hacia los bordes del talud. Las bajada o drenes laterales del talud serán las vías de evacuación final. (Francisco J. Moscoso, 2003)

7.1.3.2. Preparación mecánica del terreno: La preparación mecánica del suelo, implica el uso de maquinaria, con el propósito fundamental de descompactar los suelos, que proporciona los siguientes efectos de:

- Reducción del volumen de escorrentía por efecto de la creación de caminos de drenaje e incremento de la velocidad de infiltración.
- Aumento de la capacidad de almacenamiento de agua y, por ende, de la profundidad potencial de enraizamiento debido a la reducción de la densidad del suelo.

Para el caso del vetiver, los taludes se pueden manejar con ciertas irregularidades, ya que la siembra se realiza siguiendo curvas de nivel y con intervalos verticales, según la pendiente.

El método a usar será determinado por la forma de siembra a utilizar, la accesibilidad de la superficie del talud, tipo de suelo y niveles de humedad.

7.1.3.3. Mejoras edáficas: En general, los taludes no presentan buenas condiciones físicas, químicas ni biológicas para el establecimiento de vegetación y su desarrollo. Los problemas más frecuentes están relacionados con la ausencia de materia orgánica, nutrientes, bajo nivel de agregación y texturas extremas. Todos estos derivados de la tendencia a la excesiva retención de agua o encharcamiento, o bien insuficiencia en esta. (Francisco J. Moscoso, 2003)

Caso típico de esto serían los taludes de corte en roca, que presentan claramente una inexistencia de suelo.

Existen diversas técnicas destinadas a mejorar las características del sustrato, sin embargo, las principales son cuatro tipos:

- Aporte y extendido del suelo.
- Enmiendas orgánicas.
- Fertilización con productos químicos inorgánicos.
- Adición de acondicionadores, estabilizantes y absorbentes.

Las enmiendas orgánicas, son realizadas para incrementar los niveles de fertilidad del sustrato y mejorar las propiedades físicas (estructura, capacidad de retención, aireación, etc.). La forma química en que se hallan los nutrientes en la materia orgánica, permite su lenta absorción, manteniendo a largo plazo los niveles de fertilidad, razón por la cual no se recomiendan los fertilizantes químicos, que se lavan rápidos y fáciles, una vez aplicados.

El uso de las enmiendas orgánicas se hace aplicando estiércol, u otros abonos orgánicos resultantes del compostaje de residuos sólidos urbanos o lodos de plantas de tratamiento de aguas, que proporcionan mejores rendimientos y que a veces resultan mas baratos.

7.1.4. Plantación o Siembra de esquejes de Vetiver

La siembra de esquejes ya sea en bolsa o a raíz desnuda, es muy usada para la estabilización de taludes.

Para la plantación o siembra de esquejes de vetiver se utiliza la técnica de siembra en hoyo. Es una técnica de siembra manual en que las plántulas son introducidas en un hoyo previamente dispuesto para este efecto. Los hoyos se construyen de 10 - 15 cm de diámetro y 10 - 20 cm de profundidad, siguiendo las curvas de nivel del terreno del talud. El hoyado y siembra se realiza desde la parte superior del talud, siguiendo pendiente abajo.

Se recomienda el uso de esta técnica para casos en que no sea viable realizar una siembra extensiva del talud, en los casos en que ya exista una cubierta herbácea y se pretenda introducir especies leñosas dentro de la sucesión, o en general cuando no es necesario la creación de una cubierta vegetal a corto plazo.

7.1.4.1. Preparación esquejes: Tres días antes de llevarlo al campo se debe reducir la aplicación de agua y las hojas se deben cortar a los 30 cm. Esto es para reducir la transpiración y estimular la rápida emergencia de raíces y hojas.

Se recomienda efectuar análisis químicos del suelo cuando se vaya a plantar vetiver en lugares nuevos, con el fin de determinar los requerimientos de fertilización o enmienda del suelo antes de sembrarlo.

Figura 20 Esquejes de vetiver a raíz desnuda bajo sombra.



(Fuente, Autores - 2012).

Antes de llevar a campo, se recomienda presumergir o poner en remojo (en agua) los esquejes antes de plantarlos, en el caso de esquejes a raíz desnuda, con el

propósito de inducir nuevas raicillas, luego se empacan en manojos apretados. Los esquejes deben mantenerse siempre en la sombra hasta el momento de la siembra, (Figura 20).

7.1.4.2. Siembra: Los esquejes a raíz desnuda, tendrán una longitud de 25-30 cms. La siembra se realiza con un repicado del suelo y luego se coloca el esqueje en total contacto con el suelo, para lo cual se presiona el suelo a su alrededor.

Teniendo en cuenta que el vetiver es una planta no invasiva, y por lo tanto no se extiende hacia los lados, en el caso de la estabilización de taludes es recomendable sembrarla en asocio con una cobertura que invada toda la superficie del suelo, para evitar la erosión laminar.

En seis meses la altura de la planta, en cultivos selectos, alcanza dos metros. Las raíces crecen igual de rápido, alcanzando de 3 a 4 metros de profundidad en el primer año.

Esto ha sido constatado en pruebas efectuadas por Agrodесиerto en retoños de vetiver plantados en campos de pruebas.

7.1.5. Cuidados posteriores a la plantación

El establecimiento de las barreras de vetiver, debe contemplar labores posteriores que aseguren su desarrollo adecuado hasta que pueda auto mantenerse. Estas labores pueden ser:

- Riego
- Fertilización
- Resiembra
- Aclareo y eliminación de malezas
- Siegas o podas de hojas

7.1.5.1. Riego: Las especies vegetales deben ser plantadas durante época de lluvias, para garantizar supervivencia. Colombia tiene un régimen bimodal de lluvias, siendo generalmente, los meses de Febrero y Marzo, en el primer semestre y Septiembre y Octubre, en el segundo semestre, los meses más indicados para llevar a cabo siembras. Se recomienda analizar los datos de días

lluviosos, de las estaciones pluviométricas más cercanas. En todos los casos se requiere riego por lo menos durante el primer mes, con el objeto de garantizar el enraizamiento de las especies vegetales.

7.1.5.2. Fertilización: En el caso de la especie vetiver no es imprescindible, teniendo en cuenta que se adapta a diferentes condiciones de suelo, pero es aconsejable. Se puede emplear cualquier tipo de abono o fertilizante, natural o químico. Se debe tener en cuenta que los fertilizantes químicos se lavan fácilmente. Si se emplea abonos orgánicos basta con un kilo por cada metro lineal. Si se emplean fertilizantes químicos o sintéticos basta un kilo por cada diez metros. También son muy aptos los fertilizantes de liberación lenta. El empleo de los abonos incrementa el desarrollo y velocidad de crecimiento en barreras recién establecidas. No hace falta abonar barreras ya establecidas.

7.1.5.3. Resiembra: En caso de que se presente mortalidad o el prendimiento no sea homogéneo, deberá proceder a la resiembra de las superficies con nuevos esquejes de la especie establecida, en este caso vetiver.

7.1.5.4. Aclareo y eliminación de malezas: Una vez logrado el arraigo de las barreras de vegetación y la densidad de las plántulas sea mayor que la deseada para cubrir los objetivos de estabilización y/o protección, será apropiado efectuar labores de aclareo con el objeto de obtener la densidad adecuada.

Una operación esencial es la eliminación de la vegetación que crece en forma silvestre en las proximidades del sistema radicular de los ejemplares plantados, que compite con estos por los nutrientes y la humedad.

Esta operación se efectúa manualmente, una o dos veces durante la estación de crecimiento en el primer año, o las veces que sea necesario para garantizar el surgimiento de las barreras y su establecimiento definitivo.

7.1.5.5. Siegas o podas de hojas: Como se ha mencionado, la principal característica del vetiver es su sistema radicular profundo y abundante. El manejo de esta especie recomienda realizar siegas o podas de las hojas, con el propósito de inducir mayor enraizamiento. Estas podas se pueden hacer cada 6 meses. En lugares donde se elaboran artesanías, las hojas son aprovechadas para la elaboración de manualidades.

7.1.5.6. Limitaciones y Enfermedades: El vetiver es extremadamente resistente, pero tiene algunas limitaciones:

Sombra, el vetiver no la tolera, o en otras palabras, la tolera muy poco. En condiciones de sombra crece más despacio, se establece con dificultad y es más sensible a factores adversos. No se pueden establecer plantaciones bajo árboles muy densos. El vetiver no puede competir con los árboles.

Plagas y Enfermedades: Es muy resistente, sólo se ve afectado en condiciones de debilidad, cuando por factores externos no crece bien. Por ejemplo la combinación de suelos muy poco profundos con sequía prolongada y/o sombra.

En estas condiciones se puede ver afectado por el ataque de algunos insectos (en sus áreas nativas), ataques de hongos en la raíz.

Termitas: Pueden ser un problema. Estos insectos se sienten atraídos por las partes secas de la planta y sus nidos, que forman montículos pueden sofocar las plantas. El control es sencillo, simplemente hay que eliminar el material muerto mediante una quema anual y controlada de las barreras

Limitada también por la falta de temperaturas altas en verano, condiciones extremas de frío en invierno (suelo congelado), la altitud (por encima de 2.500 en los trópicos y subtropicos no crece bien).

8. ALCANCES DEL SISTEMA VETIVER Y EXPERIENCIAS

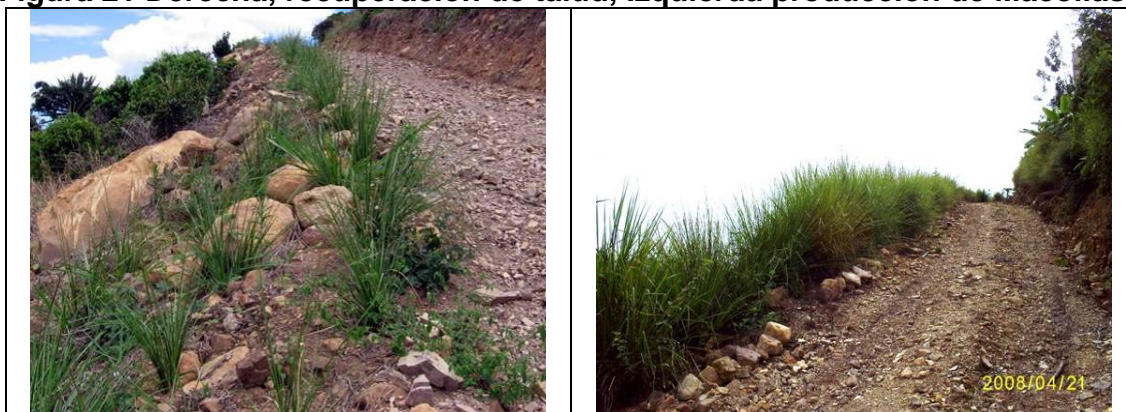
En Colombia, se está empezando a difundir y dar a conocer ampliamente en el ámbito ingenieril la "cultura vetiver", las entidades oficiales están comenzando a establecer el proceso normalizado de contratación de la actividad de revegetalización y estabilización de taludes con vetiver, el pasto recomendado por el Banco Mundial para la estabilización, recuperación de suelos y control de la erosión.

8.1. EXPERIENCIAS EN COLOMBIA

De las experiencias con el vetiver realizadas en Colombia, se encontraron textos de empresas que se han dedicado a la labor de la estabilización de taludes y riberas de corrientes de agua usando la planta.

La empresa Semicol ha estado desarrollando el producto, y presenta en su página de internet, las fotos características del macollamiento y la recuperación del talud usando el Sistema Vetiver (SV), (Figura 21) <http://www.semicol.co/centro-de-produccion-agroforestal.html>

Figura 21 Derecha, recuperación de talud, Izquierda producción de Macollas.



(Fuente, Semicol - 2012).

“Vetivernet en sus 11 años ha establecido más de 350.000 MI de barreras vivas de vetiver” Figura 22. <http://www.vetivernet.com/vetivernet-trabajos.html>

La empresa Vetiver Colombia Tejiendo Vida, realizó su trabajo con Vetiver contratado con la administración municipal “Construcción de barreras vivas sobre

los taludes adyacentes a la planta de tratamiento de aguas residuales sector las lajas del municipio de guateque de la jurisdicción de Corpochivor”

Figura 22 Cultivo Vetivernet - Tolima.



(Fuente, Vetivernet - 2012).

El sector cafetero, para sus siembras de cafetales en zonas de ladera de medianas pendientes, ha comenzado a implementar el uso del vetiver en barreras de contorno en el suelo de siembra, protegiendo así de manera eco sostenible sus cultivos frente a los deslizamientos y la erosión.

8.2. VENTAJAS DEL SISTEMA VETIVER (SV)

La mayor ventaja del SV sobre medidas convencionales de ingeniería es su bajo costo y larga vida útil.

Para la estabilización de taludes en China, por ejemplo, el ahorro está por el orden de 85-90% (Xie,1997 y Xia et al, 1999). En Australia, la ventaja en costos del SV sobre los métodos de ingeniería convencionales está en el rango de 64% a 72%, dependiendo del método usado (Braken y Truong 2001).

Sus máximos costos son sólo 40% de los costos de las medidas tradicionales. Adicionalmente, los costos anuales de mantenimiento son reducidos significativamente una vez que las barreras de vetiver se han establecido.

Como otras técnicas de bioingeniería, el SV es una barrera natural, ambientalmente amigable para el control erosión y estabilización de terrenos. Mejora la apariencia rígida de estrategias de ingeniería convencionales para la estabilización de taludes como las estructuras de concreto y de roca, siguiendo la tendencia paisajística de las obras de ingeniería de vanguardia, que mejoran los resultados y va de la mano con el avance de las mismas en términos medioambientales. (Figura 23 y Figura 24).

Figura 23. Estabilización taludes de vías - Malaysia.



(Fuente, Richard Grimshaw, picasaweb.google.com - 2012).

Figura 24. Izquierda, Zona Industrial - USA, Derecha Taludes - Senegal.



(Fuente, Richard Grimshaw, picasaweb.google.com - 2012).

La tecnología verde mejora en la medida que madura la cobertura vegetal. El SV requiere un sistema de mantenimiento en los primeros dos años; sin embargo, una vez establecido, será virtualmente libre de mantenimiento. Por lo tanto, por esta eficaz auto sostenibilidad, el uso del vetiver es particularmente apropiado para áreas remotas de condiciones difíciles de acceso o condiciones presupuestales difíciles en términos de inversión para mantenimiento.

El vetiver ha demostrado ser efectivo en suelos pobres, erosionables y separables.

A diferencia de la mayoría de las gramíneas, las raíces del vetiver crecen principalmente de manera vertical y alcanzan una profundidad de hasta 3 metros. (Figura 25)

Figura 25 Sistema radicular típico del Vetiver.



(Fuente, Paul Truong - 2008).

Ensayos de laboratorio de textos mundiales, indican en las raíces de la planta un valor aproximado de resistencia a la tensión de $75\text{MPa} = 765\text{ Kgs/cm}^2$, indicando que la planta Vetiver es una importante alternativa de estabilización de taludes aplicando bioingeniería, incrementando la resistencia al corte del suelo hasta en un 40%.

Vetiver tiene características de planta pionera, capaz de establecerse en suelos pobres y en condiciones climáticas adversas para la mayoría de otras plantas. Esto se evidencia en sus características tanto Xerofíticas como Hidrofíticas, su rango de pH es amplio 4-11. Además crece en zonas con precipitaciones medias

anuales de entre 200 y 6,000 milímetros y hasta los 2,000 msnm, resistiendo temperaturas de entre -14 a 55 grados C.

Desde el punto de vista de Gestión Ambiental en proyectos, el uso del vetiver es muy importante, ya que al ser éste una planta C4, con fotosíntesis modificada 50% más eficiente que el 90% de la flora mundial, contribuye con los créditos establecidos por el Protocolo de Kyoto en la realización de infraestructuras ecocompatibles. (Vetivernet, 2012).

En los años 2010 a 2012, Colombia estuvo sumida en una tragedia de tipo invernal por las intensas y largas precipitaciones que se presentaron en todo su territorio, en esta temporada de lluvias se evidenció la baja calidad de la estabilización de los taludes, principalmente aquellos que hacen parte de la infraestructura de las vías, los cuales presentaron colapsos y deslizamientos y que finalmente terminaron ocasionando una emergencia vial así como también derrumbes de viviendas donde se perdieron numerosas vidas humanas.

Teniendo en cuenta lo anterior, el Vetiver representa una importante alternativa de solución frente a los problemas de la baja calidad de la estabilidad de los taludes en Colombia. Se constituye entonces en una alternativa de Bioingeniería, eficiente, económica, que podría, de ser implementada, preparar al país para futuros eventos invernales. Esto permitiría ahorros a futuro de altas sumas de dinero en reparaciones tanto de taludes como de vías y sobre todo se evitaría la pérdida de vidas humanas por concepto de movimientos de tierras.

8.3. DESVENTAJAS DEL SISTEMA VETIVER (SV)

La principal desventaja de las aplicaciones del SV es su intolerancia a condiciones de sombra, específicamente en la etapa de establecimiento. La sombra parcial afecta su crecimiento; la sombra severa puede eliminar el vetiver al reducir su capacidad de competir con otras especies más tolerantes a la sombra. Sin embargo, esta debilidad puede ser deseable en situaciones dónde la estabilización inicial requiere de plantas pioneras que creen un micro ambiente que hospede la introducción espontánea o planeada de especies nativas endémicas (Vetivernet, 2012).

El Sistema Vetiver es efectivo hasta después que las plantas han quedado bien establecidas. Es necesario realizar una planificación efectiva, considerando un período de establecimiento de 2-3 meses en clima cálido y 4-6 meses en clima

frío. Para evitar retrasos, la siembra puede hacerse plantando con antelación, en la época seca si se dispone de riego.

Es necesario entonces planificar la obra, y tratándose de la estabilización de taludes, una vez se haga el corte de estos, seguir con la estabilización del talud para dar tiempo a que la planta se establezca y desarrolle paulatinamente su sistema radicular, para que empiece a funcionar como un estabilizador efectivo del talud cuando la obra civil entre en su etapa de uso final.

Las barreras de Vetiver son efectivas plenamente sólo cuando forman una barrera densa. Los huecos entre plantas deben ser replantados a tiempo.

Este sistema es difícil de establecer y regar en taludes de pendientes muy inclinadas y altas, mayores a 60 grados y en taludes con alturas mayores a 2 metros de alto, para lo cual será necesario usar mecanismos de trabajo en alturas con el debido sistema de poleas, arneses y demás elementos de seguridad industrial.

El vetiver, en su fase tierna antes de que se establezca en el suelo, requiere protección del ganado.

8.4. ALCANCES DEL SISTEMA VETIVER

Los programas (software) desarrollados por Prati Amati, Srl (2006) en colaboración con la Universidad de Milán determinan el porcentaje o valor de las fuerzas de resistencia al corte que las raíces añaden a varios suelos con barreras de vetiver. El programa ayuda a evaluar la contribución para estabilizar taludes inclinados, particularmente diques de tierra. En condiciones promedio de pendiente y suelo, la plantación de las barreras de vetiver incrementa la estabilidad de la pendiente en un 40%. La utilización del programa requiere que el operador introduzca los siguientes parámetros geotécnicos relacionados con un sitio particular (Vetivernet, 2012).

- Tipo de suelo.
- Grado de la pendiente.
- Máximo contenido de humedad
- Cohesión del suelo en su valor mínimo.

El programa indica el número de plantas por metro cuadrado requeridas así como el distanciamiento entre hileras, considerando el grado de la pendiente.

Figura 26 Talud con riesgo de deslizamiento y pérdida de vidas humanas, y estabilización con concreto. Lebrija – Girón, Santander



(Fuente, Autores - 2012).

Los parámetros a tener en cuenta a la hora de desarrollar el diseño de la estabilización de una ladera o de un talud, usando el sistema Vetiver, entre otros, son principalmente aquellos que tienen que ver con la morfología, la geotecnia, el grado de meteorización, la composición química, la estructura granulométrica, las condiciones topográficas y de escorrentía del suelo.

Es necesario tener en cuenta los riesgos que se corren al utilizar esta metodología de estabilización de taludes, puesto que no podría ser usada para estabilizar taludes en los que se corra el riesgo de deslizamiento y posterior pérdida de vidas humanas. En la Figura 8.6, se observa el contraste entre un talud sin tratar, con riesgo de pérdidas de vidas humanas y otro talud tratado con elementos en concreto.

8.4.1. Interacción Vetiver - Talud

Existen diferentes tipos de taludes de acuerdo a lo observado en el primer capítulo. Su estabilidad dependen de diversos factores entre los que se encuentran la topografía propia del talud, aquí se puede observar la pendiente del talud, el grado de inclinación, la altura del talud. Es necesario observar esta

variable pues la resistencia que le pueda otorgar la planta al talud para que este no presente movimientos va a estar limitado por estas condiciones.

Figura 27 Izq, Talud vía sustitutiva Hidrosogamoso, Der. Talud vía Lebrija – Girón - Santander.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 28 Talud de alta pendiente con Vetiver - Java



(Fuente, Gobierno Indonesia - 2007).

La literatura indica que la planta tiene un buen comportamiento en taludes inferiores a 60 grados, de otra forma será necesario aplicar una técnica combinada de biotecnología con elementos estructurales a base de roca o concreto. En la figura 8.7 a la izquierda muestra un talud sin revegetalizar, a la derecha se muestra un talud revegetalizado usando una alternativa de bioingeniería a base de una gramínea diferente al Vetiver. En la figura 8.8 se muestra un talud de alta pendiente estabilizado con Vetiver.

La composición granulométrica del talud también es un factor a tener en cuenta para determinar el diseño de la biotecnología a usar. Taludes que están

compuestos por roca, roca fracturada, bloques, cantos de roca y elementos de gran tamaño no podrán ser estabilizados con la planta, debido a que por efecto de las raíces se podrían presentar agrietamientos en la roca fracturada y futuros desprendimientos del material, así como también desprendimiento de los elementos de gran tamaño que componen el talud (Figura 29).

Figura 29 Taludes con elementos de gran tamaño, vía Lebrija – Giron - Santander.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 30 Taludes con deslizamientos o lavados, vía Lebrija – Giron - Santander



(Fuente, Autores - 2012).

Aquellos taludes que tienen granos tipo grava y que han sufrido procesos de lavado o han sufrido procesos previos recientes de traslación (Figura 30), tampoco podrán ser estabilizados con Vetiver, ya que estos últimos presentan baja estabilidad y alta susceptibilidad al movimiento al presentarse las lluvias. Las situaciones anteriores son de cuidado pues son limitantes para el uso de la

especie por si sola como una técnica de bioingeniería; será necesario combinarla con tecnologías de estabilización con elementos inertes.

Es necesario estabilizar los taludes apenas estos sean cortados, ya que si no se procede a tiempo se presentan surcos y cárcavamientos que dificultan la labor de estabilización. En la figura 31 se evidencia lo que sucede cuando no se aplican las medidas preventivas a tiempo para evitar la erosión del material.

Figura 31 Erosión prematura del Talud Vía sustitutiva Hidrosogamoso - Santander.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 32 Taludes revegetalizados sin Vetiver y sin canales de manejo de escorrentías, vía Lebrija – Girón - Santander.



(Fuente, Autores - 2012).

Algunos taludes son debidamente revegetalizados, pero carecen de una adecuada protección contra corrientes de agua en eventos de precipitación, lo que genera desprendimientos de material combinados con el desprendimiento de las plantas.

La figura 32 muestra un incompleto tratamiento de las aguas de escorrentía que causo desprendimiento de material.

La figura 33 muestra taludes susceptibles de estabilización usando el vetiver, de manera, que el vetiver actúe en solitario o en combinado. Siempre será recomendable usar una planta que sea de características invasivas como el mani forrajero o pastos brachiaria, que se localice entre barreras de vetiver y a su vez se establezcan canales para manejo de escorrentía. De esta manera se establecería una solución integral a la estabilidad y control de erosión del talud.

Figura 33 Taludes susceptibles de estabilización con Vetiver, Izq Vía Cúcuta – Bucaramanga, Der. Via sustitutiva Hidrosogamoso.



(Fuente, Autores - 2012).

8.4.2. Precauciones técnicas

- Para asegurar el éxito, el diseño debe ser realizado o supervisado por personas entrenadas.
- Al menos por los primeros meses, mientras las plantas se establecen, el sitio debe ser estable internamente en contraposición a la ocurrencia de fallas. El vetiver manifiesta sus plenas capacidades cuando madura, y las pendientes pueden fallar durante el período de establecimiento.
- El vetiver crece con dificultad en la sombra, por lo tanto debe evitarse plantarlo directamente debajo de un puente u otro tipo de estructura que proporcione sombrío.
- Tiempo: la planificación debe considerar las estaciones o temporadas y el tiempo que le toma crecer a los esquejes plantados.

- Mantenimiento y reparación: en etapas tempranas, hay un período durante el cual todavía el vetiver no es efectivo. La planificación y el presupuesto deben anticipar el remplazo de algunas plantas.
- Suministros: Todos los insumos pueden y deben ser suministrados localmente (mano de obra, abonos orgánicos, material de plantación, contratos de mantenimiento). Las oportunidades de empleo dan un incentivo a las comunidades locales para proteger las plantas durante su crecimiento inicial, y para mantener la calidad y sustentabilidad de los trabajos.
- Participación de la Comunidad: tanto como sea posible, las comunidades locales deben ser incluidas en el diseño, mantenimiento, suministro de materiales, y etapas de mantenimiento. Los contratos con personas de la localidad deben ser definidos, señalando viveros, especificaciones de calidad/cantidad, y mantenimiento/protección.
- Oportunidad: Los que toman las decisiones deben estar listos para innovar y considerar el SV en la planificación y el presupuesto. Para ello, se necesitan incentivos para incluir esos métodos eficientes en los costos de sus planes, tal como se tienen incentivos, justificables o no, para adoptar métodos convencionales más costosos.
- Integración: Los dirigentes políticos deben recomendar el Sistema Vetiver como parte de un enfoque integral de la protección de infraestructuras y el entorno amigable con el medio ambiente, aplicado a una escala de suficiente tamaño que asegure un incremento tangible en experticia y un efecto gradual de diseminación. El vetiver no debe ser considerado meramente como un estabilizador para sitios localmente comprometidos, a pesar de su habilidad de generar un efecto conciso e inmediato (Vetivernet, 2012).

9. CASO PRÁCTICO DE APLICACIÓN EN TALUDES EN CANAL DE ADUCCIÓN

9.1. ANTECEDENTES

El sistema de abastecimiento de acueducto para el Área Metropolitana de Bucaramanga, manejado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb), capta agua de los ríos Tona, Surata y Frio.

El río Frio suministra el agua para la zona sur de los municipios de Bucaramanga y Floridablanca. El agua es captada por medio de una bocatoma de fondo construida a principios del año 2002 y aprovechando la antigua bocatoma lateral que la Cervecería Clausen instaló en el Río Frío y conducida por gravedad, por un canal de aducción abierto de concreto y piedra, que se conservan en buenas condiciones. A lo largo de la conducción del canal abierto se encuentran dos desarenadores más que ayudan a separar el material de arrastre del agua cruda (Figura 34).

Figura 34 Captación y canal de aducción.



(Fuente, Autores - 2012).

El agua del último desarenador es transportada por gravedad, a través de 3 tuberías paralelas de asbesto-cemento. Dos de estas de 14" de diámetro y una longitud de 965 metros, que alimentan la Sección Original con un caudal de 400 Lps y una tercera tubería de 16" de diámetro, que alimenta la Sección de Ampliación con un caudal de 220 Lps, para un total de 600 l/s.

El canal de aducción está construido a media ladera siguiendo la margen derecha y en curva de nivel, con pendientes que no superan el 2%. Para su construcción fue necesario hacer cortes en la ladera, conformándose taludes, con pendientes mayores a 60 grados (Figura 9.2), que sufrieron deslizamientos en las pasadas olas invernales, dejando al descubierto el material parental y exponiéndolo a las condiciones climáticas del lugar.

Figura 35 Deslizamientos en taludes del canal de aducción.



(Fuente, Autores - 2012).

Para evitar daños al canal de aducción, en el inicio del 2º semestre de 2.011, se realizaron trabajos de estabilización de los taludes afectados, consistente en la empradización con una cobertura vegetal, utilizando la especie Maní Forrajero (*Arachis pintoi*), para evitar erosión laminar y la formación de cárcavas, que afectarían la estabilidad de la estructura de canal (Figura 35).

Seis meses después de la siembra del maní forrajero, los taludes están totalmente estables (Figura 36). Sin embargo se consideró que para aportar mayor estabilidad a los taludes, la cobertura vegetal establecida es insuficiente, ya que es una planta invasora superficialmente que desarrolla raíces poco profundas. Como consecuencia de ello surgió la opción de establecer barreras protectoras en

curvas de nivel utilizando la especie vetiver (*Vetiver zizanioides*), aprovechando las propiedades de esta gramínea, ya descritas en capítulos anteriores.

Figura 36 Taludes estabilizados con biotecnología, Maní forrajero y Guadua.



(Fuente, Autores - 2012).

9.2. ÁREA DE ESTUDIO

La planta de Floridablanca se localiza en la zona Sur-oriental del Área Metropolitana de Bucaramanga, en la parte alta del Barrio Caracolí del municipio de Floridablanca, a una altura media de 1042 msnm.

Su construcción se inició alrededor de los años 1970 – 1971; y se optimizó para aumentar la capacidad de agua tratada en los años de 1976 -1977 y ampliada para tratar todo el caudal aprovechable del Río Frío, en los años de 1982 – 1983. El agua del río Frío es captada y conducida por un canal de aducción con una longitud de 1.2 km, localizado al oriente de la planta de tratamiento, cuyo acceso se realiza por el barrio Caracolí. Una vez se llega a la planta, el acceso al canal se realiza por camino peatonal.

El canal de aducción está construido a media ladera por la margen derecha del río Frío y a lo largo de la conducción, atraviesa un sector boscoso que forma parte de una reserva forestal perteneciente al predio rural La Esperanza, propiedad de la

autoridad ambiental (Corporación Autónoma Regional de la Meseta de Bucaramanga - cdmb).

9.3. CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES

La microcuenca del río Frío alcanza una extensión aproximada de 11.890 Hectáreas, abarcando sectores del Macizo de Santander y de la zona intermontana de Bucaramanga. En ella se ubica la mayor parte del territorio municipal de Floridablanca, que incluye su área urbana y rural.

Alcanza altitudes que varían de 800 a 3.000 metros, con precipitaciones que varían de 1.000 a 2.000 mm y temperaturas que oscilan de 10 a 25°C; parámetros que le imparten a la microcuenca diversos climas ambientales: cálido semiseco, medio semihúmedo a muy húmedo y frío muy húmedo.

La zona de estudio que comprende el canal de aducción del sistema de tratamiento del río Frío, se localiza entre los 1.030 y 1.060 msnm.

9.4. CLIMATOLOGÍA

La parte alta de la Microcuenca Río Frío está caracterizada climatológicamente por las estaciones CO Rasgón (temperatura, humedad, brillo solar) y PM La Galvicia (precipitación).

La parte baja de la microcuenca Río Frío está caracterizada por la Estación CO PTAR, ubicada en la margen derecha del río, sobre la vía anillo vial Floridablanca - Girón, a una altitud de 785 msnm. Se anexa tabla xx, con con los parámetros climáticos de las estaciones climatológicas que funcionan en la zona.

9.4.1. Precipitación

En la parte alta de la microcuenca el régimen de lluvias en la zona es de tipo bimodal, con dos temporadas lluviosas al año: la primera se extiende desde mediados de abril a mitad del mes de junio y la segunda de mitad de agosto hasta mediados de noviembre; durante el resto del año se observa dos períodos secos: el primero de diciembre a marzo y el segundo, menos severo entre junio a julio.

Tabla 8: Precipitación mensual Estación CO La Esperanza. (1020 msnm).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1990	47,9	54,1	214,2	134,9	77,6	51,0	98,0	104,1	123,7	182,4	188,8	88,2	1364,9
1991	77,4	71,9	132,1	74,3	178,7	100,2	83,9	60,7	108,7	134,7	125,7	73,0	1221,3
1992	88,7	33,6	63,3	82,5	154,4	74,9	77,7	77,7	46,5	65,6	168,2	58,5	991,6
1993	205,5	114,7	127,5	152,7	201,6	67,7	78,9	44,9	99,9	79,3	182,5	13,9	1369,1
1994	193,1	115,1	139,8	127,6	300,8	87,3	106,8	139,0	190,3	117,5	127,3	46,8	1691,4
1995	16,7	113,6	155,1	99,3	116,2	130,9	103,8	109,0	65,9	279,8	52,2	85,4	1327,9
1996	21,9	60,1	103,7	89,0		78,2	77,1	73,8	90,6	180,9	99,1	79,6	954,0
1997	70,4	65,9	158,8	77,5	184,6	90,9	70,1	76,0	183,1	110,1	85,1	87,1	1259,6
1998	176,2	12,0	74,0		225,6		162,6		113,1		52,1		815,6
1999	60,0	122,6	124,1	65,0		128,1	140,2	138,7	223,2	154,5	181,5	128,3	1466,2
2000	165,8	106,6	184,2	43,2	259,7	76,8	191,9	94,7	190,6	92,5	59,9	69,6	1535,5
TOT	1123,6	870,2	1476,8	946,0	1699,2	886,0	1191,0	918,6	1435,6	1397,3	1322,4	730,4	
X	102,1	79,1	134,3	94,6	188,8	88,6	108,3	91,9	130,5	139,7	120,2	73,0	1351,1

(Fuente, CDMB, 2006)

En la Tablas 8, se presentan los datos correspondientes a la estación CO La Esperanza, localizada en la parte baja de la Microcuenca, para el periodo comprendido entre 1990 y 2000, observándose una precipitación media anual de 1.351 mm.

9.4.2. Temperatura

La temperatura media anual de la zona de trabajo, registrada en la estación climatológica de la Esperanza es de 22.6 °c, como se observa en la tabla 9.

Tabla 9: Temperatura Media Estimada.

ESTAC	Esperan	Club Camp.	PTAR
CODIG	2319521	2319079	2319515
msnm	1020	940	785
ENE	22,9	23,4	24,5
ENE	22,9	23,4	24,5
FEB	23,0	23,5	24,6
MAR	23,2	23,7	24,7
ABR	23,4	23,9	25,0
MAY	23,2	23,7	24,7
JUN	23,1	23,6	24,6
JUL	23,1	23,7	24,7
AGO	22,9	23,5	24,5
SEP	23,0	23,5	24,6
OCT	22,9	23,4	24,4
NOV	22,6	23,1	24,0
DIC	22,4	22,9	23,9
ANUAL	22,6	23,2	24,2

(Fuente, CDMB, 2006)

9.4.3. Humedad del aire

Para la parte baja de la microcuenca se pueden correlacionar los datos de humedad relativa reportados en la Estación CP UIS donde el promedio es de 82%, con una oscilación promedio entre 69 % y 90 %.

La humedad relativa promedio en la Estación CO PTAR es de 85 % con oscilación entre 81% y 91%.

9.4.4. Radiación solar

El promedio anual de Brillo solar para la estación CP UIS, correlacionable con el sector Norte y bajo de la microcuenca es de 1435.8 horas. Los meses de noviembre, diciembre y enero presentan los mayores valores de insolación, debido a la disminución de la nubosidad.

El promedio anual de Brillo solar para la Estación PTAR es de 1700 horas. Los meses de noviembre, diciembre y enero presentan los mayores valores de insolación.

9.4.5. Fitogeografía

La zona corresponde a una zona de transición entre el bosque húmedo tropical y el bosque húmedo premontano, del sistema de clasificación de L.R. Holdridge, con base en los datos climáticos de temperatura, precipitación y humedad.

El bosque en la faja del canal de aducción presenta baja intervención y conserva especies valiosas para el ecosistema como caracolíes, guamos, lecheros y un abundante sotobosque, que genera una cobertura protectora en esta zona de altas pendientes.

9.5. GEOMORFOLOGÍA

La microcuenca presenta predominantemente una topografía de pendientes empinadas, con divisorias de aguas agudas y fenómenos de erosión relativamente intensos, que corresponde a la zona de trabajo.

9.6. SUELOS

En la microcuenca se encuentran las unidades del paisaje de Montaña; al igual que las unidades del Valle, formado por el Río Frío, al sur de la ciudad de Floridablanca hasta su desembocadura en la Microcuenca Oro Bajo.

La topografía es fuertemente escarpada, con pendientes superiores al 75% y las tierras están afectadas por procesos de movimientos en masa, especialmente deslizamientos y solifluxión.

Los suelos en su mayoría son profundos, limitados por roca metamórfica (gneis) y/o ígneas (cuarzomonzonita), bien drenados, de textura variada, preferentemente arcillo arenosa gravillosa. Tienen reacción muy fuertemente ácida y fertilidad baja. Tienen limitaciones muy severas y continuas que no pueden ser corregidas: fuertes pendientes, susceptibilidad a la erosión (movimientos en masa).

Los suelos corresponden a suelos residuales con perfil de meteorización profundo a muy profundo y gran cantidad de estructuras heredadas. La mayoría de los suelos corresponden a arenas arcillosas y limosas de color claro.

Estos suelos de laderas rectilíneas y profundas se deben destinar a la conservación de la vegetación arbórea y a la reforestación con bosque productor.

En los taludes denudados la presencia de materia orgánica es baja o casi nula, debido a la remoción del suelo por los deslizamientos presentados.

9.7. SELECCIÓN DE ESPECIE

La especie elegida para la estabilización de los taludes es la gramínea vetiver (*Vetiveria zizanioides*), plantada por el método de raíz desnuda, para lo cual el amb, estableció un área productora de los esquejes, que serán plantados en el área de estudio.

9.8. OBJETIVOS QUE SE PERSIGUEN

La zona de estudio, tiene suelos de alta pendiente y muy frágiles, susceptibles de deslizamientos cuando se saturan de humedad, teniendo en cuenta las precipitaciones del lugar. El objetivo principal que se persigue, consiste en aportar mayor estabilidad a los taludes por los cuales atraviesa el canal de aducción que conduce el agua para una importante población del área metropolitana de Bucaramanga, con lo cual se busca garantizar el continuo e ininterrumpido suministro de agua potable.

9.9. PREPARACIÓN DEL TERRENO

Para el establecimiento de las barreras de vegetación con la especie vetiver, se eligieron dos taludes localizados por debajo del canal de aducción, empradizados con maní forrajero (Figura 37). Se eliminó las malezas y se realizó el hoyado para la siembra, con distancias de 15 cm entre planta, y con un intervalo vertical de 1.5m, teniendo en cuenta la pendiente aproximada del 60%.

Figura 37 Taludes elegidos para establecer barreras con vetiver.



(Fuente, Autores - 2012).

9.10. SIEMBRA DE ESQUEJES

La producción de los esquejes a raíz desnuda siguió la secuencia descrita en el capítulo de propagación vegetativa de la especie.

Una vez producidos los esquejes se sumergieron en agua durante 5 días para inducir nuevas raíces y se llevaron al sitio de plantación (Figura 38). En campo se mantuvieron bajo sombra hasta su siembra, aprovechando la época de lluvias del I semestre de 2.012.

Figura 38 Esquejes enraizados de vetiver listos para plantación.



(Fuente, Autores - 2012).

Para garantizar el prendimiento de los esquejes una vez plantados, se añadió a cada sitio de plantación 5 grs de hidrogel hidratado (Figura 39). Este acondicionador permite retener la humedad del suelo y disponerla para la planta, en tiempos de déficit hídrico como en verano (Figura 40).

Enseguida de la adición del retenedor de humedad se plantó el esqueje de vetiver, procurando apisonarlo y asegurar el contacto de las raíces con el suelo húmedo, siguiendo las curvas de nivel del talud objeto de trabajo (Figura 41).

Figura 39 HidroGel hidratado y aplicado al sitio de plantación.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 40 HidroGel hidratado y aplicado al sitio de plantación.



(Fuente, Autores - 2012).

Figura 41 Esquejes de vetiver plantados en curva de nivel.



(Fuente, Autores - 2012).

9.11. MEJORAS EDÁFICAS

Figura 42 Mejora edáfica con el aporte de materia orgánica compostada.



(Fuente, Autores - 2012).

Teniendo en cuenta que los suelos fueron arrastrados por los deslizamientos y no se tiene contenido de materia orgánica en los taludes, se adicionó 200 grs de materia orgánica compostada al momento de la plantación de los esquejes en uno de los taludes (Figura 42 y Figura 43); el otro talud plantado servirá como testigo. En campo se identificaron, con el propósito de evaluaciones posteriores.

Figura 43 Barrera de vetiver establecida con Mejora edáfica.



(Fuente, Autores - 2012).

9.12. CUIDADOS POSTERIORES DE LA PLANTACIÓN.

Como se menciona en capítulos anteriores, el establecimiento de las barreras de vetiver, debe contemplar labores posteriores que aseguren su desarrollo adecuado hasta que pueda auto mantenerse.

Estas labores son riego, fertilización, resiembra, Aclareo y eliminación de malezas y siegas o podas.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La bioingeniería tiene en esta gramínea especial (*Vetiveria zizanioides*) un apoyo y una herramienta invaluable de bajo costo y fácil manejo, en la estabilización de taludes y para el control de la erosión.

En las condiciones inherentes al manejo de taludes, (como pendiente y escorrentía por mencionar solo dos de las más importantes) que dificultan la estabilización, la vegetación arbustiva y arbórea presenta problemas por el peso y tamaño una vez establecidas, apareciendo el vetiver entonces como una alternativa eficiente, teniendo en cuenta el bajo peso del follaje y su poderoso sistema radicular.

El sistema vetiver puede ser utilizado eficientemente en taludes de pendiente entre 30 y 60 grados. De otra manera es necesario combinarlo con métodos mecánicos de estabilización.

Los mejores resultados en el crecimiento del vetiver, se presentan en suelos profundos con texturas mixtas, donde las raíces logran sus máximos crecimientos y muestran su poder de penetración y resistencia a la tracción.

Mejora el aspecto paisajista en obras civiles, permitiendo la cobertura vegetal para la contemplación pasiva.

El sistema radicular masivo y delgado que es su mayor propiedad, le permite colonizar gran cantidad de escenarios edáficos, convirtiéndolo en una especie particular en el manejo de suelos.

Por tratarse de una especie introducida se puede estar mirando con cierta falta de confianza, teniendo en cuenta sus aparentes conflictos con el ambiente en que crece, como la creencia que ahuyenta la fauna del lugar (culebras y roedores). Estas propiedades pueden ser aprovechadas como ventajas, para mantener alejadas a estas especies de animales, que normalmente causan repulsión en la población y son vistas como plagas.

Más importante aun es la posibilidad que brinda de establecer barreras en curvas de nivel que protegen los suelos y permiten conservar la humedad, especialmente en laderas, donde se concentra la pequeña y mediana agricultura de este país, que pierde inmensas cantidades de nutrientes cada año, por la erosión laminar.

Por su adaptación a un amplio rango de suelos y condiciones de humedad, y su sistema de raíces profundas, se facilita su utilización en múltiples afectaciones a los suelos, que permitiría un manejo apropiado de los mismos, tanto en agricultura como en pequeñas obras de ingeniería, causantes de incontables daños al medio natural.

Otros beneficios adicionales del vetiver aparte de la aplicación en bioingeniería, está en la generación de recursos económicos cuando se aprovechan sus hojas perdurables en la elaboración de artesanías y sus raíces en aceites esenciales y perfumería.

A pesar de todas las características benéficas de la especie encontradas en la revisión y consignadas en esta monografía, se observa una pobre utilización de la especie dentro del territorio Colombiano, por lo cual se le debe dar a conocer y difundir sus múltiples usos.

Como el pasto vetiver puede emplearse en trabajos interdisciplinarios, se sugiere a los ingenieros que sientan la necesidad de contar con asesoramiento sobre las técnicas de plantación, que contraten a profesionales idóneos o busquen la asesoría necesaria para sembrar y dar mantenimiento al vetiver.

En el manejo de las áreas para la producción de esquejes, es recomendable manejar mayores distancias de siembra entre matas (0.5m a 1m por ej.) y entre calles (1m), que permiten mejor desarrollo vegetativo de las “macollas” y fácil manejo de las prácticas culturales del cultivo (fertilizaciones, deshierbes, podas etc.).

Igualmente mayores distancias de siembra, permiten fácil desplazamiento por el cultivo teniendo en cuenta que el borde de las hojas está provisto de finas sierras que causan escozor y pequeñas heridas en la piel.

Esta característica de las hojas si se observa positivamente, se puede aprovechar en el cerramiento de lugares, como canales, acequias, conducciones, para evitar

el paso de semovientes y personas, a un costo bajo y sin reposiciones permanentes.

La especie *V. zizanioides*, no produce semillas, razón por la cual solo crecerá donde sea plantada por el hombre, siendo necesario realizarle unos mínimos cuidados y mantenimiento por lo menos durante el primer año de establecimiento del cultivo, hasta que sea auto sostenible.

En el control de la erosión en taludes teniendo en cuenta que el vetiver no es una planta invasiva, es apropiado usar una especie vegetal complementaria, que cubra la superficie entre las barreas de Vetiver establecidas, haciendo más efectiva la protección del suelo.

Es necesario reconocer las características del talud en cuanto a su morfología, topografía, condiciones de meteorización, composición granulométrica entre otros, y determinar con estos parámetros, si es apto o no para ejecutar en él la debida estabilización usando Bioingeniería basada en el Vetiver. Puesto que a pesar que el Vetiver es una planta integral y eficaz en la estabilización de los taludes, presenta como cualquier otra técnica, sus limitantes y es necesario conocerlas para dar un adecuado manejo.

Igualmente la cobertura vegetal se debe comenzar a establecer paralelamente a la conformación de los taludes recién construidos, de esta manera en la medida que las plantas se van estableciendo, se irá al mismo tiempo desarrollando la obra civil, de manera tal que se pretenda que tanto obra civil como estabilización del talud entren en funcionamiento al mismo tiempo después de acabadas las labores.

Se estableció una experiencia práctica, en la estabilización de los taludes del canal de aducción de la planta de tratamiento de Floridablanca (Santander), a la cual es recomendable hacerle seguimiento y analizar los resultados de campo, en el enraizamiento y estabilización de los taludes.

Realizar un modelo físico-matemático computacional, para analizar la densidad radicular, profundidad y resistencia a la tracción de las raíces, establecer éste modelo de forma tal que se pueda modelar el comportamiento de talud de la experiencia bajo los efectos estabilizadores del Vetiver cuando éste se supone este totalmente establecido.

Sin lugar a dudas se está frente a una de las especies más benéficas provista por la naturaleza, y que le facilitan la tarea al hombre en su empeño por reparar los daños que causa diariamente a su entorno natural.

BIBLIOGRAFIA

- BANCO MUNDIAL. 1.993. Vetiver: la barrera contra la erosión. Fourth Edition. Traducción de la tercera edición del original en inglés, Vetiver Grass: The Hedge against Erosión, publicada en febrero de 1990. Washington, USA. Primera edición en español, diciembre de 1990 Tercera edición en español, abril de 1995.
- CORPORACION AUTONOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA - CDMB. 2.006. Estudio Plan de Ordenamiento Ambiental de la Subcuenca del Río de Oro. Informe final: Caracterización Biofísica, Socioeconómica, Evaluación, Prospectiva, Zonificación ambiental, Formulación y Proyecto de Acuerdo del Estudio Plan de Ordenamiento de la Subcuenca Río de Oro.
- CENTENO PULIDO, F.A. 1.985. Ingeniería Biotécnica y Bioingeniería. Nuevas tendencias de la geotecnia para las obras de tierra, la estabilización de taludes y el control de la erosión. Del Estado del Arte a la Práctica. XVII Seminario Venezolano de Geotecnia. Universidad Metropolitana. Caracas Venezuela.
- FONSECA, R., DIAZ, C., CASTILLO, M., CANDIA, J.R. and TRUONG, P. 2.006. Vetiver grass para la rehabilitación de sitios mineros en Chile: Resultados preliminares. Fundación Chile, Santiago, Chile.
- GARCIA ROJAS J. A. Y DAZA JIMENEZ, C. R. 2.010. Pasto vetiver para control de erosión y estabilización de taludes. (Área de Investigación y Desarrollo), BIOMACOL & CONSULTORES S.A.S. Tolima, Colombia.
- GREENFIELD, J.C. 2.003. Vetiver Grass, an essential grass for the conservation of planet earth. USA.
- HENGCHAOVANICH, D. 1998 El pasto vetiver en la estabilización de pendientes y el control de la erosión. (Con Énfasis especial en las aplicaciones de ingeniería). APT Consult Co. Ltd. Bangkok, Tailandia.

- INVIAS. 2.003. Estudio de investigación del estado actual de las obras de la red vial nacional de carreteras. Convenio Inter administrativo 0587. Universidad Nacional.
- MOSCOSO GUERRERO, F.J. 2.003. Principios y Fundamentos para la aplicación de Bioingeniería de suelos en taludes de corte. Universidad de Santiago, facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Geográfica, Chile.
- ORIHUELA, J.A. 2.007. Manual sobre el uso y manejo del Grass Vetiver (*Chrosopogon zizanioides*). Organización Panamericana de la Salud, Lima Perú.
- RINCON, L.2.009. Uso del Vetiver en la recuperación de áreas críticas en suelos de minas de Bauxita en Venezuela. Fundación para la formación de Investigadores en Venezuela. Doctorado en ciencias ambientales. Seminario "Tecnología Agroambiental". Ciudad Guayana.
- SERRANO GOMEZ, J.A. 2.006. Bioingeniería como ayuda a la solución de estabilización en taludes que presenten una amenaza geotécnica en la escarpa occidental de la meseta de Bucaramanga. Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de Especialista en Ingeniería Ambiental. UIS. Bucaramanga.
- SUAREZ DIAZ, J. 2.001. Deslizamientos y estabilidad de taludes en Zonas Tropicales. Bucaramanga, Colombia.
- _____ 2.001. Control de Erosión en Zonas Tropicales. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Escuela de Ingeniería Civil UIS. Bucaramanga, Colombia.
- THE WORD BANK. Vetiver Grass: The Hedge against Erosion. Fourth Edition 1,993. Washington, USA.

WEBGRAFIA

- http://www.nacionaldeprados.com/otros_servicios.php
- http://es.wikipedia.org/wiki/Vetiveria_zizanioides
- <http://es-es.facebook.com/pages/Vetiveria-zizanioides/112490688766074>
- <http://www.herbotecnia.com.ar/exo-vetiver.html>
- <http://prvn.rdpb.go.th/files/EB22es.pdf>
- <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/ibc99/botanica/botanica/taxonomi.htm>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Bot%C3%A1nica>
- http://www.magrama.es/imagenes/es/0904712280144dc9_tcm7-19648.pdf
- <http://www.ecoclimatico.com/archives/la-planta-vetiver-muy-util-para-la-conservacion-del-suelo-y-el-agua-508>
- http://www.elcolombiano.com/BancoConocimiento/E/el_vetiver_agarra_el_suelo_flojo/el_vetiver_agarra_el_suelo_flojo.asp
- <http://www.ecoclimatico.com/archives/la-planta-vetiver-muy-util-para-la-conservacion-del-suelo-y-el-agua-508>
- <http://www.umoar.edu.sv/> guía técnica para el cultivo de “Vetiver”
- <http://www.agrodesierto.com/vetiver.html>