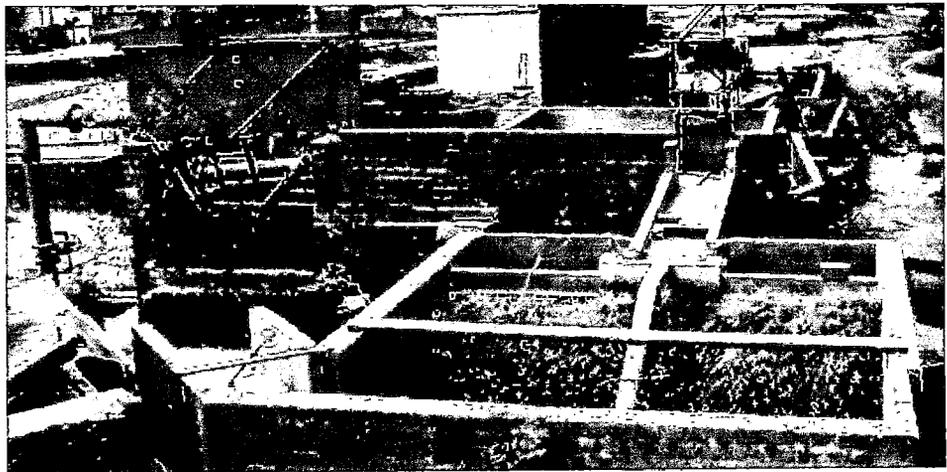


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



USO DE LA BIOINGENIERÍA DE SUELOS PARA EL CONTROL DE EROSIÓN HÍDRICA EN TALUDES

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil



LUIS ALBERTO DE LA CRUZ FALLAQUE

LIMA, PERÚ
2005

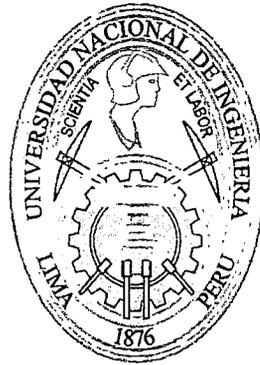
Digitalizado por:

Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse

© 2005. Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados.

*A mis padres,
quienes con mucha entrega,
me dieron con amor todo su apoyo y confianza.*

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



USO DE LA BIOINGENIERÍA DE SUELOS
PARA EL CONTROL DE EROSIÓN
HÍDRICA EN TALUDES

Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil

LUIS ALBERTO DE LA CRUZ FALLAQUE

LIMA, PERÚ
2005

Resumen

De La Cruz Fallaque, L. A. (2005) *Uso de la Bioingeniería de Suelos para el Control de Erosión en Taludes*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

La presente tesis de investigación se introduce en el uso de la vegetación como elemento de diseño en Control de Erosión, resaltando las ventajas y limitaciones que esta moderna rama pueda tener. Este trabajo consistió de una parte de investigación bibliográfica y otra de investigación experimental en laboratorio; es importante destacar que en la investigación bibliográfica fue necesario entrar a detalle por ser esta tesis una de las pioneras en el Perú.

En la investigación experimental se describen los procedimientos y resultados de los ensayos realizados en laboratorio, para evaluar el uso de pastos sin refuerzo adicional y pastos reforzados con geosintéticos, en taludes sometidos a la erosión del flujo superficial producto de las lluvias. Para hacer una comparación, también se probaron taludes de suelo sin protección. La especie herbácea usada fue Tanzania (*Panicum Maximum*), que es una variedad amazónica, y el tipo de suelo fue limoso arenoso sin cohesión.

Las pruebas consistieron en escurrir diferentes descargas en taludes con similar topografía, tipo de suelo y con las coberturas mencionadas en el párrafo anterior. De cada prueba se obtuvieron parámetros de erosión, los cuales fueron usados para evaluar el uso de cada condición.

El comportamiento y la protección de un pasto en control de erosión, varía con el incremento del esfuerzo cortante hidráulico que está en función del caudal de escorrentía. Si el incremento de esfuerzo cortante es considerable, el pasto puede fallar siendo arrastrado por el flujo, en este caso es necesaria la protección adicional.

© 2005. Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

Abstract

De La Cruz Fallaque, L. A. (2005) *Use of Soil Bioengineering for Slope Erosion Control*. Thesis presented for the professional degree of Civil Engineer. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Peru.

This research introduces itself in the use of vegetation how design element in Erosion Control, abstracting the attributes and limitations that this modern application can have. This work consisted of two parts, one of bibliographic investigation and other of experimental testing in laboratory, it is important to rebound that in the bibliographic investigation was necessary enter to some detail because this thesis is one of the pioneers of Peru.

In the experimental testing describe itself the procedures and results of the tests realized in laboratory, for value the use of grass without additional reinforcement and grass reinforced with geosynthetics, in slopes submit to runoff erosion, product of the rain. For make a comparison, there were test with bare slopes. The grass used was Tanzania grass (*Panicum Maximum*), it is a Amazonian specie, and the soil was slime with sand and without cohesion.

The tests consisted to circulate different discharges in small slopes with similar topography, type of soil and with the covers enunciated in the last paragraph. For each test obtained itself erosion parameters, its were used for evaluated each condition.

The comportment and the protection of the grass, to vary with the increased of the hydraulic shear stress, it is in function of the runoff. If the increased of the hydraulic shear is considerable, the grass can fail, being dragged for the runoff, in this case is necessary the additional protection.

© 2005. Universidad Nacional de Ingeniería. All rights reserved.

Résumé

De La Cruz Fallaque, L. A. (2005) *Utilisation de la génie biologique pour le contrôle d'Erosion dans pentes*. Thèse pour opter le diplôme professionnel d'Ingénieur Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

Ce thèse de recherche, s'introduit dans le domaine de l'utilisation de la végétation comme élément de design en contrôle d'érosion, en soulignant les avantages et limitations que ce spécialité moderne peut avoir. Ce étude a consisté d'une partie de recherche bibliographique et une autre de recherche expérimentale en laboratoire, c'est important faire ressortir que dans la recherche bibliographique, c'a été nécessaire entrer à détail parce que ce type de thèse est une des pionnières dans le Pérou.

Dans la recherche expérimentale, on décrit les procédures et les résultats des essais effectués en laboratoire, pour évaluer l'utilisation de pâtures sans de renforcement additionnel et de pâtures renforcés avec géosynthétiques, dans des pentes soumises a l'érosion du flux superficiel produit des pluies. Pour faire une comparaison, on a aussi prouvé des pentes de sol sans protection. L'espèce herbacée utilisée a été la Tanzanie (*Panicum Maximum*), qui est une variété amazonienne, et le type de sol a été boueux sablonneux sans cohésion.

Les essais ont consisté à glisser différentes décharges de l'eau dans des pentes avec similaire topographie, type de sol et avec les couvertures mentionnées dans le paragraphe précédent. De chaque essai, on a obtenu de paramètres d'érosion, lesquels ont été utilisés pour évaluer l'utilisation de chaque condition.

Le comportement et la protection d'une pâture en contrôle d'érosion, varie avec l'augmente de l'effort de cisailles hydraulique qui est en fonction du débit superficiel. Si l'augmente de l'effort de cisailles est considérable, la pâture peut manquer pour le flux ; dans ce cas là, c'est nécessaire la protection additionnelle.

© 2005. Universidad Nacional de Ingeniería. Tous droits réservés.

Agradecimientos

Durante mi último ciclo académico universitario despertó en mí el interés por estudiar a la vegetación como un material de diseño en ingeniería. Fue entonces cuando hablé con Julio Kuroiwa Zevallos, Phd. Ing. Profesor auxiliar de esta facultad, quien con mucho interés decidió ser mi asesor.

Al egresar de esta casa de estudios, y luego de conocer un poco la sierra central, me acerqué a la oficina del Phd. Ing. Julio Kuroiwa Zevallos decidido a empezar mi tesis, con un pequeño papel donde bosquejaba los planos de la estructura que luego construí en el Laboratorio Nacional de Hidráulica.

Sumado a mi asesor, contaba también con la asesoría incondicional de mi amiga Elsa Minaya Espinoza, Msc. Ing profesora de esta facultad, quien me guió gracias a su experiencia en modelos hidráulicos.

Conociendo la ignorancia del ingeniero civil en temas biológicos, me acerqué a la UNALM (Universidad Nacional Agraria La Molina), donde recibí la atención de Efraín Malpartida, Ingeniero Agrónomo Jefe del programa de Pastos y Forrajes; quien me recomendó sobre los tipos de pastos a usar y los procedimientos para su establecimiento.

En Setiembre del 2004, logré conseguir el apoyo del Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH), del cual debo mis agradecimientos a Francisco Coronado Del Águila, CE. Ing Director del LNH, Edgar Rodríguez Zubiato, Msc Ing. Director del LNH desde febrero del 2005, Freddy Sánchez, Administrador del LNH y a Edward Méndez, Técnico en modelamiento en estructuras.

Más adelante, logré el financiamiento por parte del Instituto de Investigaciones de la UNI – FIC, donde debo agradecer a Carlos Zavala Toledo, Dr. Ing. Director del Instituto, por haber aceptado mi proyecto.

Al empezar con la construcción de la estructura en el laboratorio, se acercó al laboratorio Dashiell Arias Mamani, egresado de esta facultad, el cual estaba muy interesado en mi tesis, la cual él quería continuar investigando cuando yo acabase, a éste le debo mis más profundos agradecimientos por haber colaborado desde sus inicios en esta investigación.

Junto con Dashiell, debo agradecer enormemente a mi gran amigo Wilder Azañedo Sayán, alumno de esta facultad, quien decidió apoyarme desinteresadamente desde el inicio de la tesis, sumado a él, también debo agradecer a mi amigo Nilton Arias Losa, alumno de esta facultad, sin ellos hubiese sido imposible lograr mis objetivos en el tiempo esperado. Otro gran amigo al que debo mencionar y reconocer es David Bazalar Gamarra, Bachiller de esta facultad.

Debo expresar mis agradecimientos Alfredo Mansen Valderrama, Msc. Ing. Jefe del departamento de Hidráulica, primero por su apoyo como Jefe académico y por gestionar la donación de Geoweb® de Presto Products Company a la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI mediante la empresa ANDEX DEL NORTE, de la cual debo agradecer especialmente al Ing. Gustavo Fierro, Gerente de Ingeniería de ANDEX, a quien considero mi amigo.

De la misma manera, debo agradecer a MACCAFERRI Perú mediante la persona del colega y amigo Juan Carlos Rivera Baca, Ingeniero Civil, con quien logré el apoyo de geomantas MacMat™.

Otros colegas que conocí en el trayecto de esta tesis y que colaboraron con ideas, contactos y bibliografía adicional fueron: Luiz Lucena, Ingeniero Civil – DEFLOR Brazil; Miguel Mathews Ingeniero Civil - Knight Piésold Perú y Bernard Lachat, Ingeniero en biología (Ingénieur biologique) - BIOTEC Suiza.

Finalmente, quiero expresar mi más grande y especial reconocimiento a mis padres, quienes con mucho amor me brindaron su apoyo incondicional y su confianza; sobre esta base surgieron mis metas de superación, las cuales he concretado en una pequeña parte con la culminación de esta tesis.

Contenido

	Página
Resumen	ii
Abstract	iii
Résumé	iv
Agradecimientos	v
Lista de Figuras	x
Lista de Cuadros	xiii
Lista de Fotos	xiv
CAPÍTULO 1. Introducción	1
CAPÍTULO 2. Revisión de Literatura	5
2.1 Bioingeniería de suelos	6
2.2 Conceptos básicos en control de erosión	9
2.2.1 Erosión superficial y movimiento de masa	9
2.2.2 Principales determinantes de erosión	10
2.2.3 Modelo matemático de Duboys y similares	12
2.2.4 Universal loss soil equation (USLE)	16
2.2.5 Woolhiser y Smith (KINEROS)	19
2.3 La vegetación en el control de erosión	20
2.3.1 Efectos de la vegetación en control de erosión	20
2.3.2 Labores previas al establecimiento de la vegetación.	26
2.3.3 Selección de especies vegetales	28
2.3.4 Pastos usados en control de erosión de taludes en Perú	34
2.4 Técnicas y métodos en bioingeniería de suelos	35
2.4.1 Estacas Vivas	35
2.4.2 Fajinas Vivas	37
2.4.3 Fajinas vivas usadas en drenaje	39
2.4.4 Capas de ramas	40
2.4.5 Capas de ramas con geomantas biodegradables	42

2.4.6 Relleno compacto con ramas	44
2.4.7 Reparación de cárcavas con relleno vivo	45
2.4.8 Muro – cajón vegetado	46
2.4.9 Colchón de ramas de arbustos	48
2.4.10 Sistema de arbustos y cables	50
2.1.11 Enrocado con vegetación.	52
2.4.12 Protección con pastos	53
2.4.13 Cercos vegetales de vetiver en curvas de nivel	59
2.4.14 Diseño de las obras de bioingeniería	63
2.5 Atributos y limitaciones de la bioingeniería de suelos	64
2.6 Aplicaciones de Bioingeniería de Suelos	66
2.6.1 Restauración y mejora paisajística	66
2.6.2 Plantación de pasto elefante	68
2.6.3 Medidas ambientales y control de erosión	71
CAPÍTULO 3. Plan de Proyecto y Desarrollo Técnico	73
3.1 Plan del proyecto de investigación	74
3.2 Desarrollo técnico	82
CAPÍTULO 4. Estructura Hidráulica de Medición y Fase de Pruebas	87
4.1 Construcción de la estructura	88
4.1.1 Planeamiento y diseño	88
4.1.2 Representación del prototipo	89
4.1.3 Instalaciones auxiliares	90
4.1.4 Detalles del proceso constructivo	92
4.2 Equipo para la adquisición de datos y desarrollo de las pruebas	94
4.2.1 Ingreso y medición de caudales	94
4.2.2 Mediciones de pérdida de suelos	95
4.3 Procedimiento general para la ejecución de las pruebas	96
4.3.1 Materiales usados en los taludes	96
4.3.2 Matriz de pruebas	96
4.3.3 Fase de Calibración	98
4.3.4 Descripción general del la ejecución de las pruebas	99

CAPÍTULO 5. Datos Recolectados y Proceso de Datos	105
5.1 Generalidades	106
5.2 Datos Recolectados	106
5.2.1 Duración de las pruebas	106
5.2.1 Mediciones Hidráulicas	106
5.2.2 Mediciones Topográficas	109
5.2.3 Características geométricas del pasto	110
5.2.4 Propiedades físicas del suelo	111
5.2.5 Cálculo de coeficiente de Manning del suelo	112
5.3 Proceso de Datos y Discusión	114
5.3.1 Relación entre el tiempo y la profundidad de erosión	114
5.3.2 Relación entre la técnica de bioingeniería y el caudal	128
5.3.3 Predicción de la profundidad de erosión	130
CAPÍTULO 6. Conclusiones y Recomendaciones	138
6.1 Conclusiones	139
6.2 Recomendaciones	141
Referencias bibliográficas	144
ANEXO A: Láminas de la Estructura Hidráulica de Medición	
ANEXO B: Datos Recolectados de Campo	
ANEXO C: Ensayos de Mecánica de Suelos	
ANEXO D: Salidas del HECRAS	
ANEXO E: Panel Fotográfico	
ANEXO F: Información Adicional	

Lista de Figuras

FIGURA 2-1. Formas de degradación de taludes.

FIGURA 2-2. Erosión laminar en superficies sin pasto.

FIGURA 2-3. Pérdida de suelo por Erosión laminar.

FIGURA 2-4. Influencias hidrodinámicas de la vegetación en estabilidad de taludes.

FIGURA 2-5. Esquema del estaquillado.

FIGURA 2-6. Vista de la trinchera y vista de la fajina viva.

FIGURA 2-7. Esquema de fajinas vivas usadas en conjunto con estacas vivas.

FIGURA 2-8. Vista en planta y cortes de las fajinas vivas usadas como drenaje superficial.

FIGURA 2-9. Esquema en perfil del emplazamiento de las capas de ramas.

FIGURA 2-10. Esquema en perfil de la construcción de capas de ramas con geogrillas para riberas de ríos.

FIGURA 2-11. Esquema de la construcción en corte. Relleno compacto vegetado.

FIGURA 2-12. Esquema de la construcción en corte. Reparación de cárcavas con relleno vivo.

FIGURA 2-13. Esquema del cajón con relleno vivo.

FIGURA 2-14. Vista en Planta que muestra la configuración del colchón de ramas.

FIGURA 2-15. Vista en Corte de un ejemplo típico para protección de riberas usando colchón de ramas.

FIGURA 2-16. Esquema detallado del sistema de arbustos y cables.

FIGURA 2-17. Vista en corte de las estacas vivas con enrocado.

FIGURA 2-18. Cercos usados como protección de los muros de mampostería en terrazas de cultivo.

FIGURA 2-19. Cercos usados en cárcavas, éstas representan zonas propicias para el establecimiento del vetiver, porque son zonas húmedas.

FIGURA 2-20. A la izquierda, cercos usados como protección en canales de riego. A la derecha, cercos que reducen la erosión del suelo hacia ambos lados de un canal en una ladera.

FIGURA 2-21. Esquema de colocación de la red de coco.

FIGURA 2-22. Apariencia del Vetiver.

FIGURA 2-23. Esquema de la acción de los cercos vegetales de vetiver.

FIGURA 2-24. Funciones del cerco vegetal y la formación de terrazas por acumulación de sedimentos.

FIGURA 2-25. A la izquierda se muestra un esquema para el uso del vetiver en conjunto con cultivos alternativos, para la conservación de la humedad. A la derecha se muestran cercos usados como separadores de predios agrícolas..

FIGURA 2-26. Cercos vegetales usados como protección a los árboles empleados con fines de estabilización. El vetiver; emplazado aguas debajo de la base de los árboles; impide la erosión en la base de los árboles.

FIGURA 2-27. Diagrama de diseño de las obras de bioingeniería.

FIGURA 3-1. Figura que explica el modelo a plantear

FIGURA 3-2.- Bosquejo de la Línea hidráulica y de energía en la estructura.

FIGURA 4-1. Bosquejo del área de mediciones de la estructura.

FIGURA 4-2. Vista en corte de la estructura durante las mediciones topográficas luego de las pruebas en el punto I.

FIGURA 4-3. Vista en corte del modelo durante las pruebas

FIGURA 4-4. Los puntos indican los puntos de control, tanto topográfico como de medición de cargas de agua (H).

FIGURA 5-1. Proceso de datos de campo, FASE I.

FIGURA 5-2. Proceso de datos de campo, FASE II.

FIGURA 5-3. Proceso de datos de campo, FASE III.

FIGURA 5-4. Proceso de datos de campo, FASE IV.

FIGURA 5-5. Profundidad de erosión versus Esfuerzo cortante efectivo Fase I.

FIGURA 5-6. Profundidad de erosión por cada prueba, m/h (Valores no acumulados) versus Esfuerzo cortante efectivo , Pa; Fase II.

FIGURA 5-7. Profundidad de erosión por cada prueba, m/h (Valores no acumulados) versus Esfuerzo cortante efectivo, Pa; Fase IV.

FIGURA 5-8. Comportamiento hidráulico del pasto..

FIGURA 5-9. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de Duboys (1879).

FIGURA 5-10. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de Duboys (1879).

FIGURA 5-11. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de Duboys (1879).

FIGURA 5-12. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de Temple.

FIGURA 5-13. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de O'Brien y Rindlaub.

FIGURA 5-14. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de Duboys (1879)

FIGURA 5-15. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de O'Brien y Rindlaub.

FIGURA 5-16. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de Temple (1987).

FIGURA 5-17. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de O'Brien y Rindlaub.

Lista de Cuadros

CUADRO 2-1. Influencias hidrodinámicas de la vegetación en estabilidad de taludes.

CUADRO 2-2. Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta.

CUADRO 2-3. Relación de pastos más usados en Perú para control de erosión en taludes.

CUADRO 4-1. Caudales utilizados en las pruebas.

CUADRO 4-2. Matriz de Pruebas

CUADRO 5-1. Lecturas de carga de agua (H) medidas durante las pruebas, los valores mostrados son un promedio de los datos mostrados en el anexo G

CUADRO 5-2. Datos hidráulicos necesarios para la estimación de la profundidad de erosión

CUADRO 5-3. Profundidades de erosión para cada prueba.

CUADRO 5-4. Propiedades más importantes del pasto en control de erosión

CUADRO 5-5. Propiedades físicas del suelo

CUADRO 5-6. Solución para la estimación del coeficiente de manning global del suelo.

CUADRO 5-7. Relación entre la técnica de bioingeniería y el caudal de prueba

CUADRO 5-8. Resumen de resultados según la bondad de ajuste.

Lista de Fotos

- FOTO 2-1. Ejemplo de emplazamiento de estacas vivas con geogrid.
- FOTO 2-2. Vista de las fajinas vivas con doble estacado inerte.
- FOTO 2-3. La foto de la izquierda muestra el talud luego de terminados los trabajos con capas de ramas, la foto derecha muestra el mismo talud con la vegetación establecida.
- FOTO 2-4. Muro cajón vegetado.
- FOTO 2-5. Ejemplos de revegetación en zonas lluviosas, ambos casos para protección de carreteras.
- FOTOS 2-6 y 2-7. Antes y después, con el uso de geomantos MacMat®.
- FOTOS 2-8 y 2-9. Durante el llenado con tierra de las geoceldas y luego de 40 días de crecimiento del pasto.
- FOTO 2-10. Antes de las obras
- FOTO 2-11. Construcción, se aprecian las capas de ramas con red de coco.
- FOTO 2-12. Luego de tres meses con las capas de ramas.
- FOTO 2-13. Luego de tres meses con las capas de ramas (detalle)
- FOTO 2-14. Plantación de pasto elefante en un terrapién de la cuenca de Shivapuri.
- FOTO 2-15. Recogida de forraje de pasto elefante, Junto a una carretera de Nepal.
- FOTO 2-16. Inicio de la siembra con Vetiver.
- FOTO 2-17. Luego de un mes de la siembra con Vetiver.
- FOTO 2-18. Luego de siete meses de la siembra con Vetiver.
- FOTO 3-1 y 3-2. Pasto Tanzania, fotos tomadas del área de investigación (2005).
- FOTO 3-3. Vista de las geoceldas rellenas con suelo orgánico en el preciso instante de la siembra.
- FOTO 3-4. Vista de l talud reforzado con geoceldas luego de 10 días de siembra.
- FOTO 3-5. Vista del MacMat® durante la instalación, se colocó una capa de 2cm de suelo.
- FOTO 3-6. Vista del MacMat® en el perfil del suelo (recuadro amarillo), para 20 días de vida del pasto; la línea roja indica el nivel del suelo.
- FOTO 4-1. Vista del modelo antes de la construcción.

FOTO 4-2. Durante la fase de movimiento de tierras y demolición

FOTO 4-3. Pulido del muro central y construcción de la poza de decantación.

FOTO 4-4. Construcción de la Poza disipadora aguas debajo de los vertederos de los taludes.

FOTO 4-5. Vista de la estructura completamente terminada, talud izquierdo con suelo desnudo y el derecho con pasto muy joven reforzado con geoceldas.

FOTO 4-6. Compactación antes de las pruebas de la fase I.

FOTO 4-7. Riego para el establecimiento de la vegetación para pruebas de la fase III.

FOTO 4-8. Durante la toma de datos topográficos luego de la prueba 2 de la fase I; $Q = 2 \text{ l/s}$, una persona sostiene la mira y la otra apunta las lecturas y mide las distancias horizontales.

FOTO 4-9. Vista donde se aprecia la mejor ubicación del nivel.

FOTO 4-10. Vista durante la prueba 16 de la fase III, se observa claramente que el pasto se ha inclinado totalmente. (Talud derecho)

FOTO 5-1. Vista de las formas de erosión en el suelo utilizado.

FOTO 5-2. Vista durante una de las pruebas de calibración.

FOTO 5-3. Inicio de la prueba 2-6, casi todo el pasto está flexionado y el agua tiene menor impedimento a su paso. El flujo trata de remover el pasto del suelo.

FOTO 5-4. Falla por mala colocación de suelo en los vértices aguas arriba de la geocelda.

FOTO 5-5. Pasto ubicado en el centro de la geocelda afectado por el flujo.

FOTO 5-6. Pasto amarrado con el MacMat™. También se pueden apreciar las raíces que amarran la geomanta.

FOTO 6-1. Se recomienda demoler la boca de la rápida para mayor área de disipación.

FOTO 6-2. Se recomienda ampliar la ventana de fuga.

FOTO 6-3. Se recomienda aumentar hileras de ladrillos (elipse roja) y disminuir el nivel de la poza disipadora (elipse amarilla)

Introducción

A continuación se describe la necesidad de la realización de la Tesis. Tomando enunciados bastante conocidos, se describirán las razones más importantes que incentivaron a realizar esta investigación.

Más adelante se mencionan los objetivos generales de la Tesis, que se fueron concretando capítulo tras capítulo en esta Tesis.

Desde tiempos inmemoriales, el antiguo peruano se ha preocupado por mantener la vegetación en los cerros y planicies de su hábitat; tal como se muestran en los vestigios de obras hidráulicas en los valles de Piura, donde actualmente la tierra es eriaza; igualmente se puede citar los andenes *construidos por los Incas en el Cuzco*. Muchos autores afirman que tales vestigios tenían fines agrícolas, pero lo cierto es que existen pruebas de que éstos eran (y son) sistemas estables geotécnicamente e hidráulicamente, por ejemplo Machu Pichu.

Por otro lado, es de conocimiento general que la pérdida de suelo por erosión del agua es un problema de carácter mundial; existen evidencias de las consecuencias del transporte de sedimentos por la acción de la escorrentía superficial, desde la pérdida de suelo rico en nutrientes y propicio para la agricultura, hasta el deterioro de estructuras civiles por la deposición de sedimentos. Por sus características geográficas y morfológicas, el Perú no es ajeno a estos problemas.

El avance de la tecnología ha hecho que el hombre invente o descubra una serie de herramientas usadas en control de erosión utilizando materiales inertes (Concreto, Metales, Rocas) los cuales pueden dar buenos resultados si no se tienen en cuenta los ecosistemas afectados y el impacto visual.

En la actualidad, existe una fuerte tendencia a la conservación y recuperación de los ecosistemas afectados por las obras de Ingeniería Civil, asimismo, los países más adelantados desarrollan técnicas de ingeniería que enlazan los principios de Ingeniería con el uso de la vegetación, y existen estudios modernos de la aplicación de ésta rama que es la Bioingeniería de suelos, aunque su disponibilidad es limitada y son más numerosas las apreciaciones cualitativas que cuantitativas de varios autores. No obstante, en el Perú los términos "conservación y recuperación de ecosistemas" están siendo introducidos en la práctica profesional, aunque con muchas limitaciones y muchas veces sin el adecuado conocimiento.

No obstante, existen muchas limitaciones de la vegetación usada en control de erosión, lo que obliga al hombre a ingeniar soluciones mixtas, es decir combinar la vegetación con un producto hecho por el hombre. (Muchos autores llaman Estabilización biotécnica a este tipo de soluciones mixtas)

Actualmente la vegetación es bastante empleada en conjunto con los geosintéticos, los cuales están en creciente desarrollo, esta tecnología ofrece una variedad de soluciones para distintos problemas de ingeniería.

Esta investigación se realizó para ampliar los horizontes de la ingeniería civil, la cual a veces se reduce al uso de los materiales convencionales estudiados profundamente en la universidad; en la Tesis se estudia a la vegetación como una herramienta especial, como un material vivo, que necesita mantenimiento y un buen criterio para su manejo.

“La vegetación es la interfase de interacción entre el suelo y la atmósfera, que se evidencia en una serie de efectos hidrológicos y mecánicos y juega un papel importante en el control de los procesos de degradación, como elemento de protección y es vital para la conservación del suelo”.¹

Objetivo de la Tesis

- Evaluar las bondades del uso de la vegetación para controlar la pérdida de suelo en taludes debido a la erosión del flujo por escorrentía superficial.

Este trabajo está orientado a reducir los daños por erosión superficial causados por flujo superficial en taludes geotécnicamente estables.

¹ Escobar (2003)

Organización de la Tesis

El cuerpo de este trabajo se desarrolló en cinco capítulos, sin incluir el primero que es de Introducción.

En el capítulo II *Revisión de Literatura*, se resume de manera específica los conocimientos teóricos que enlazan el uso de la vegetación en sistemas de control de erosión; también se resumen las investigaciones sobre modelamiento matemático de erosión de flujos superficiales. Finalmente se expone un resumen de las diferentes técnicas usadas en Bioingeniería de Suelos y Estabilización Biotécnica.

En el capítulo III *Plan de Proyecto y Desarrollo Técnico*, se formulan los planteamientos que se consideraron como hipótesis para las pruebas de campo. Más adelante se desarrollan las ecuaciones de predicción que servirán para comparar los datos medidos en laboratorio.

El capítulo IV *Estructura Hidráulica de Medición y Fase de Pruebas*, trata de la estructura construida en laboratorio para realizar las pruebas experimentales; se mencionan los detalles constructivos y principales características de las partes de la estructura, así como un resumen de las pruebas realizadas en campo.

En el capítulo V *Datos Recolectados y Proceso de Datos*, se muestran los resultados obtenidos de laboratorio. Más adelante se hace un análisis explicando los datos observados. Finalmente se usan las ecuaciones de predicción y se analiza su ajuste con los datos obtenidos.

En el capítulo VI *Conclusiones y Recomendaciones*, se comentan los enunciados a los que se llegaron durante y al final de este trabajo. Finalmente se exponen algunos puntos, que según el autor, servirán para mejorar y/o ampliar esta Tesis de investigación.

Revisión de Literatura

En este capítulo se resumen los conceptos captados de la bibliografía estudiada y que tienen que ver con el uso de la vegetación en control de erosión.

Los conceptos de control de erosión son tocados sin entrar a detalle, para no desviar el objetivo principal de la tesis de investigación; que es evaluar las bondades de la vegetación usada en control de erosión.

Más adelante se resumen los alcances más importantes de la vegetación relacionándolos con el control de erosión, finalmente se resumen las técnicas más populares de Bioingeniería de suelos.

2.1 Bioingeniería de suelos

“Bioingeniería de suelos, término que refiere al uso de plantas y partes de ellas (lo que se conoce como materia viva), para dar soluciones a problemas de ingeniería. Las estacas vivas y ramas son acomodadas y emplazadas para ser usadas como refuerzo del suelo, drenaje, barreras para el movimiento de suelo y bombas hidráulicas”.¹

“La Bioingeniería, también conocida como Ingeniería Naturalística, es una disciplina técnica que utiliza la planta viva o parte de ésta, como agente antierosivo y estabilizador de los suelos. El material vivo a utilizar incluye tanto semillas como plantas enraizadas, esquejes, estaquillas y ramas vivas”.²

“La bioingeniería es la disciplina científico-técnica que utiliza las propiedades biotécnicas de algunas especies vegetales. En el caso que nos ocupa esta disciplina se aplica a la recuperación y tratamiento de ríos y riberas de lagos, zonas húmedas y taludes. El fin es controlar la acción erosiva de la dinámica del agua en cualesquiera de sus formas, sobretodo si esta ha sido modificada por el hombre, o restaurar la vegetación, mermada en la mayoría de casos por la acción humana”.³

Historia de la bioingeniería

Las técnicas asociadas a esta disciplina tienen una larga tradición, estando documentado su uso en algunas regiones europeas desde el Medievo. El abaratamiento de la energía y la expansión de materiales como el acero y el hormigón condujeron a cierto abandono de estas técnicas al comienzo del siglo XX. Se han conocido numerosos altibajos en su práctica. Así por ejemplo, tuvo una gran difusión entre los años 1920 y 1940 en Alemania. A pesar de todo, y con fortuna para los ríos y arroyos, su popularidad ha vuelto a recobrase a partir

¹ Extracto extraído de Gray y Sotir (1996)

² Extracto extraído de una publicación de Iñaki Urrizalki (2001)

³ Extracto extraído de Bestmann Green Iberica (1998)

de la década de 1980, tanto en América del Norte como en algunos países europeos como Suiza, Austria o Italia. Actualmente, todos los países europeos y asiáticos tienen desarrollado este campo y en Centro América es bien aplicado.

En nuestro caso el uso de la vegetación en combinación con la piedra tallada ha sido una herramienta para el control de erosión y estabilidad de taludes que se aplicó bastante en el Perú antiguo. Vestigios de esta naturaleza se pueden visualizar en muchas zonas turísticas peruanas, sobre todo en Cuzco.

Por ejemplo en los valles áridos de la Costa Norte Peruana, los antropólogos han encontrado pruebas de que existieron obras de drenaje en el periodo pre-inca, con la finalidad de proteger y obtener terrenos agrícolas y áreas vegetadas. Dado esto se puede resaltar la importancia que los antiguos peruanos tenían por proteger los suelos, incentivar la agricultura y dar continuidad a los paisajes.

Ingeniería biotécnica

“La estabilización biotécnica, termino que refiere tanto a la materia viva (vegetación) como los materiales inertes, usados en conjunto para reforzar suelos y estabilizar taludes. El término “Protección biotécnica de taludes” describe la integración o combinación del uso de la vegetación y estructuras inertes o mecánicas. Los componentes inertes incluyen concreto, madera, acero y geocompuestos. El termino geocompuestos refiere a los geotextiles tejidos y no tejidos, y las geogrillas hechas de materiales sintéticos (polímeros) o materiales naturales como yute o fibra de coco”.⁴

La ingeniería biotécnica y la bioingeniería de suelos tienen en común el uso de la materia viva (vegetación), sin embargo, la ingeniería de estabilización biotécnica emplea además de la vegetación, algunos elementos estructurales prefabricados de tipo mecánico que se acoplan entre sí para lograr la estabilización definitiva de un talud o cuerpo de tierra. Los nuevos sistemas de ingeniería empleados para la estabilización biotécnica frecuentemente se combinan con elementos

⁴Gray y Sotir (1996)

biológicos (plantas) para lograr una sinergia entre ellos que ayude a prevenir la erosión y los deslizamientos en taludes y obras de tierra.

El uso de la ingeniería biotécnica y los geosintéticos, es una herramienta moderna y que actualmente tiene alta tasa de desarrollo y popularidad a nivel mundial, y por ser una herramienta moderna son necesarios los trabajos de investigación para reconocer las potencialidades y debilidades de estos productos.

2.2 Conceptos básicos en control de erosión

2.2.1 Erosión superficial y movimiento de masa

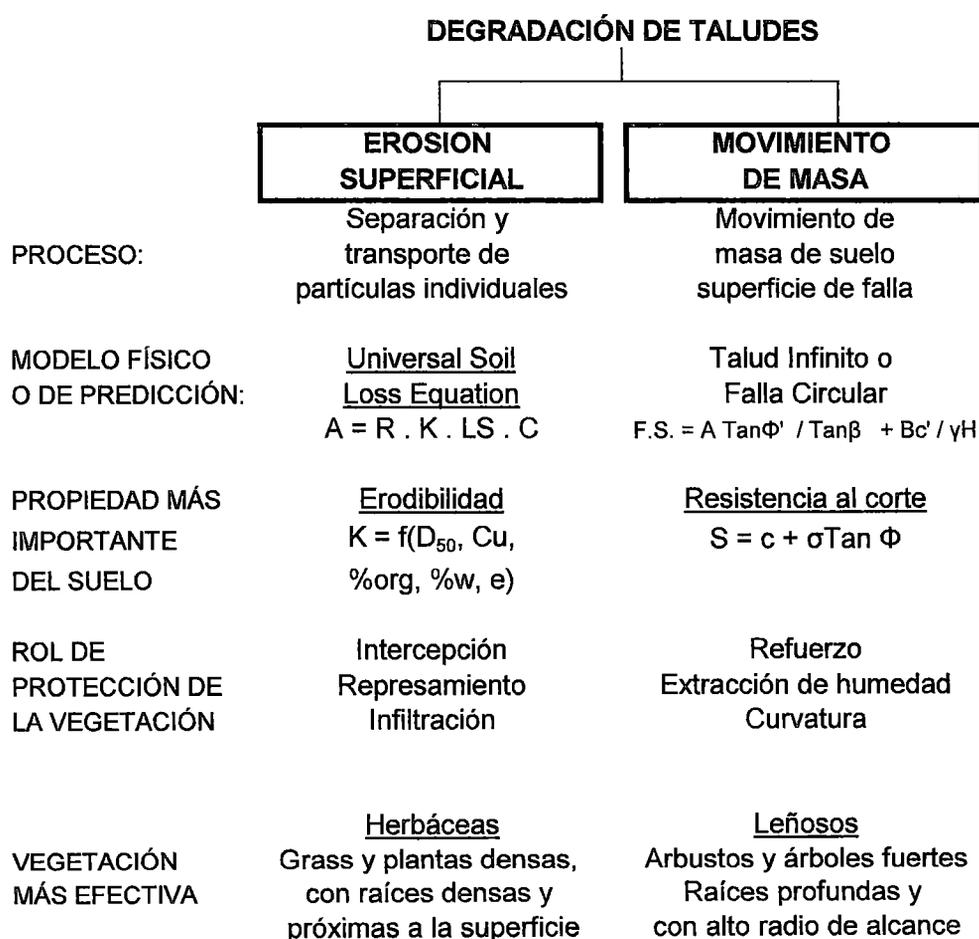


FIGURA 2-1. Formas de degradación de taludes. (Gray y Sotir ,1996)

Para los fines de la investigación, nos interesa la erosión superficial; puede notarse de la Figura 2-1 los tipos de vegetación de interés para este campo, que son del tipo herbáceo, esto es, pastos y arbustos.

También se menciona como modelo físico la USLE (Ecuación Universal de pérdida de suelos, Universal Soil Loss Equation), siendo uno de los modelos matemáticos de mayor popularidad; mas adelante se describe esta Ecuación.

2.2.2 Principales determinantes de erosión

2.2.2.1 Erosión Pluvial

La erosión pluvial es controlada por los siguientes factores:

(Gray y Sotir, 1996)

$$\text{Erosión pluvial} = \left\{ \begin{array}{ll} \text{Clima:} & \text{Intensidad y duración} \\ \text{Suelo:} & \text{Erodibilidad} \\ \text{Topografía:} & \text{Longitud y Pendiente} \\ \text{Vegetación:} & \text{Tipo y extensión de cobertura} \end{array} \right.$$

Los parámetros más importantes de clima son la intensidad y la duración de la tormenta, con los cuales se puede determinar la velocidad de escorrentía y el tiempo de acción del flujo, teniendo en cuenta la topografía.

Erodibilidad

La susceptibilidad que tiene un suelo a erosionarse se conoce como erodibilidad. La erodibilidad de un suelo también depende de su granulometría, de sus índices de plasticidad y de su compactación.

A continuación se clasifican los diferentes tipos de suelo basándose en la erodibilidad. Se agruparon de más propensos a menos propensos, de acuerdo a la clasificación SUCS:

ML>SM>SC>MH>OL>CL>CH>GM>SW>GP>GW

Según Wischmeir et al (1971) la erodibilidad en los suelos 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. A menor desplazamiento mas agua se queda en sitio para infiltrarse y generar erosión.

2.2.2.2 Erosión Eólica

La erosión eólica es controlada por los siguientes factores:

Erosión eólica =	{	Clima:	Temperatura, distribución de precipitación, velocidad del viento
		Suelo:	Textura, tamaño de partícula, Contenido de humedad, rugosidad
		Vegetación:	Tipo, altura, densidad de cobertura Distribución por estaciones

Estudios de laboratorio realizados por Chepil (1945)⁵, revelaron resultados de desplazamiento de partículas, para un suelo (arena) sometido a una velocidad de viento de 13 MPH.

Se observó que la mayor parte de las partículas de suelo transportadas por el viento ocurren cerca de la superficie del terreno, hasta 1 m, entonces es necesario emplear vegetación que abarque esta zona, para control de erosión.

Un caso muy particular de erosión eólica en Lima, es la Costa Verde.

En la Costa Verde hay zonas donde se ha empleado técnicas de reforestación para contrarrestar la erosión, que incluyen establecimiento de pasto en todo el área y cercos vivos de arbustos sobre curvas de nivel.

⁵ Gray y Sotir (1996)

2.2.3 Modelo matemático de Duboys y similares

En este ítem, se hará mención del desarrollo de los modelos matemáticos y una breve descripción de las consideraciones tomadas por los investigadores, para concluir en la elección del o de los modelos matemáticos empleados en esta investigación.

Muchos de los modelos matemáticos actuales son influencia de las investigaciones de Duboys (1879), el tomo como hipótesis que el suelo erosionaba por capas de espesor d' , estableciendo la siguiente Ecuación:

$$q_{bv} = k\tau_o(\tau_o - \tau_c) \dots\dots\dots(2-1)$$

Donde:

q_{bv} : Volumen erosionado por unidad de tiempo y de ancho, m^2/s

k : Coeficiente de erodibilidad, $m^2/s\text{-Pa}^2$

τ_o : Esfuerzo cortante total, Pa

τ_c ; Esfuerzo cortante crítico, Pa; cuya definición está basada a la iniciación del movimiento de partículas, es decir, es el esfuerzo del agua necesario para iniciar el desplazamiento de partículas.

Además:

$$\tau_c = C_f d' (\gamma_s - \gamma) \dots\dots\dots(2-2)$$

donde:

C_f : Coeficiente de fricción entre las capas de suelo.

γ_s : Peso específico del suelo, N/m^3

γ : Peso específico del agua, N/m^3

O' Brien y Rindlaub (1934), generalizaron la Ecuación de Duboys de la siguiente manera:

$$q_{bv} = k' (\tau_o - \tau_c)^m \dots\dots\dots(2-3)$$

donde es necesario determinar los coeficientes K' y m con mediciones de campo o resultados de laboratorio.

El US Waterways Experiment Station (1935) encontró mediante pruebas de laboratorio que para $0.025 < D_s < 0.560$ mm; siendo D_s el diámetro representativo del suelo; que los valores de m oscilan entre 1.5 y 1.8.

Shields (1936), realizó ensayos de laboratorio en canales de 0.40 y 0.80 m con material $1.56 < D_s < 2.47$, encontrando la siguiente relación:

$$q_{bv} = \frac{A_1}{D_s} qS(\tau_o - \tau_c) \dots\dots\dots(2-4)$$

Donde:

A_1 : Constante que debe ser determinada con pruebas.

q : Caudal unitario, m^2/s

S : Pendiente de energía

Chang, Simona y Richardson (1967) realizaron estudios con arenas, encontrando la siguiente relación:

$$q_{bv} = k_T U(\tau_o - \tau_c) \dots\dots\dots(2-5)$$

k_T : Constante que depende de las propiedades de la arena.

U : Velocidad promedio, m/s

Schoklitsch (1950), realizó pruebas en laboratorio desde 1914, siendo la última versión de su Ecuación la siguiente:

$$q_{bv} = 2500.S^{3/2}(q_o - q_c) \dots\dots\dots(2-6)$$

$$q_c = 0.26 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{5/3} \frac{D_s^{3/2}}{S^{7/6}} \dots\dots\dots(2-7)$$

Brown Y Einstein (1950), basados en las pruebas realizadas por Gilbert (1916) y Meyer-Peter, et al (1934) con arenas; encontraron la siguiente Ecuación:

$$q_{bv} = \frac{A}{D_s^{3/2}} \tau \dots\dots\dots(2-8)$$

Siendo A una constante a determinar.

Temple (1987) usa la siguiente relación en sus investigaciones de erosión en presas de tierra, para caudales grandes:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k(\tau_e - \tau_c)^a \dots\dots\dots(2-9)$$

donde:

$\frac{d\varepsilon}{dt}$: Erosión en Volumen por unidad de área por unidad de tiempo m^3/m^2-t

k : Coeficiente de relación de erosión

a : Exponente de relación de erosión

τ_e : Esfuerzo cortante efectivo, Pa.

Además:

$$\tau_e = \gamma d S (1 - C_{FF}) (n' / n)^2 \dots\dots\dots(2-10)$$

donde:

γ = peso específico, N/m^3

d = tirante del flujo, m

S = pendiente de energía, m/m

C_{FF} = Factor de cobertura vegetal para el área en falla.

n' = Coeficiente de Manning para la rugosidad del suelo.

n = Coeficiente global de Manning

Para suelos cohesivos, $n' = 0.0156$, según Temple (1980) y Hanson (1989).

Para suelos con pastos, el coeficiente global de manning se estima de la siguiente manera:

$$n = \exp[C_I \{0.0831 \ln^2(C_I) - 0.637 \ln(C_I) + 1.346\} - 4.16]; \text{ si } q/c_u < 0.0025 C_I^{2.5};$$

$$n = \exp[C_I \{0.0133 \ln^2(q/c_u) - 0.0954 \ln(q/c_u) + 0.297\} - 4.16];$$

$$\text{si } 0.0025 C_I^{2.5} < q/c_u < 36;$$

$$n = \exp[0.126 C_I - 4.16]; \text{ si } 36 < q/c_u \dots\dots\dots (2-11)$$

donde:

c_u = depende del sistema de unidades, para SI $c_u = 0.093 \text{ m}^2/\text{s}$

$$C_I = 2.5 (h\sqrt{M})^{1/3} \dots\dots\dots (2-12),$$

Donde:

h = longitud representativa del vegetal

M = densidad en tallos por unidad de área.

Resumiendo las investigaciones de Hanson (1990), consistentes en ensayos de laboratorio con canales de tierra de pendientes 0.5 y 1.5%, se partió de la siguiente Ecuación:

$$E_r = K (\tau_e - \tau_c) \dots\dots\dots (2-13)$$

Donde:

E_r = Profundidad de erosión o tasa de erosión en volumen de suelo por unidad de tiempo por unidad de área, $\text{cm}^3/\text{hr}/\text{cm}^2$,

K = Coeficiente de erodibilidad, $\text{cm}/\text{hr}/\text{Pa}$,

Shaikh et al. (1988), encontró en pruebas de laboratorio con arcillas, que la tensión crítica es nula, Lavelle y Mofjeld (1987) desprecian la tensión crítica para cuestiones de transporte de sedimentos, así:

$$E_r = K (\tau_e) \dots\dots\dots (2-14),$$

Sería una Ecuación más apropiada.

La formula de Meyer-Peter, para el esfuerzo de tensión, aplicado a transporte de sedimentos para materiales cohesivos en canales anchos es:

$$\tau_e = \gamma d S (n' / n)^a \dots\dots\dots (2-15),$$

donde:

a = varía de 4/3 a 2, arbitrariamente Simons y Senturk (1947), consideran un valor de 3/2.

Temple (1985) y Hanson (1989), usan un valor de 2 para canales lineales vegetados y canales desnudos de tierra, respectivamente.

2.2.4 Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE)

Esta Ecuación, establecida por Smith y Wishmeier (1965), fue revisada por los mismos autores en 1978 y publicada como Agricultural Handbook 537. Esta Ecuación fue desarrollada para la zona Este de "Rocky Mountain" en USA, después fue adaptada para varias zonas de USA (USDA Soil Conservation Service, 1972), luego también fue usada en zonas de construcciones de carreteras (Israelsen, 1980), Más adelante ha sido revisada y modificada (Rard et al., 1991)

Este modelo evalúa las pérdidas de suelo por erosión laminar (cuya definición será descrita más adelante), mediante la expresión:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \dots\dots\dots (2-16)$$

Donde:

A = Pérdida de suelo calculada, para una tormenta dada en un intervalo de tiempo, ton/Ha;

R = Índice de erosión pluvial, J . m² . cm / hr;

K = Factor de erodibilidad del suelo, ton . m² . hr / (ha . J . cm);

L = Factor de Longitud, adimensional;

S = Factor de Pendiente, adimensional;

C = Factor de vegetación, adimensional;

P = Factor prácticas de cultivo, adimensional;

Como se puede apreciar, los factores describen la hidrología (R), la topografía (L y S) y la cobertura (K, C y P).

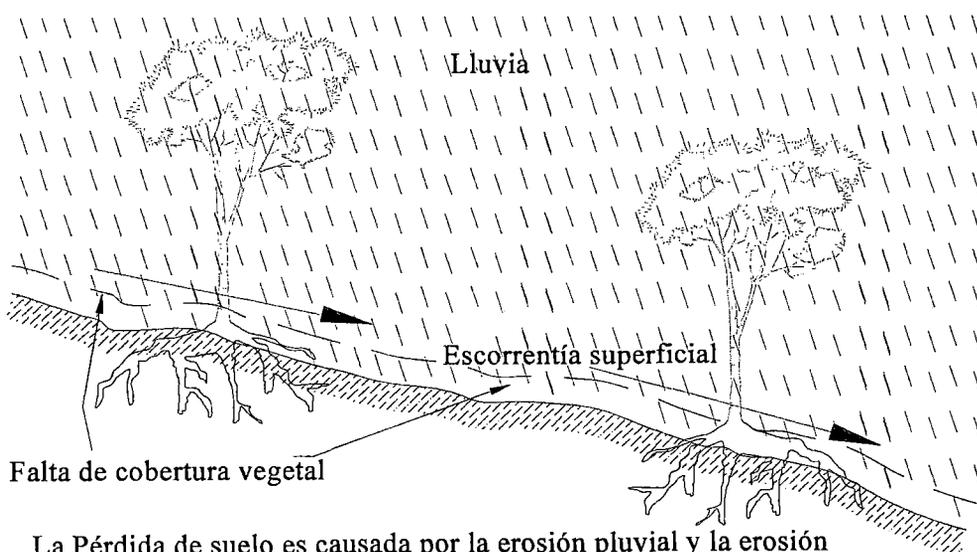
Existen muchas definiciones para usar Cuadros u obtener mediante un método numérico los factores indicados y la elección depende de los antecedentes de la información y de los datos con los que se cuenten.

Para mayor información sobre estos parámetros, se puede revisar la literatura de la USDA Soil Conservation Service, Departamento de Agricultura de EEUU o revisando cualquier libro de control de erosión.

Erosion Laminar

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 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 objetos 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 cobertura vegetal (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 (Figura 2-2). 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.



La Pérdida de suelo es causada por la erosión pluvial y la erosión por escorrentía superficial principalmente.

FIGURA 2-2. Erosión laminar en superficies sin pasto.

Los árboles por sí solos no impiden la pérdida de suelo causada por la erosión laminar; los bosques si lo hacen, gracias a su espesa cama de paja y a su sotobosque.

La Figura 2-3, en que se muestran dos plantas sobrevivientes cuyas raíces impiden ese tipo de erosión, demuestra la forma en que puede medirse esa cantidad.

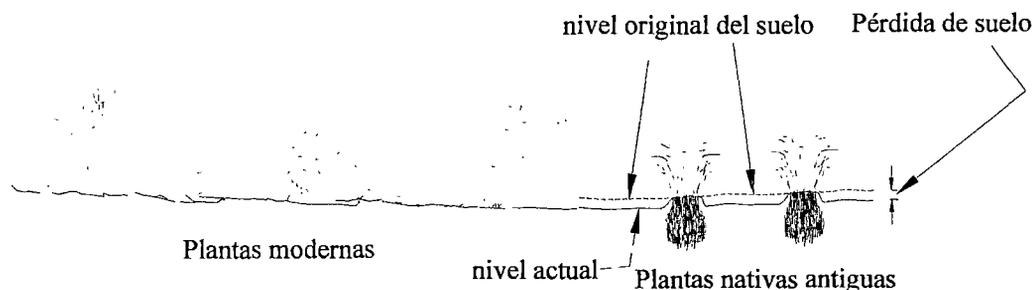


FIGURA 2-3. Pérdida de suelo por Erosión laminar.

“De todas las formas de erosión hídrica conocidas, la erosión laminar (Sheet erosion), es la forma más degradante del suelo y la más importante”.⁶

⁶ Banco Mundial (1996).

2.2.5 Woolhiser y Smith (KINEROS)

La forma general de la Ecuación KINEROS es:

$$e = e_s + e_h \dots \dots \dots (2-17)$$

Donde:

e_s : erosión producida por el impacto pluvial (Splash erosion);

e_k : erosión producida por la escorrentía superficial (Hydraulic erosion).

$$e_s = c_f k(d)r^2 \dots \dots \dots (2-18)$$

donde:

c_f : es un coeficiente que depende de las propiedades de la superficie del suelo

$k(d)$: es un factor de reducción que depende de la escorrentía superficial (tirante de agua), mientras mayor sea el flujo superficial, menor será el impacto de las lluvias, varía de 0 a 1. Cuando la tormenta recién ha comenzado, se puede suponer este valor de 1, y cuando la escorrentía superficial es importante, se puede tomar $k(h)$ como "0".

r : depende de las propiedades geométricas de las gotas de lluvia

$$e_h = c_g (c_m - c_s) A \dots \dots \dots (2-19)$$

donde:

c_g : coeficiente de relación de transferencia, se puede estimar como la división entre la velocidad del flujo y el tirante, en suelos cohesivos, esta relación representa el máximo

c_m : capacidad de transporte de sedimentos

c_s : capacidad de concentración o deposición de sedimentos

La idea de presentar los modelos es sólo explicar de manera breve el funcionamiento de sus ecuaciones, en el caso de la Ecuación KINEROS, ésta requiere de una especial atención dado que tiene un conjunto de variables que se van desmembrando y requiere procedimientos matemáticos más elaborados, para mayor información se puede buscar KINEROS en la web o en la página del departamento de agricultura de EEUU (USDA)

2.3 La vegetación en el control de erosión

2.3.1 Efectos de la vegetación en control de erosión

Los efectos de la vegetación depende de las condiciones en que se encuentra; a continuación se describe cada efecto, tomando como referencia los estudios de Escobar (2003).

Intercepción pluvial

El follaje denso contribuye a la reducción del volumen de la precipitación que llega al suelo y de la cantidad de agua capaz de producir remoción y movilización del suelo. El follaje de la hierba, disipa la energía cinética de las gotas de lluvia, evita el impacto y controla la erosión pluvial.

De acuerdo con Styezen y Morgan (1996), la lluvia se divide en dos partes, la lluvia que cae directamente sobre el suelo y la lluvia que es interceptada por el follaje de la vegetación, que puede expresarse de la siguiente forma:

Lluvia interceptada = Lluvia x % área de Follaje

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.

La retención de agua en el follaje demora o modifica el ciclo hidrológico en el momento de la lluvia. Este fenómeno disminuye el caudal de agua por escorrentía, disminuyendo su poder erosivo.

La retención de agua en el follaje depende del tipo de vegetación, y la intensidad de la lluvia.

En el caso de lluvias muy intensas la retención de agua es mínima, pero en el caso de lluvias moderadas a ligeras, la retención puede ser significativa, dependiendo de las características de la vegetación.

Parte del agua es acumulada por el follaje para luego ser evaporada. Existe experiencia con especies vegetales, la cual permite determinar el volumen total

de agua acumulada, teniendo en cuenta la densidad de vegetación por área y el volumen del follaje.

Por ejemplo el maíz posee espacios importantes para almacenamiento de agua. El agua que no es acumulada en el follaje va a la tierra por goteo o por flujo. La rapidez del flujo depende de la aspereza de las superficies de las hojas y troncos; de los diámetros y de los ángulos de las hojas y ramas con la vertical. En los árboles, la llegada por goteo del agua de lluvia interceptada al suelo, es importante como para ser analizada, pues estas gotas son más grandes que las gotas de precipitación directa, y si éstas caen de grandes alturas, se puede incitar la erosión en las cercanías del tronco,

Evapotranspiración.

El efecto de la evapotranspiración 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 en la disponibilidad de agua de lluvia y nivel freático.

El agua que intercepta el follaje es drenada en forma de vapor de agua debido a la evaporación y la transpiración de las plantas. La disminución de la humedad aumenta el contacto entre las partículas de suelo y disminuye la fuerza resultante del agua, y por lo tanto la estabilidad del margen aumenta. Esta propiedad depende del tipo de planta, y es nula cuando la precipitación es tan cargada que el agua retenida sobrepasa la capacidad de evapotranspiración de la planta.

La evapotranspiración profundiza los niveles de aguas freáticas y al mismo tiempo puede producir asentamientos de suelos arcillosos blandos y agrietamientos por desecación.

El área de influencia depende de la extensión y profundidad del sistema radicular.

En suelos secos, el uso consuntivo de la vegetación puede traer como consecuencias la desecación del suelo, produciendo grietas en el suelo y aumentando su susceptibilidad a la erosión.

Según Suárez Díaz (1998):

“La clave desde el punto de vista de ingeniería es determinar la humedad máxima y el nivel freático crítico para un talud determinado, teniendo en cuenta el efecto de la vegetación. El balance de la infiltración y la evapotranspiración produce una determinada humedad, la cual debe compararse con la humedad requerida para saturación. Debe tenerse en cuenta que al saturarse un suelo se disminuyen las fuerzas de succión o presiones negativas de agua de poros, las cuales ayudan a la estabilidad. En ocasiones la vegetación produce un efecto de mantener la humedad por debajo del límite de saturación mejorando la estabilidad de las laderas”.

Intercepción de la escorrentía superficial

El follaje, los tallos, raíces y residuos orgánicos en superficie (hojarasca), disipan la energía cinética de la lluvia y las escorrentías. La transpiración de las plantas habilita la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. Absorción del agua por el humus y la hojarasca incrementa el tiempo de llegada del agua al suelo, retrasando el punto de encharcamiento. Se ve incrementada la rugosidad superficial. Esta acción permite la reducción de la velocidad de escorrentía, incrementa el tiempo de contacto del agua con el suelo. La infiltración es estimulada a través de los canales dejados por las raíces descompuestas. La incorporación de materia orgánica al suelo, lo protege del secado intenso.

En la fórmula de Manning:

$$v = y^{2/3} \cdot S^{1/2} / n$$

, al aumentar la rugosidad del suelo disminuye la velocidad, y por otro lado:

$$\tau_e = \gamma DS(n'/n)^a, \text{ Temple (1987)}$$

, mientras más alto sea el coeficiente de Manning global del suelo (con vegetación), menores serán los esfuerzos de corte y por lo tanto la tasa de erosión será menor:

$$E_r = K (\tau_e), \text{ Hanson (1990)}$$

La vegetación más adecuada para la intercepción de escorrentía será la que genere menos turbulencia en el suelo, es decir hay que escoger vegetación flexible que se adapte al flujo y proteja el suelo.

Filtro de finos

El follaje de las plantas retiene el fino que arrastra el flujo superficial, impidiendo que el suelo sea lavado.

Esta propiedad depende de la granulometría del suelo y de la densidad y espesor de las hojas o tallos de la vegetación.

Dicho de otra forma, si los vacíos existentes en el follaje superficial (follaje paralelo al flujo) son menores que los diámetros del suelo lavado, la vegetación retendrá las partículas.

Infiltración

Las plantas, sus residuos y los organismos ayudan a formar un ambiente poroso en el suelo, disminuyendo la velocidad del flujo, pero aumentando la capacidad de infiltración del suelo, dependiendo de la profundidad de las raíces.

Refuerzo del suelo por las raíces

Los sistemas radicales de las plantas y árboles desarrollan bulbos donde interactúan el suelo y las raíces, lográndose el reforzamiento mecánico del suelo.

El refuerzo depende de la densidad de las raíces, su resistencia a la tracción, la resistencia por fricción entre la raíz y el suelo, el índice de alineamiento de las raíces (rectitud-angulosidad) y la orientación respecto la dirección del esfuerzo principal. El sistema radical incrementa el parámetro de cohesión del suelo.

Las características de las raíces dependen de la especie vegetal, la edad, las propiedades del perfil de suelo y el medio ambiente.

La profundidad de las raíces generalmente, no superan los cinco metros en árboles grandes, dos metros en arbustos y 30 cm en los pastos, La extensión del sistema radicular generalmente, es mayor que su profundidad y en algunos casos superan los 50 m de longitud.

La importancia de las raíces para la estabilidad de taludes, depende de su longitud y resistencia, es por eso que para estos casos se estudian los árboles, ya que las longitudes de sus raíces pueden llegar a la superficie potencial de falla.

Control de la erosión por viento

La vegetación reduce la exposición del suelo al viento, evitando la movilización de partículas del suelo por la dinámica del viento. La propiedad determinante de la vegetación en este caso es su cobertura aérea, se prefieren pastos y arbustos densos.

Es necesario tener registros de velocidades del viento, y determinar con relación a estudios realizados cual es la velocidad limite para iniciar el movimiento de una partícula, se debe tener como criterio que la velocidad aumenta respecto de la altura.

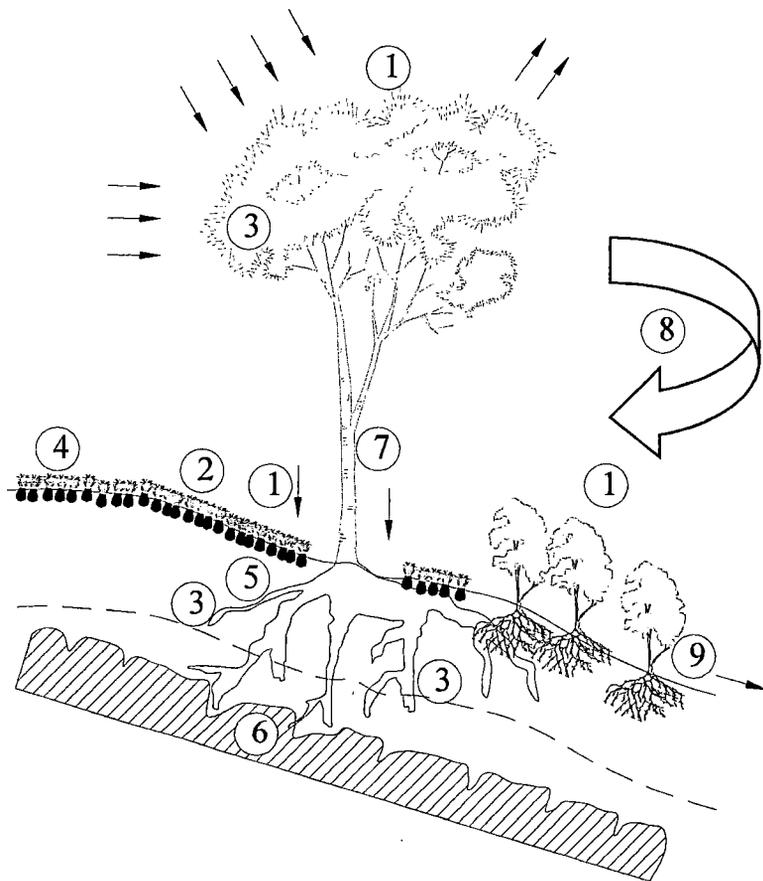


FIGURA 2-4. Influencias hidrodinámicas de la vegetación en estabilidad de taludes. Gráfico de Greenway (1987) extraído de Gray (1996) y editado por el autor. Ver leyenda en el Cuadro 2-1.

CUADRO 2-1. Influencias hidrodinámicas de la vegetación en estabilidad de taludes. (D. Greenway, 1987)⁷

<i>Mecanismos hidrológicos</i>	<i>Influencia</i>
1. Intercepción de lluvias, causando la absorción y evaporación de las lluvias disponibles para infiltración.	Positiva
2. Las raíces y tallos incrementan la rugosidad y permeabilidad del suelo, aumentando la capacidad de infiltración.	Negativa
3. Las raíces extraen la humedad del suelo (por evapotranspiración), disminuyendo la presión de poros.	Positiva
4. El efecto de extracción de humedad puede llegar a secar el suelo, produciéndose grietas.	Negativa
<i>Mecanismos mecánicos</i>	
5. Las raíces refuerzan el suelo, aumentando su resistencia al corte.	Positiva
6. Las raíces pueden llegar a anclar el suelo a mantos más profundos.	Positiva
7. El peso de los árboles hace que incremente los componentes de esfuerzo normal y tangencial en los taludes.	Positiva / Negativa
8. La vegetación expuesta al viento hace que se transmitan esfuerzos al suelo.	Negativa
9. Las raíces y tallos retienen las partículas de suelo transportadas por escorrentía, disminuyendo susceptibilidad a la erosión.	Positiva

⁷ Gray (1996)

2.3.2 Labores previas al establecimiento de la vegetación

Previo al establecimiento de las coberturas vegetales para el control de erosión, se deben adelantar labores que incluyen la identificación de las especies vegetales, el conocimiento previo de las condiciones del suelo o de los macizos rocosos, principalmente su erodibilidad; la rugosidad y el fracturamiento de los macizos rocosos, las pendientes de los taludes, agresividad del clima y la respuesta de las coberturas vegetales en taludes o zonas similares a las que se proyectan tratar.

Las observaciones y análisis previos permiten orientar los diseños de los tratamientos y las estrategias que permiten la adaptación de los tratamientos al sitio; teniendo en cuenta las condiciones del terreno, el manejo de las coberturas vegetales, y las labores de mantenimiento más recomendadas dentro del plan las soluciones.

Las siguientes son las actividades que se adelantan en la metodología que lleva a la identificación de las especies y a los tratamientos para la revegetación (Escobar, 2003):

- a) La cartografía de la zona permite localizar las áreas biológicas y climáticas similares y los bancos genéticos para obtener el material vegetal de propagación. Además se identifican variables como la orientación y pendiente de los taludes, distribución de los drenajes y características de los suelos.
- b) El inventario de las especies pioneras, con esta investigación se reconocerán las especies nativas de la zona y las candidatas a ser usadas, y los volúmenes existentes para cada especie. Se puede hacer uso del SIG para ordenar la información.
- c) Los recorridos por las zonas con similitud ecológica, permiten identificar el comportamiento de las diferentes coberturas vegetales.
- d) Comparación sobre el comportamiento de los diferentes materiales vegetales útiles, debe investigarse sobre el rechazo entre los diferentes tipos de vegetación e identificar los grupos que puedan establecerse sin problemas.
- e) Identificación de los procesos erosivos presentes en las zonas protegidos con especies vegetales.
- g) Selección de las especies útiles para recuperar las áreas degradadas.

- h) Adaptación de los tratamientos más adecuados para el establecimiento de coberturas vegetales a utilizar en las soluciones, se pueden dar soluciones mixtas a una misma zona.
- i) Análisis y caracterización agrológica y geomorfológica del suelo a tratar.
- j) Identificación de los posibles efectos negativos de las coberturas vegetales sobre las obras de drenaje u otras obras civiles.
- k) Revisión de literatura con experiencias similares.
- l) Entorno de los taludes, determinar las variables sociales, económicas y ambientales, entre otros.
- m) Elaboración de una programación para las obras de bioingeniería, se debe tener en cuenta las distancias a los viveros, etc.
- n) Elaboración de un plan de manejo y mantenimiento de las coberturas.

Estas actividades permiten la caracterización de las especies de la zona de estudio y su inventario, orientados a identificar la disponibilidad de las plántulas a utilizar y de los volúmenes de materia orgánica necesarios para el proyecto y la posible respuesta como coberturas que apoyan las labores para el control de la erosión.

Hay que tener en cuenta que estas labores se acortan si se cuenta con un inventario de especies nativas.

Luego de completada esta metodología, se tendrán una serie de especies hábiles para ser usadas en obras de bioingeniería, a continuación se mencionan criterios para la selección definitiva de la vegetación.

2.3.3 Selección de especies vegetales

Como no existen especies universales se debe acudir a los expertos forestales para escoger la especie de pasto, hierba, arbusto o árbol que se debe utilizar para cada caso específico, teniendo muy en cuenta la experiencia local y las diferencias de tolerancias y hábitos de las diferentes especies.

Para la selección de especies que integran tratamientos para el establecimiento de coberturas vegetales, en labores de control de erosión, se deben considerar los siguientes criterios:

Sistema radical

Esta característica de la planta es esencial cuando se quiere estabilizar un talud, cuyo campo es la mecánica de suelos. Se requieren sistemas radicales capaces de penetrar en el suelo, logrando a la vez la mayor cobertura lateral posible a efecto de producir el amarre del suelo.

Esto limita el desarrollo vertical de las raíces, obligándolas a un crecimiento horizontal, con poca profundidad o siguiendo los planos de diaclasas alterando con su presencia, los estratos más superficiales del suelo.

Para el caso de control de erosión, se requieren pastos o arbustos con raíces densas y fuertes, de manera que se forme una barrera subsuperficial que proteja al suelo del esfuerzo de corte originado por la escorrentía superficial.

La respuesta de los sistemas radicales de las especies utilizadas para recuperar áreas degradadas está relacionadas con las características mecánicas y orgánicas del suelo. Las especies vegetales poseen sistemas radicales con distintas formas y ejercen diferente acción. Son comunes los sistemas radicales pivotantes, los fasciculados, los tuberosos los rastreros y los aéreos. Estos son propios de cada especie pero su comportamiento varía con las condiciones físicas del suelo o roca, la posición del nivel freático, las estructuras presentes o heredadas del macizo rocoso. Es por eso que su comportamiento no es homogéneo y puede alcanzar sitios que muchas veces no están dentro de las proyecciones de su establecimiento.

Aporte de materia orgánica

Las plantas eliminan las hojas viejas como parte de su desarrollo, dichas hojas se les conoce como hojarasca, representa un aporte orgánico para el suelo y a su vez sirven como protección temporal del suelo..

La hojarasca se convierte en sedimento orgánico al depositarse en las estructuras hidráulicas, siendo un inconveniente por la frecuente colmatación que sufren los canales y el arraigo de especies vegetales invasoras que le disminuyen su eficiencia hidráulica.

En zonas que tengan obras hidráulicas se debe tener en cuenta este aporte orgánico y debe ser considerado en los cálculos de diseño.

Porte de la especie

En el caso de árboles, la altura máxima que alcanza la especie es de gran importancia respecto a:

- el alcance que pueda tener el esparcimiento de la hojarasca, con relación al acceso del área;
- la facilidad para su mantenimiento;
- el efecto de palanca sobre los taludes;
- altura de goteo durante la lluvia;
- la presión sobre las obras.

En el caso de erosión superficial, el porte de la especie es importante porque se requieren especies que intercepten las lluvias, a modo de evitar que caiga directamente sobre el suelo a proteger, es necesario pastos o arbustos de cobertura densa y espesa, aunque también influye el tipo de bioingeniería o siembra a utilizar.

Especies con alta densidad en el sistema foliar o que se integren en coberturas múltiples, tienen mayor capacidad de interceptación de la lluvia. Los sistemas foliares espigados tienen menor área específica en el sistema, lo que reduce su capacidad de interceptación.

La densidad, forma, rugosidad, tamaño de las ramas, fustes y sistemas foliares son determinantes en la capacidad de la cobertura para aumentar el tiempo de concentración de las aguas en la ladera.

La composición múltiple de las coberturas vegetales (pastos, arbustos y árboles) constituye una cadena de amortiguación de la precipitación, de alta eficiencia,

permite la adecuada disposición de la materia orgánica aportada por el sistema, lo que repercute positivamente en la rapidez de regeneración orgánica del suelo.

Exigencias climáticas e hídricas

Con el fin de garantizar el arraigo de la vegetación se deben tener en cuenta las exigencias climáticas de las especies seleccionadas y estar en concordancia con las del sitio de las labores de control de erosión. (altura sobre el nivel del mar, temperatura, precipitación y humedad relativa)

Al seleccionar la cobertura vegetal debe compararse las exigencias de agua de las especies (uso consuntivo) con la existente en el área de tratamiento y considerar además los cambios que sufre el nivel freático y la humedad del terreno, por la presencia de las obras de control de erosión.

Exigencias agrónomas

La calidad de los suelos es factor determinante en el desarrollo de las especies vegetales, por tal razón, al seleccionar las coberturas para labores de control de erosión se deben tener en cuenta las exigencias de nutrientes de las especies de acuerdo a la calidad de los suelos del área a tratar.

En casos en que el suelo presente una avanzada degradación es recomendable utilizar abonos orgánicos compensados que contribuyan a mejorar la estructura física y las propiedades químicas del suelo.

Las características edáficas más importantes para permitir el crecimiento de la vegetación son el PH del suelo, su textura, su CIC, su MO, sus contenidos de N, P y K.

Se recomienda que el suelo sea arcilloso y arenoso, de manera que haya el suficiente drenaje y espacio para que las raíces crezcan y se produzca la aireación, pero no lo suficientemente arenoso como para que el agua se infiltre.

Sistema de regeneración

La propagación de especies utilizadas para recuperar áreas degradadas debe ser simple y de alta viabilidad, las mejores características las presentan aquellas plantas que aportan gran número de semillas o las que tienen una reproducción vegetativa por tallos rastreros, estolones, rizomas o bulbos, con los cuales se logra el cubrimiento rápido de la zona.

Recuperación de suelos

En las prácticas se utilizan especies pioneras y que aporten materia orgánica, mejorando las condiciones para el establecimiento de las especies definitivas.

La materia orgánica aportada por las especies y pioneras se descompone rápidamente, favoreciendo al aumento de microorganismos en el suelo y restituyendo un eslabón básico en la cadena alimenticia. Esto conduce a una rápida activación de la dinámica secuencial de la cobertura y a un equilibrio ecológico en el área recuperada.

Influencia sobre obras civiles

Es importante la relación que existe entre las coberturas vegetales y su evolución en ambientes con presencia de estructuras civiles convencionales. La acción de la vegetación es complementaria y no debe existir presión entre ésta y la obra civil convencional.

El establecimiento de la cobertura vegetal debe considerar los efectos negativos sobre las obras: la presión de los sistemas radicales leñosos sobre las estructuras hidráulicas, la acción de palanca que ejercen los árboles, sobre taludes de pendientes fuertes, el aporte de sedimentos orgánicos y la presencia de especies vegetales aleaños a las estructuras de drenaje, son entre otras, frecuentes.

Es por eso que en el diseño de obras de bioingeniería de suelos, se debe trabajar con espaciamientos y es necesario determinar tipos de planta para determinadas ubicaciones, de tal manera que no exista presión entre las estructuras inertes y la vegetación.

Periodicidad en el mantenimiento

En algunos tipos de planta es necesario podar cada cierto tiempo, la planta ideal será la que menos requerimiento de mantenimiento necesite, por otro lado es necesario determinar la ubicación de la mano de obra.

Agresividad y dominancia

Para la elección de las coberturas vegetales en obras de control de erosión debe tenerse en cuenta la agresividad de las especies; la dominancia existente entre las especies permite el control de las no deseadas.

Este factor debe ser estudiado cuando se desea integrar una especie nueva, que dicho sea de paso no es recomendable

Usos del suelo

Al seleccionar la cobertura vegetal es determinante considerar el uso final que tendrá el área sometida a tratamiento. Las condiciones de estabilidad que se esperan obtener con la solución determinan, en muchos casos, el uso potencial del terreno.

En zonas donde se logra alta estabilidad podrán establecerse especies aprovechables como frutales, medicinales, leña o madera; por el contrario, si la estabilidad conseguida por el tratamiento es baja, la zona debe revegetarse con especies que no estimulen la presencia de personas en el área.

Palatinidad a los ganados

Uno de los principales agentes de daño en áreas con tratamiento de coberturas vegetales es la presencia de ganados. (Equinos, vacunos, caprinos, otros)

Con el fin de evitar la presencia de estos animales en la zona, debe considerarse como criterio de selección de la cobertura, la palatinidad de las especies a los ganados, de esta forma se evita que el área sea atractiva para el pastoreo.

Si las especies más apropiadas para el establecimiento de vegetación en el área son forrajeras, se debe cercar el área para evitar el daño por animales.

Es posible usar cercos vivos con especies no comestibles para el ganado, por ejemplo arbustos leñosos de altura media (1-2 m).

Diversidad de especies

La mejor forma de establecer coberturas herbáceas es utilizando varios tipos de plantas, el número de especies depende del criterio del diseñado; aunque según los biólogos el número de especies a usar debe ser alto y depende de la correlación entre las especies, dado que dos tipos de plantas pueden rechazarse.

Según experiencias peruanas, se pueden combinar con más de tres tipos de plantas para establecer una buena cobertura; el ingeniero civil colombiano Jaime Suárez recomienda usar al menos cinco especies.

**CUADRO 2-2. Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta
(Gray y Sotir, 1996)**

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedades para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles d establecer en las riberas de los ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	Algunas veces son difíciles de establecer.
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.

2.3.4 Pastos usados en control de erosión de taludes en Perú

CUADRO 2-3.
Relación de pastos más usados en Perú para control de erosión en taludes

Nombre Común	Nombre Científico
Chojilla	Bromus Catharticus
Buffel Grass	Cenchrus Ciliaris
Pasto Rhodes	Chloris Gayana
Cortaderia	Cortaderia Jubata
Bermuda Grass	Cynodon Dactylon
Estrella Africana	Cynodon Plectostachyus
Tall Fescue	Festuca Arundinacea
Chilhua ichu	Festuca dolichophylla
Chocho	Lupinus Balliannus
Quicuyo	Pennisetum Clandestinum
Ichu	Stipa Ichu
Chuor	Stipa Mucronata
Vetiver	Vetiveria Zizanoides
Grass Japonés	Zoysia Japonica
Braquiaria	Brachiaria Decumbens
Tanzania	Panicum Maximum
Elefante	Penniceteum purpureum

De acuerdo a experiencias peruanas y a bibliografía diversa, se ha obtenido este cuadro que muestra las especies de pasto más usados en el Perú en lo que respecta a control de erosión.

2.4 Técnicas y métodos en bioingeniería de suelos

2.4.1 Estacas Vivas

Descripción

Las estacas vivas implican la inserción y apisonamiento de estacas vegetales vivas. Si están correctamente preparadas y ubicadas las estacas vivas se fijaran en el suelo (se enraizaran).

Las estacas se obtienen de arbustos como el sauce o de otros que puedan establecerse por estaca o rama.

Usos

Las estacas vivas pueden ser usadas como un tratamiento primario o en combinación de fajinas vivas, u otras medidas de bioingeniería. Las estacas vivas pueden ser ubicadas en filas en el talud para ayudar a controlar el movimiento del suelo superficial; estas pueden ser apisonadas y usadas en combinación de redes de yute u otras fibras vegetales. Instalando las estacas formando una red, a lo largo de una cárcava puede ser beneficioso para reducir la velocidad, o fomentar la sedimentación y controlar la erosión. El grupo de estacas, es instalado en filas que se alinean hacia aguas abajo. Las Filas deben ser extendidas desde el tope del talud hacia el pie del talud, en dirección aguas abajo. Las estacas deben ser estar separadas, 30 a 45 cm, en cada una de las filas. Y las filas deben estar espaciadas, de tal manera que el tope de la fila aguas abajo se traslape con el pie de la fila aguas arriba. Las estacas vivas pueden ser usadas para proveer una protección auxiliar alrededor de presas de control.

Preparación

Las estacas tienen usualmente, un diámetro de 1.25 a 3.75 cm y 0.6 a 0.9 m de largo. Las estacas deben tener sus lados limpios de ramas y la corteza intacta. La punta debe ser cortada en ángulo para una fácil inserción en el suelo.



FIGURA 2-5. Esquema del estaquillado. Maccaferri, 2002; Ref. 13.



FOTO 2-1. Ejemplo de emplazamiento de estacas vivas con geogrid. Gráfico: Gray, D. H., Sotir R. B., (1996).

2.4.2 Fajinas Vivas

Descripción

Las ramas de algunas plantas (por ejemplo Sauce, dogwood, alder) son amarradas en un manojo y puestas en pequeñas trincheras, estas deben ser amarradas con un alambre y ancladas en la trinchera con una estaca.

Las trincheras son típicamente excavadas a mano y normalmente siguen el contorno del talud; también se les puede dar una pendiente a lo largo de las fajinas para facilitar el drenaje.

En taludes muy húmedos las trincheras pueden excavarse en contornos cuyos ángulos varíen un poco para facilitar el drenaje (criterio). Después de que las fajinas vivas son aseguradas con las estacas, las trincheras son rellenas con suelo hasta que el tope de las fajinas vivas es expuesto.

Usos

Las fajinas vivas son usadas como estabilización de corte de carreteras o relleno, zonas cóncavas, u otras con problemas de erosión.

Las fajinas crean una serie de banquetas en el talud que demora la escorrentía y atrapa el sedimento.

Las fajinas son mas fáciles de instalar que las capas de arbustos, porque son instaladas a poca profundidad. Ellas son menos efectivas que el brushlayer sin embargo prevén los movimientos superficiales de masa porque el refuerzo no se extiende profundamente en el talud, no obstante las raíces de las fajinas se anclan en el suelo y proveen una protección contra el deslizamiento superficial.

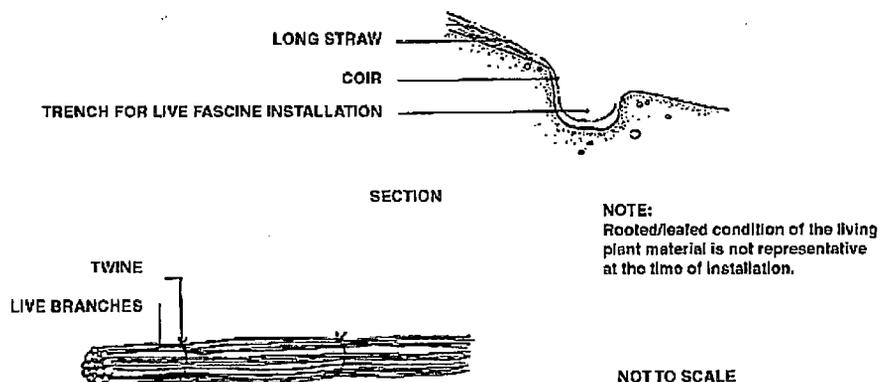


FIGURA 2-6. Vista de la trinchera y vista de la fajina viva. (De U.S. Army Corps of Engineers 1993; esquema dibujado por Robin B. Sotir and Associates, 1993)

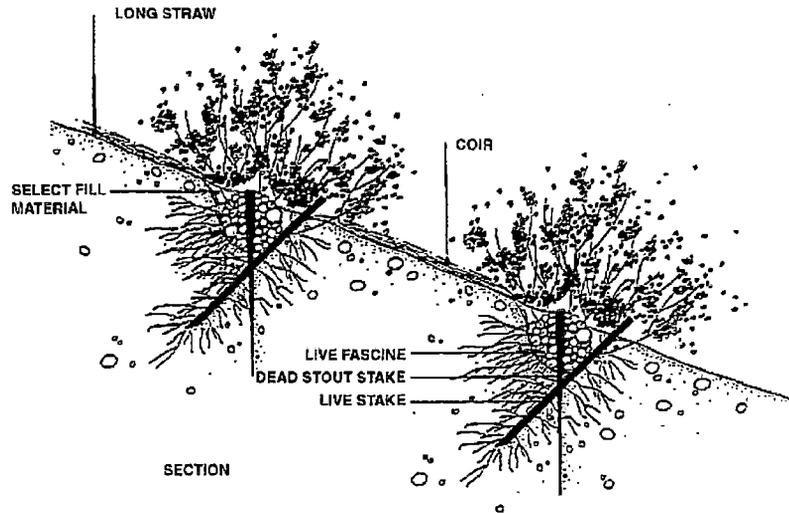


FIGURA 2-7. Esquema de fajas vivas usadas en conjunto con estacas vivas. (De U.S. Army Corps of Engineers 1993; esquema dibujado por Robin B. Sotir and Associates, 1993)



FOTO 2-2. Vista de las fajas vivas con doble estacado inerte. Foto: USDA Forest Service.

2.4.3 Fajinas vivas usadas en drenaje

Descripción

Filas de fajinas vivas son instaladas y conectadas a un drenaje principal.

Se usan las fajinas vivas para formar una red de drenaje, ellas pueden servir como colectores que transportan el agua a un drenaje principal.

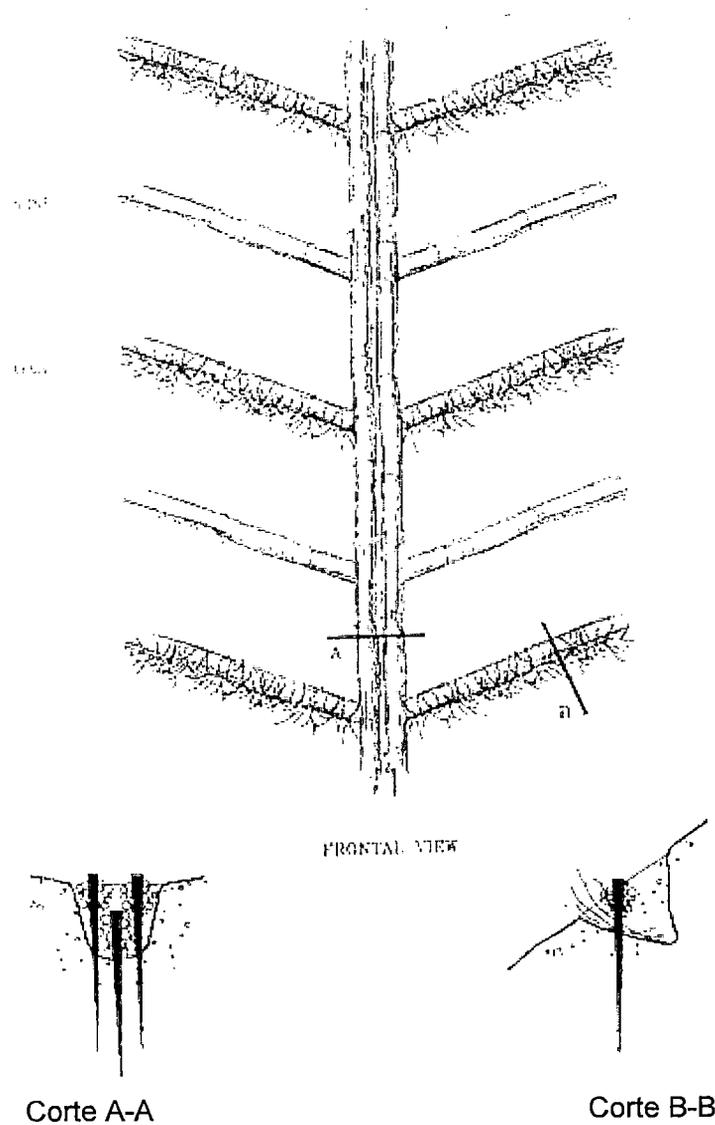


FIGURA 2-8. Vista en planta y cortes de las fajinas vivas usadas como drenaje superficial. Gráfico: Gray, D. H., Sotir R. B., (1996).

2.4.4 Capas de ramas o arbustos

Descripción

Consiste en ramas cortadas vivas, entrecruzadas en las capas de suelo, los arbustos son colocados entrelazados o traslapados de tal forma que las puntas de las ramas sobresalgan en la superficie, donde estos retardan la escorrentía, filtran los sedimentos del flujo.

Taludes de relleno:

Las capas de ramas trabaja mejor cuando se combina con una construcción de un relleno, las capas de arbustos son embebidas entre sucesivas capas de relleno.

Cada capa de arbusto es cubierta por suelo suavemente compactado.

Las capas de ramas pueden ser combinadas por geocompuestos naturales o sintéticos, geogrillas poliméricas para proveer refuerzo adicional.

Taludes de corte:

Las capas de ramas es colocado en banquetas angostas, contrario a las pendientes en taludes de relleno, las longitudes de las ramas son normalmente cortas en taludes de corte, porque las banquetas son excavadas de 0.6-0.9 m dentro del talud y este tipo de tratamiento es recomendado en taludes que no tengan mas pendiente que 2:1 (h v).

Usos

Las capas de ramas pueden ser usadas para estabilizar el talud a prueba de deslizamiento superficial.

La orientación es mas efectiva q las fajinas vivas, desde el punto de vista de refuerzo de tierra y estabilidad de suelo. Brushlayering trabaja mejor en taludes de relleno que en taludes de corte, porque las ramas en taludes de relleno son más largas.

Las capas de ramas pueden ser usadas para estabilizar y reforzar el lado exterior de contrafuertes de tierra, que son afectados por drenaje (piping).

Preparación

Las ramas son extraídas de arbustos como sauce, alder (aliso, arraclán, frágula) y dogwood (cornejo, sanguinuelo). Las ramas pueden tener de 1.25 a 5 cm de diámetro.

La longitud de las ramas varía si son usadas para relleno o corte. Las ramas con longitudes mayores a 30 cm pueden ser usadas en taludes de relleno.

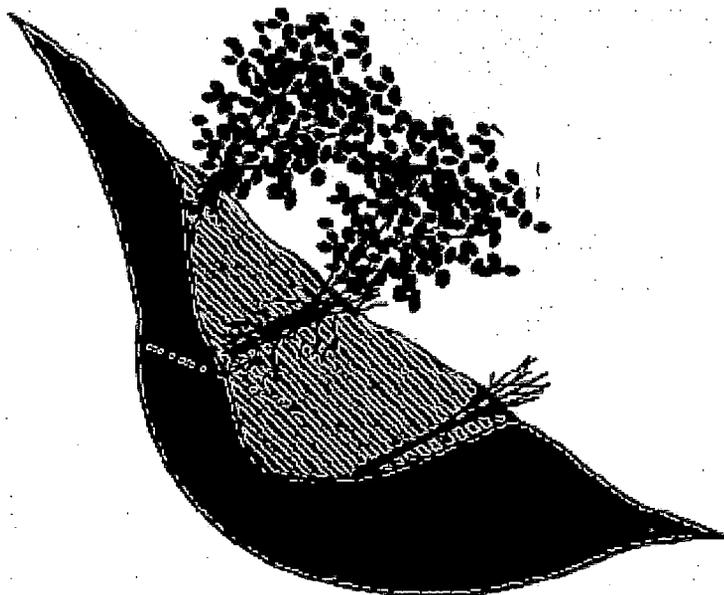


FIGURA 2-9. Esquema en perfil del emplazamiento de las capas de ramas. Gráfico de MACCAFERRI (2002)



FOTO 2-3. La foto de la izquierda muestra el talud luego de terminados los trabajos con capas de ramas, la foto derecha muestra el mismo talud con la vegetación establecida. Foto de Sotir (1989), extraído de MACCAFERRI (2002).

2.4.5 Capas de ramas con geomantas biodegradables

Descripción

Consiste en usar geomantas (geogrillas) entre las capas de ramas en taludes de relleno. Las capas de ramas se colocan de la manera convencional, cumpliendo las mismas propiedades, aunque a diferencia del método convencional, las geogrillas aumentan la estabilidad del talud.

Usos

Capas de ramas con geogrillas pueden ser usados para prevenir la erosión y mejorar el drenaje en taludes muy inclinados de relleno. Son una solución para estructuras verticales de retención, cuando es necesario ahorrar o respetar el área horizontal en la base o sobre el talud.

Esta técnica también puede ser usada en taludes que soportaran esfuerzos de tracción, como canales de drenaje y corrientes de agua en riberas.

Materiales y Preparación

Los materiales de las capas de ramas son los mismos del método convencional. Las longitudes deben ser lo mas largas posibles, en el caso de rellenos, se debe aprovechar la longitud al máximo. El elemento inerte puede ser geogrillas sintéticas o poliméricas. Las geogrillas pueden ser seleccionadas de acuerdo a su resistencia a la tensión, deben estar espaciadas verticalmente para proveer un refuerzo mayor.

Esta técnica puede ser considerada dentro de la estabilización biotécnica, dado que emplea un producto inerte, pero en este caso tanto la geogrilla como las capas de arbustos, son elementos igual de importantes, y se describe para dar al lector mayor imaginación sobre le uso de las técnicas de bioingeniería.

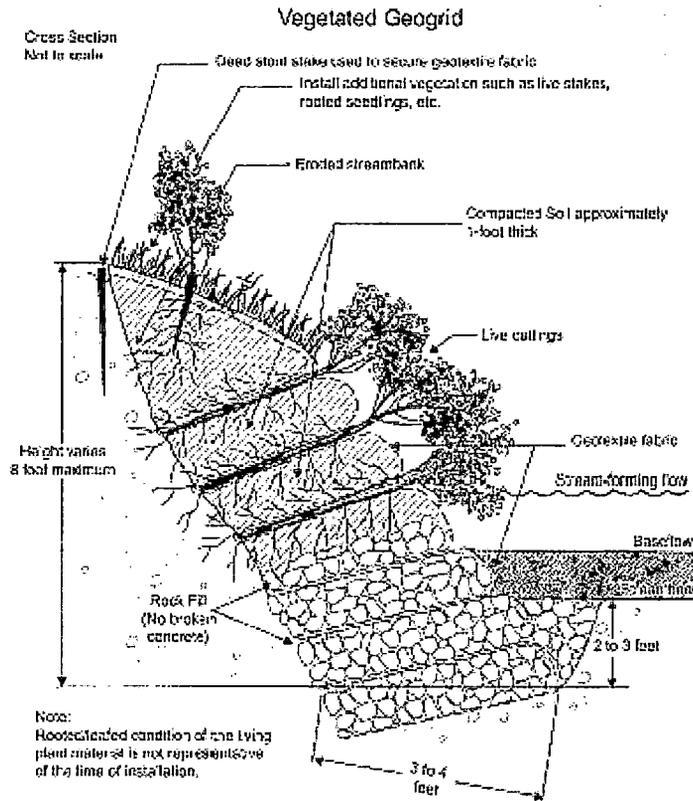


FIGURA 2-10. Esquema en perfil de la construcción de capas de ramas con geogrillas para riberas de ríos. Gráfico: www.wcdoe.org

2.4.6 Relleno compacto vegetado

Descripción

Esta técnica consiste en usar capas de ramas vivas y relleno compacto para reparar agujeros y depresiones en taludes. Largas estacas de madera son usadas de manera que penetran todo el relleno y parte de la superficie de las deflexiones o cárcavas.

Aplicación

Esta técnica es usada para reparar y rellenar pequeñas deflexiones y cárcavas en taludes naturales, de corte y riberas de ríos. Esta técnica refuerza el relleno usado para reparar la deflexión y protege a su vez de los agentes hídricos. Branchpacking es usado en depresiones no mayores a 1.2 m de profundidad y 1.2 m de ancho. Se pueden realizar conjuntamente trabajos de subdrenaje, si las condiciones lo ameritan.

Preparación

Las ramas vivas pueden tener de 1.25 a 5 cm de diámetro. Ellas deben ser lo suficientemente largas para cubrir todo el relleno hasta la superficie de la depresión. Las estacas de madera deben ser lo suficientemente largas para penetrar todo el relleno y entre hasta el talud original. Gray y Sotir (1996) recomiendan longitudes de 1.5 a 2.4 m, y de 7.5 a 10 cm de diámetro.

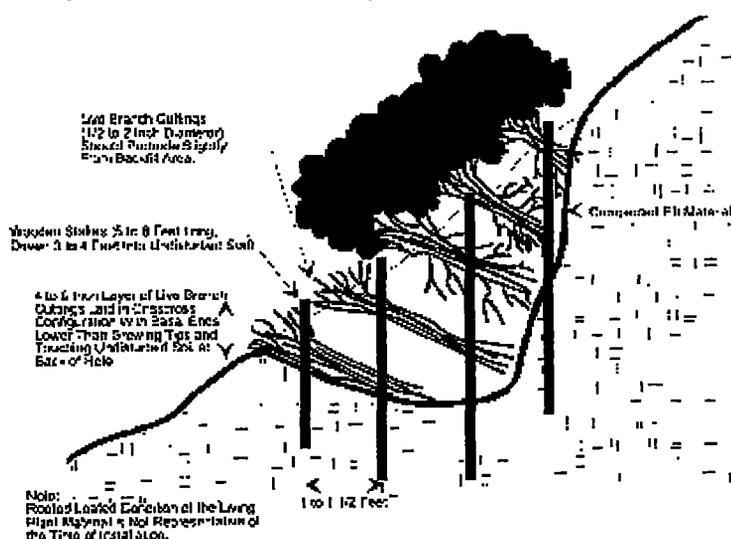


FIGURA 2-11. Esquema de la construcción en corte. Gráfico descargado de la dirección: www.mass.gov

2.4.7 Reparación de cárcavas con relleno vivo

Descripción

Esta técnica consiste en usar capas de ramas vivas y relleno compacto para reparar agujeros y depresiones en taludes. El relleno reforzado puede ser usado para reparar surcos o pequeñas cárcavas. Su uso es similar al Branchpacking, pero es preferido en depresiones largas de taludes, como cárcavas.

Aplicación

Live Gully Repair Fill es usado para reparar y rellenar pequeñas deflexiones y cárcavas en taludes naturales y de corte. Esta técnica refuerza el relleno usado para reparar la deflexión y protege a su vez de los agentes hídricos. Live Gully Repair Fill es usado en cárcavas no mayores a 0.6 m de profundidad y 0.6 m de ancho y 4.5 m de largo. Se pueden realizar conjuntamente trabajos de subdrenaje, si las condiciones lo ameritan.

Preparación

Las ramas vivas pueden tener de 1.25 a 5 cm de diámetro. Ellas deben ser lo suficientemente largas para cubrir todo el relleno hasta la superficie de la depresión.

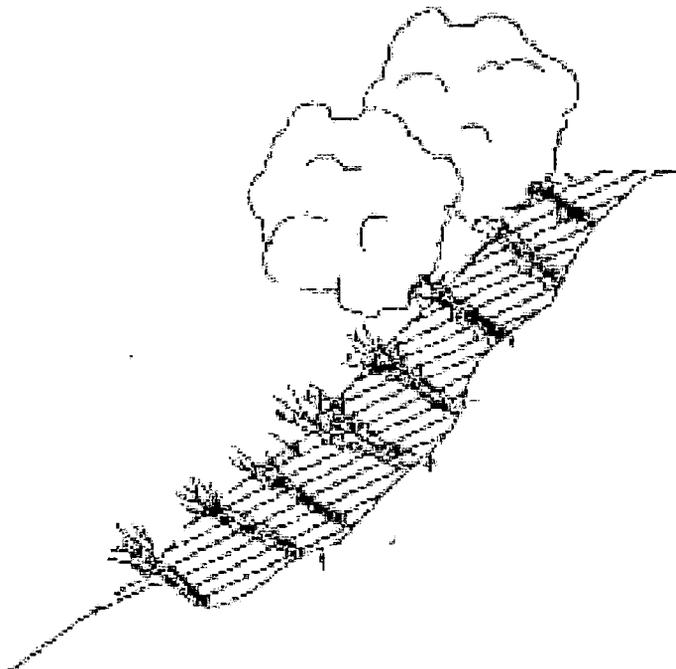


FIGURA 2-12. Esquema de la construcción en corte. Gráfico descargado de la dirección: www.mass.gov.

2.4.8 Muro – cajón vegetado

Descripción

Esta técnica consiste en el empleo de una caja hueca, constituida principalmente de vigas de madera. Esta estructura está constituida por troncos o palos de madera, que se aconseja que sean de la zona. La estructura es rellena con un adecuado relleno, en capas con ramas vivas.

Objetivo

Las ramas vivas ubicadas dentro de la caja pueden extenderse a lo largo de la caja en el relleno, hasta el suelo del talud a estabilizar. Una vez que las ramas están establecidas, la futura vegetación ira tomando una función estructural en conjunto con los elementos de madera del cajón. Las raíces y los tallos ayudan a formar una estructura uniforme con el relleno y el armazón de madera.

Efectividad y Aplicaciones

- * Es necesario en la base de los taludes donde un pequeño soporte puede ser usado para reducir la inclinación del talud y proteger el pie de los agentes hídricos.
- * Tiene apariencia más natural que sistemas inertes, es decir posee impacto visual positivo.
- * Puede usarse en altas inclinaciones.
- * Las cajas vivas no son recomendables para resistir esfuerzos de tierra laterales. Estos pueden construirse hasta una altura máxima de 1.8 m, desde su cimentación.

Materiales

Las ramas vivas tienen las mismas especificaciones de las capas de ramas.

La construcción inerte esta formada por palos de madera o troncos de 10 a 15 cm de diámetro; siempre y cuando estos troncos no puedan reproducirse por estaca.

Algunos autores consideran a esta técnica dentro de la estabilización biotécnica.

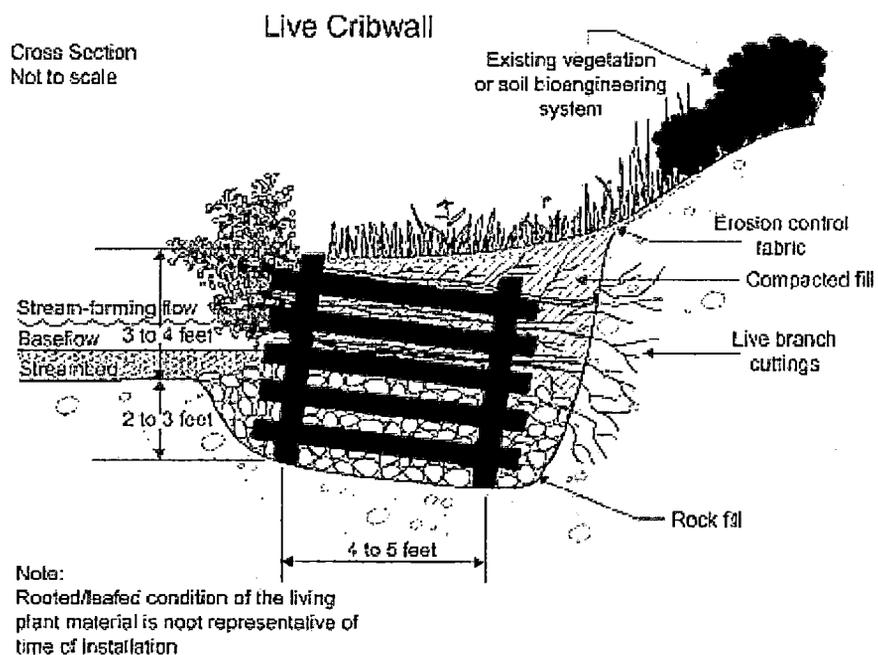


FIGURA 2-13. Esquema del muro cajón vegetado. Gráfico extraído de www.wcdoe.org.

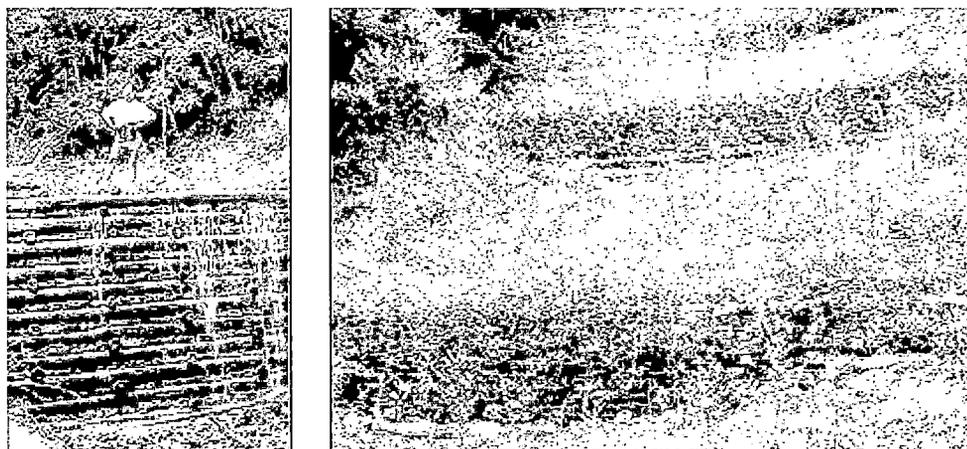


FOTO 2-4. Muro cajón vegetado (Schiechtl, 1994)

2.4.9 Colchón de ramas de arbustos

Descripción

Esta técnica es la combinación de estacas vivas, fajinas vivas y ramas cortadas que son instaladas como cobertura estabilizadora. La aplicación típica de esta técnica son las riberas y taludes.

Efectividad y Aplicaciones

- * Funciona bastante bien para soportar flujos en riberas.
- * Usado en pendientes donde existen corrientes de agua.
- * Captura los sedimentos en condiciones de flujo.

Preparación

La preparación de las estacas vivas y de las fajinas vivas es de la forma convencional.

Las ramas usadas deben ser de 1.5 a 3 m y de 3.5 cm de diámetro. Las ramas son colocadas sobre el talud, con su extremo aguas arriba incrustados en el talud. Las ramas se colocan en el talud como una capa de 10 a 15 cm. Se puede usar alambre galvanizado 2-9 o 10 para formar una malla que retenga temporalmente las capas de ramas.

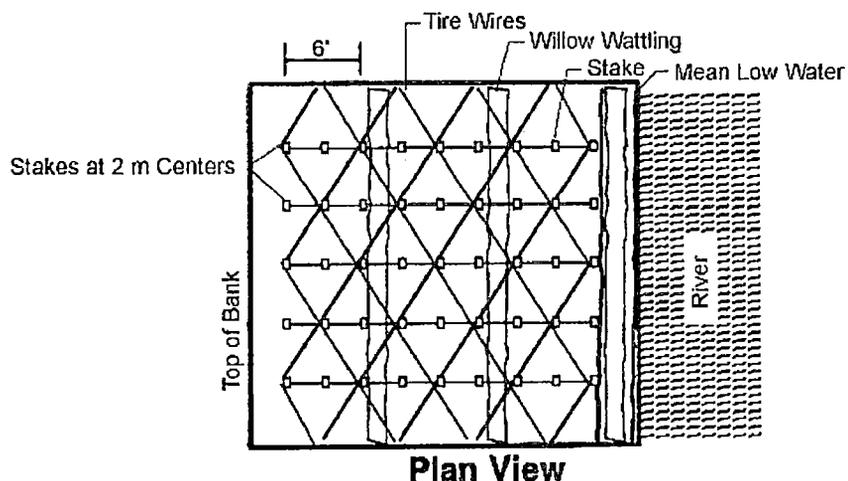


FIGURA 2-14. Vista en Planta que muestra la configuración del colchón de ramas; las fajinas vivas son llamadas aquí como willow waiting. Gráfico de Allen H. H. Y Leech J. R., 1997.

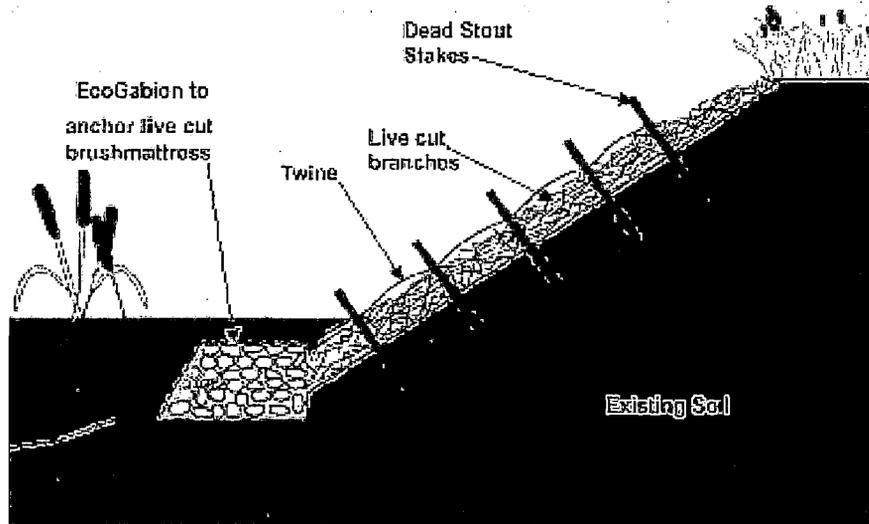


FIGURA 2-15. Vista en Corte de un ejemplo típico para protección de riberas usando capas de ramas; el acomodo de las ramas es fijado por estacas vivas. Maccaferri (2002).

2.4.10 Sistema de arbustos y cables

Descripción

Esta técnica es construido con arbustos intactos que son usualmente unidos por cables horizontales, cada planta debe ser amarrada con el cable. Cada arbusto es anclado en el suelo. Se usan arbustos maduros de tronco leñoso o árboles pequeños, efectuando trabajos de corte para emplazar las raíces de la vegetación.

Aplicaciones y eficacia

- * La configuración de esta técnica la hace capaz de atrapar sedimentos y propicia un buen ambiente para las especies nativas.
- * No es apropiado en zonas cercanas a puentes u otras estructuras donde haya un alto potencial de daños por flujo de agua.
- * Tiene una vida límite y necesita ser reemplazada periódicamente, dependiendo del clima y de las duraciones de los arbustos.
- * Puede ser dañado con la acción de flujos donde exista arrastre de partículas de hielo.
- * Requiere un tratamiento periódico para reparar los daños o los arbustos dañados.

Preparación

Cada arbusto es colocado con un respectivo anclaje rectangular de aproximadamente 20 cm de diámetro y 1.2 m de largo, como se muestra en la siguiente figura.

Los cables son colocados de manera horizontal y amarra las partes leñosas de los troncos y las ramas más fuertes, de manera que los arbustos estén como tendidos en el talud.

Si las condiciones lo ameritan, se pueden instalar anclajes principales, en la cabeza del talud, de 1.8 m de profundidad.

Observación

Esta técnica no es muy utilizada, dado que según la experiencia, requiere regular mantenimiento. Se puede usar si se tiene un buen suministro de arbustos y se

desean resultados rápidos. La ventaja es que trabaja desde las primeras semanas porque la vegetación se instala con raíces.

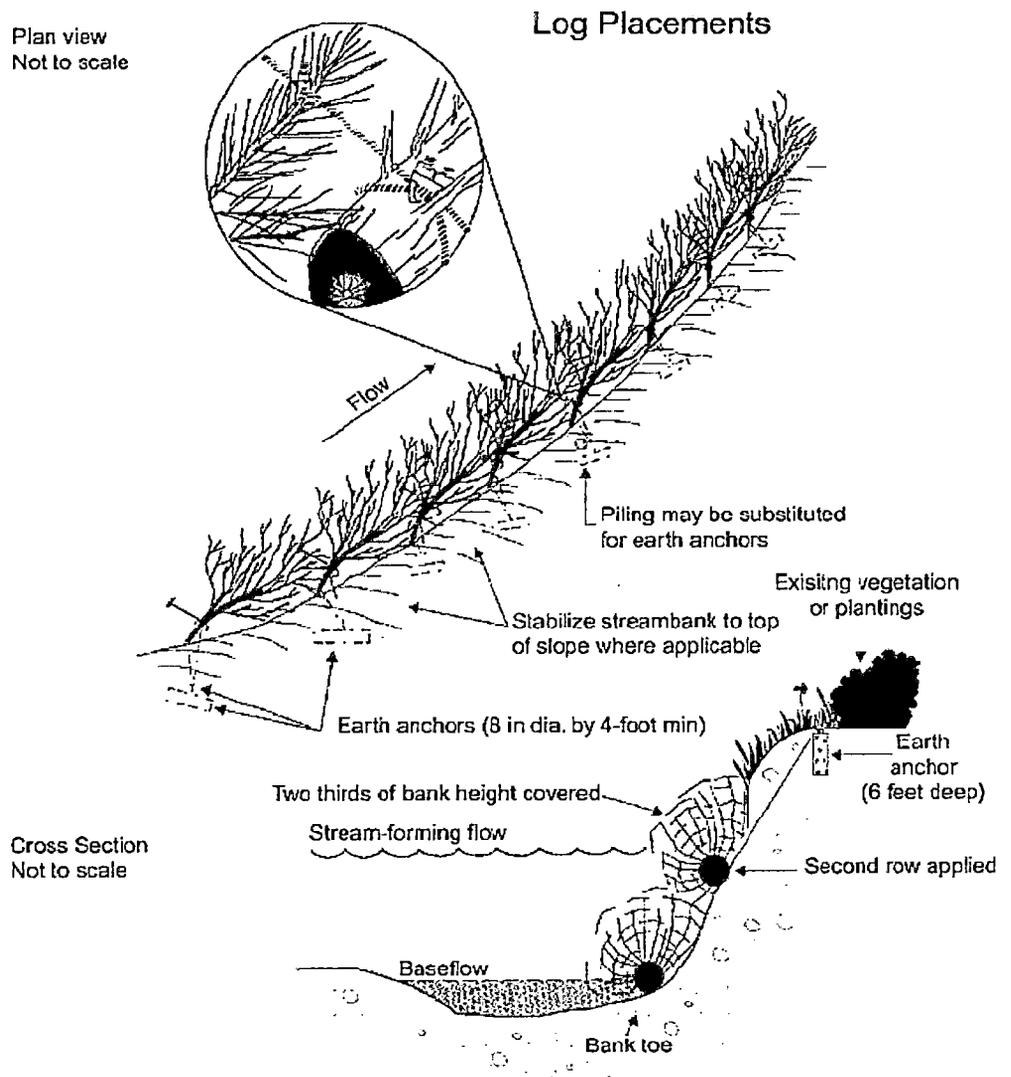


FIGURA 2-16. Esquema detallado, nótese el detalle del amarre con los troncos y ramas. Gráfico descargado de www.wcdoe.org

2.4.11 Estacas Vivas con Enrocado

Descripción

Es una aplicación del uso de las estacas vivas, usando enrocado.

En este caso el enrocado protege al suelo de la erosión de grandes flujos, y las raíces de las estacas dan firmeza al terreno, ofreciendo resistencia contra el lavado de finos.

La colocación y diseño de las estacas vivas, se hace de la forma convencional.

Usos

Es usado en pendientes donde la acción de grandes flujos actúen con frecuencia, por ejemplo en riberas de ríos y taludes de zonas muy lluviosas.

El diseño del enrocado, no es de interés del tema, pero se procede con los métodos convencionales, sin hacer participar la vegetación.

Preparación

Primero se hincan las estacas de la manera convencional y luego se colocan las capas de riprap.

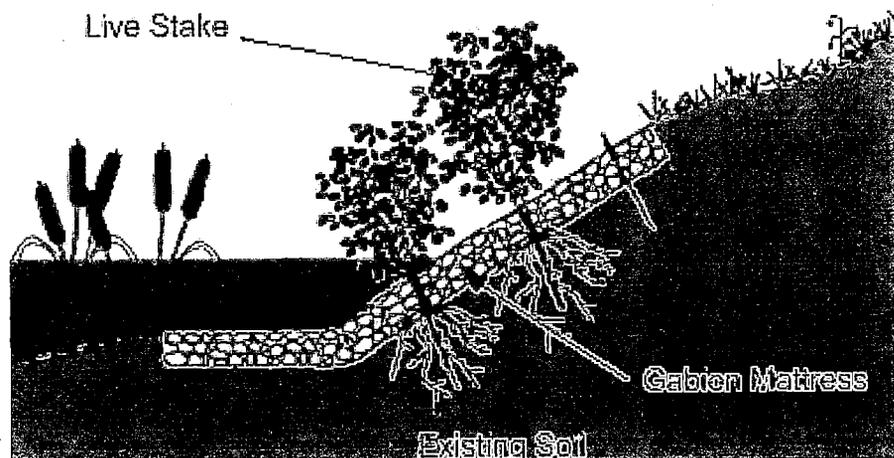


FIGURA 2-17. Vista en corte de la técnica. African gabions - Maccaferri, 2002.

2.4.12 Protección con pastos

Esta es la técnica mas simple y sencilla de los métodos de bioingeniería de suelos, en ocasiones, si se dispone de buenas especies la vegetación o revegetación puede dar buenos resultados.

Métodos de siembra

- **Semillas.-** El aporte de semillas al suelo generalmente se realiza de las siguientes maneras:
 - Por extendido directo, se usan métodos manuales o mecánicos dependiendo de la topografía, en el Perú los agricultores tienen diversas maneras de colocar las semillas al suelo. También se pueden usar maquinas motorizadas e incluso aviones e helicópteros.
 - Por siembra individual de semilla, generalmente este tipo de siembra es para arbustos medianos, grandes y árboles. Para taludes es necesario que las semillas estén cubiertas por un espesor de suelo de cultivo de 2 a 3 cm de espesor.
 - Hidrosiembra, el hidrosembado es una técnica de siembra que cuenta con más de 50 años de desarrollo en los EEUU y de reciente implementación en el Perú. Consiste en un sistema de siembra mecánica hidropulsada. Emplea una mezcla compuesta de semillas, fertilizante, adherentes, mulch y agua, que en conjunto se le conoce como slurry. Generalmente se aplica este método para pendientes moderadas a críticas.
- **Transplantes.-** Consiste en la siembra de la planta directa, con raíces, para esto es necesario tener la planta entera en perfectas condiciones.
 - Viveros, generalmente cada departamento del Perú tiene su propio vivero, el problema es que en los viveros se encuentran plantas ornamentales o forrajeras, muy pocas veces se encuentran plantas que puedan usarse en control de erosión. En Lima hay muchos viveros, incluso la misma universidad (UNI), tiene el suyo
 - Fuentes nativas, las plantas pueden arrancarse donde crezcan en forma silvestre, es importante que un especialista en vegetación

recomiende si es apto transplantar el pasto, esto depende de las condiciones de topografía y suelos, pues se debe tener cuidado que sean las mismas condiciones.

- Cespedones, ésta técnica consiste en la colocación de capas de tierra vegetada, las cuales se cortan cuidadosamente de los viveros y se colocan en taludes conformados para su buen desarrollo. En el mercado peruano, es bastante conocida esta técnica para jardines y canchas deportivas, o sea donde no haya inclinación y acción de flujos. Según experiencias peruanas, brasileras y colombianas esta técnica no es buena para control de erosión, a menos que se quiera vegetar taludes suaves.

Preparación del sitio

- Conformación del talud, es necesario trabajar con una inclinación que permita que el talud sea geotécnicamente estable y que permita el normal crecimiento para la vegetación.
- Escarificación, consiste en dejar rugosidades en la superficie original del suelo, ya sea para que el suelo de cultivo tenga mayor adherencia o si se tratase de un suelo original fértil, para permitir que la humedad sea retenida. Este trabajo se puede realizar con rastrillos o con las orugas del buldózer.

Diseño de la plantación

Está referida a la disposición geométrica de las plantas a ser instaladas en el terreno definitivo.

- Plantación en Tres bolillo, protege al suelo de la erosión porque no deja espacios rectos sin vegetación a lo largo de la pendiente, evitando la formación de surcos o canales. Esta técnica es buena para interceptar la lluvia, pues maximiza la cobertura aérea con el menor número de plantas posible.
- Plantación en Líneas, es exactamente como se describirá en la siguiente técnica usando Vetiver, se plantan los cercos de pasto paralelos a las curvas de nivel para generar una barrera contra la erosión superficial.

En ocasiones es útil combinar los dos tipos de plantación, por ejemplo sembrando pasto de buena cobertura en tres bolillo, intercalando con barreras de Vetiver.

A continuación se muestran algunos ejemplos de uso de pastos en combinación con estructuras inertes (biotécnica) y ejemplos con pastos en curvas de nivel.

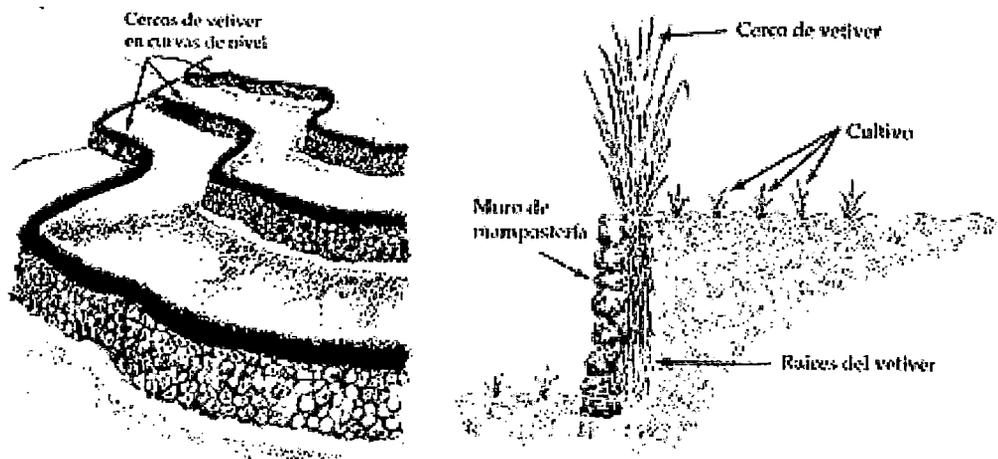


FIGURA 2-18. Cercos usados como protección de los muros de mampostería en terrazas de cultivo. Banco Mundial, 1995.

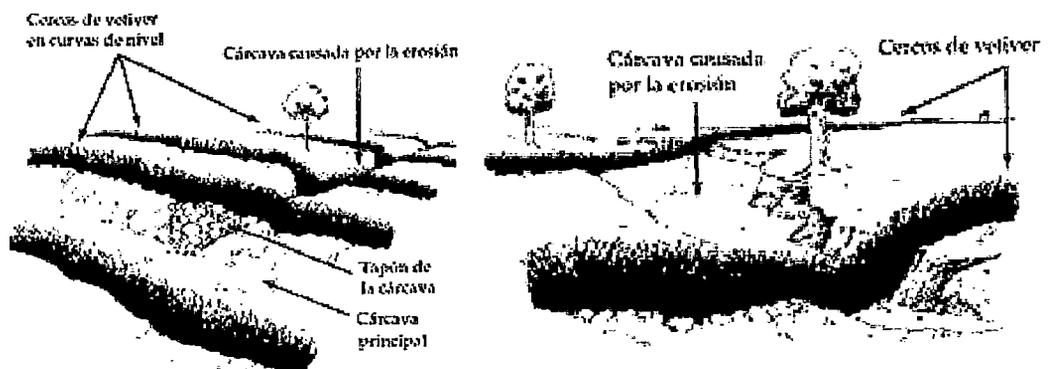


FIGURA 2-19. Cercos usados en cárcavas, éstas representan zonas propicias para el establecimiento del Vetiver, porque son zonas húmedas. Banco Mundial, 1995.

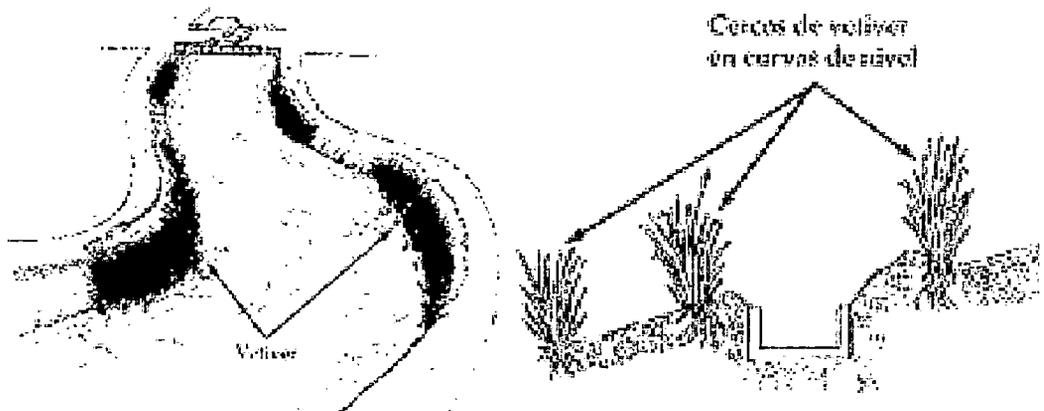


FIGURA 2-20. A la izquierda, cercos usados como protección en canales de riego. A la derecha, cercos que reducen la erosión del suelo hacia ambos lados de un canal en una ladera. Banco Mundial, 1995.

El uso de geosintéticos y fibras naturales en combinación con pastos es una técnica bastante usada en el Perú, muchos autores reconocen estas técnicas dentro de la bioingeniería de suelos, aunque otros las destacan dentro de la biotecnología.

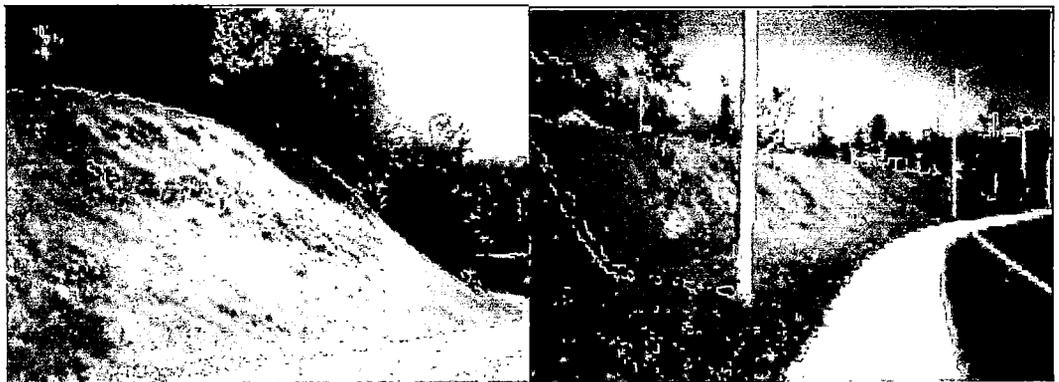


FOTO 2-5. Ejemplos de revegetación en zonas lluviosas, ambos casos para protección de carreteras. African Gabions - Maccaferri, 2002.

Protección del pasto con geosintéticos

Para ciertas condiciones el pasto por sí solo no es capaz de proteger el suelo, por ejemplo en pendientes moderadas, en cárcavas grandes, en taludes de presas de tierra, etc; o donde sea necesaria la protección durante la germinación de las semillas.

Muchos autores le denominan a esta área de ingeniería estabilización biotécnica, pues se usa tanto vegetación como materiales inertes, aunque existen productos 100% biodegradables como las redes de coco y jute.

Para estos casos, existen los geomantos o mantos para control de erosión, que se instalan antes que el pasto germine, de manera que los mantos se enredan con las raíces, generando de esta manera mayor resistencia a que el pasto sea arrancado.

Entre los productos más usados en conjunto con pastos se encuentran:

- Mallas de coco y de jute, 100% biodegradables; usados cuando es necesario proteger el suelo mientras la planta está germinando. Estos a su vez provienen de nutrientes al suelo mientras se van degradando. Las mallas naturales confinan el suelo frente a la acción de las lluvias mientras la vegetación germina. La cantidad de abono que pueda proveer un manto biodegradable depende de su propio peso.

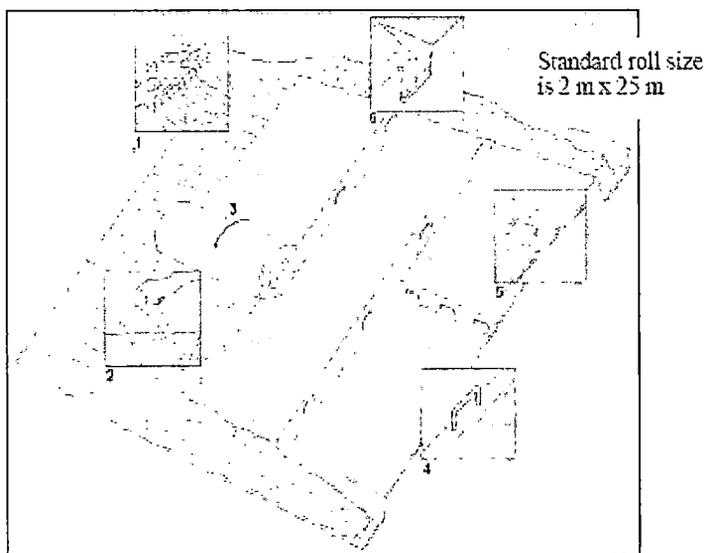


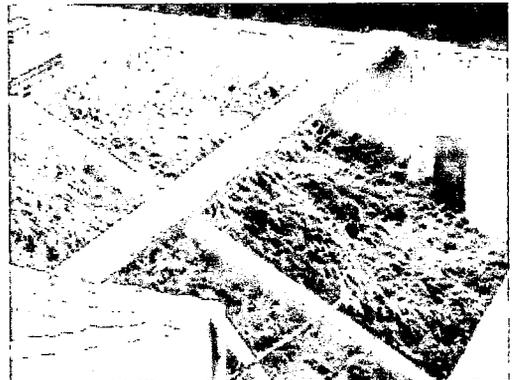
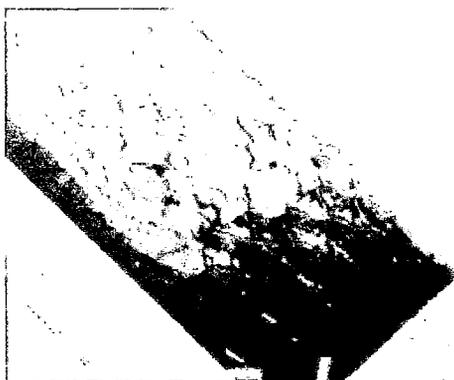
FIGURA 2-21. Esquema de colocación de la red de coco. Maccaferri, 2002.

- Geomantos; a diferencia de los anteriores estos no son biodegradables, siempre permanecerán entre las raíces de la vegetación y el suelo. Su función es la de confinar las partículas con las cuales el geomanto es colmatado, facilitando el crecimiento de la vegetación y garantizando una buena interacción suelo/material a través del anclaje de las raíces.



FOTOS 2-6 y 2-7. Antes y después, con el uso de geomantos MacMat®. Maccaferri, 2002.

- Geoceldas; el Sistema de confinamiento celular (Geoweb®); es aplicado en distintas ramas de la ingeniería. Para el caso que nos compete, control de erosión, este sistema consta de una red con espesor apreciable, con aberturas similares a las de un panal de abejas. Este sistema permite confinar el suelo a la vez que permite el drenaje, el anclaje de las raíces a través de éste y la retención de material por deslizamiento, a través de estacas que pueden ser estacas vivas.



FOTOS 2-8 y 2-9. Durante el llenado con tierra de las geoceldas y luego de 40 días de crecimiento del pasto.

2.4.13 Cercos vegetales de Vetiver en curvas de nivel

Descripción

Este pasto es originario del sureste Asiático, especialmente de Malasia y está siendo utilizado en los países tropicales de todo el mundo. Su ambiente nativo son los suelos tropicales gravosos, húmedos con PH desde 4.5 hasta 10.5.

El Vetiver es adaptable para condiciones de 0 a 250 msnm, temperaturas de 0°C a 45 °C y precipitaciones de 600 a 6000 mm al año.

Los profesionales ligados al medio ambiente no aceptan la propagación por el mundo del Vetiver, pues representa agregar una especie extranjera, y esto puede traer problemas ecológicos importantes, como la extinción de los organismos nativos, es necesario estudiar las implicancias antes de usar el Vetiver.

En la Figura 2-24 y Figura 2-25 se presenta un corte transversal de un cerco vegetal de **Vetiver** (*Vetiveria Zizanoides*) en curvas de nivel. Las características físicas del Vetiver lo hacen ideal para este tipo de construcciones, que ya es de conocimiento mundial. Las hojas y los tallos de la planta retardan el escurrimiento del agua cargada de finos, debido a lo cual éstos quedan depositados detrás de la planta, en tanto que el agua sigue escurriéndose por la pendiente, a una velocidad mucho menor. El sistema radicular esponjoso de la planta, fija el suelo hasta una profundidad determinada. Al formar una densa cortina subterránea que sigue las curvas de nivel del terreno, las raíces impiden la formación de surcos, cárcavas y túneles.

En La Figura 2-25 se puede notar que debido a la retención de suelo detrás de las plantas, con el tiempo y la acción del agua se formaran terrazas naturales, o sea que los ángulos para la estabilidad serán mas apropiados gracias a los cercos vegetales.

El propósito de las curvas de nivel es generar la misma energía de llegada de la escorrentía para todo el cerco. La distribución entre cercos debe ser verticalmente homogénea, para generar el mismo efecto en todos los cercos, aunque se pueden tener distintas consideraciones dependiendo de la morfología del terreno. El criterio de las curvas de nivel a igual distancia vertical garantiza que no existan zonas débiles a lo largo del cerco.

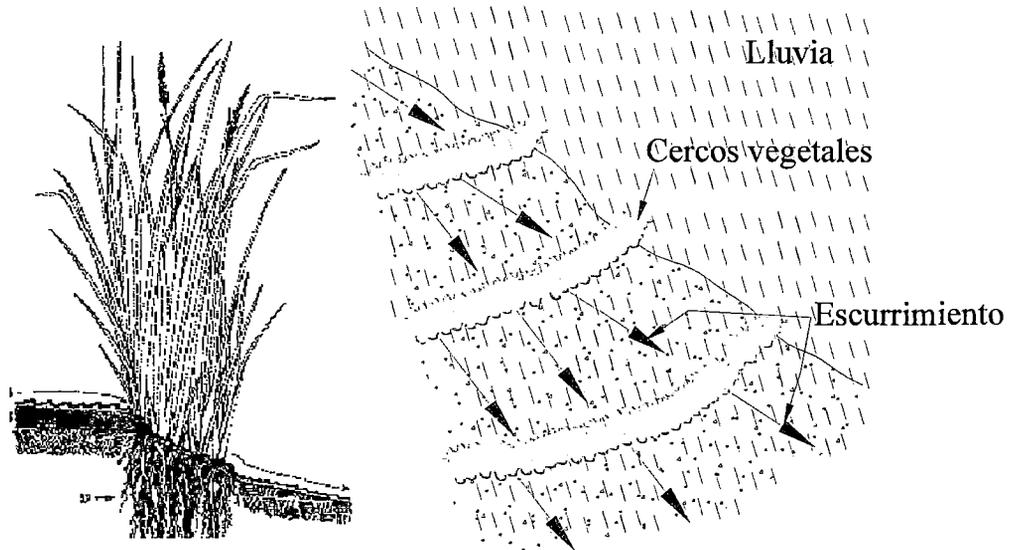
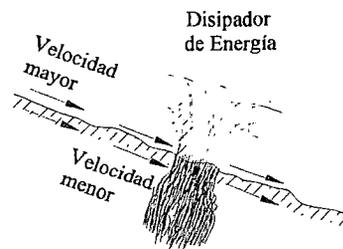


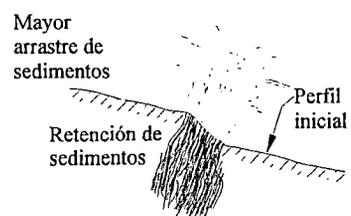
FIGURA 2-22 y 2-23. Apariencia del Vetiver. Banco Mundial,1995; y esquema de la acción de los cercos vegetales frente a los agentes hídricos.

Cerco Inicialmente
emplazado



Pendiente inicial
del terreno

Cerco luego de un
tiempo de emplazado



Terraza natural
formada con el tiempo

FIGURA 2-24. Funciones del cerco vegetal y la formación de terrazas por acumulación de sedimentos.

Usos

Se pueden usar como límites de predios agrícolas, su espesa vegetación protege a los cultivos de la escorrentía superficial, y su espesa densidad de raíces hace que retenga la humedad y conserve la humedad del suelo.

También puede usarse como protección de las riberas de los ríos.

Es bastante usado en taludes de todo tipo (corte y relleno), para prevenir la erosión superficial, y también influye en la estabilización geotécnica, dado que sus raíces son fuertes y espesas, y se han reportado longitudes de raíces de hasta 3m.

Es usado en conjunto con árboles para la estabilización de laderas, sembrándose aguas debajo de las líneas de árboles, para proteger de la erosión en las bases de éstos.

También es usado para incitar la sedimentación y frenar la erosión en cárcavas y surcos.

Puede ser usado para proteger la cimentación de los puentes.

También se usa en protección de canales de riego y acueductos en laderas, en este caso se puede plantar a los costados del acueducto, evitando la pérdida de suelo aguas arriba y abajo del acueducto.

Puede usarse esta técnica en los taludes aguas abajo de las presas de tierra, evitando la pérdida de finos y evitando la saturación de las capas superficiales de la presa.

Preparación

El Vetiver debe plantarse en macollas, debe tener de 15 a 20 cm de longitud en las hojas desde la base, y las raíces deben tener 10 cm.

Las champas de Vetiver en un mismo cerco deben tener un espaciamiento de 10 a 15 cm.

El intervalo vertical entre los cercos de Vetiver depende de la pendiente del talud, se pueden seguir las recomendaciones del Banco Mundial, expresadas en la publicación "Vetiver: la barrera contra la erosión", Washington, 1995

La técnica de cercos de Vetiver en las curvas de nivel, es considerado de manera especial, dado que no requiere mayores obras de bioingeniería, y es una técnica reconocida y aplicada a nivel mundial, incluso es bastante aplicada en

Centroamérica, en el Perú, su uso es bastante difundido en la Selva, específicamente Pucallpa por el Centro Internacional de Investigación en agroforestería (ICRAF).

Es usado para reducir los procesos erosivos producidos por las fuertes lluvias, exclusivamente para proteger zonas agrícolas.

También es usada en zonas aledañas al río Aguaytia, donde el río destruye las orillas en épocas de lluvias.

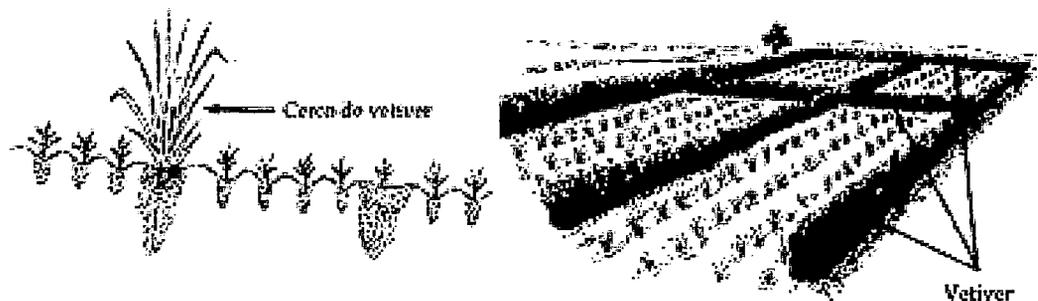


FIGURA 2-25. A la izquierda se muestra un esquema para el uso del Vetiver en conjunto con cultivos alternativos, para la conservación de la humedad. A la derecha se muestran cercos usados como separadores de predios agrícolas. Gráfico : Banco Mundial, 1995.

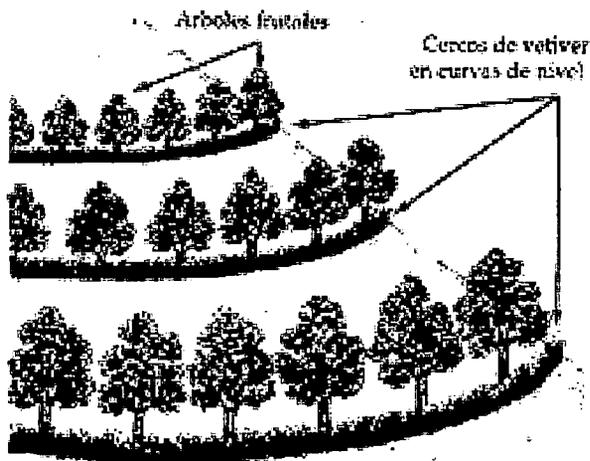


FIGURA 2-26. Cercos vegetales usados como protección a los árboles empleados con fines de estabilización. El Vetiver; emplazado aguas debajo de la base de los árboles; impide la erosión en la base de los árboles. Gráfico: Banco Mundial, 1995.

2.4.14 Diseño de las obras de bioingeniería

En realidad es muy difícil encontrar bibliografía acerca del diseño de este tipo de obras, sólo se encontrarán partes sueltas y sin muchos criterios de cálculo.

El siguiente diagrama de flujo para el diseño de las obras de control de erosión en taludes a sido desarrollado por el autor de la tesis luego de estudios bibliográficos:

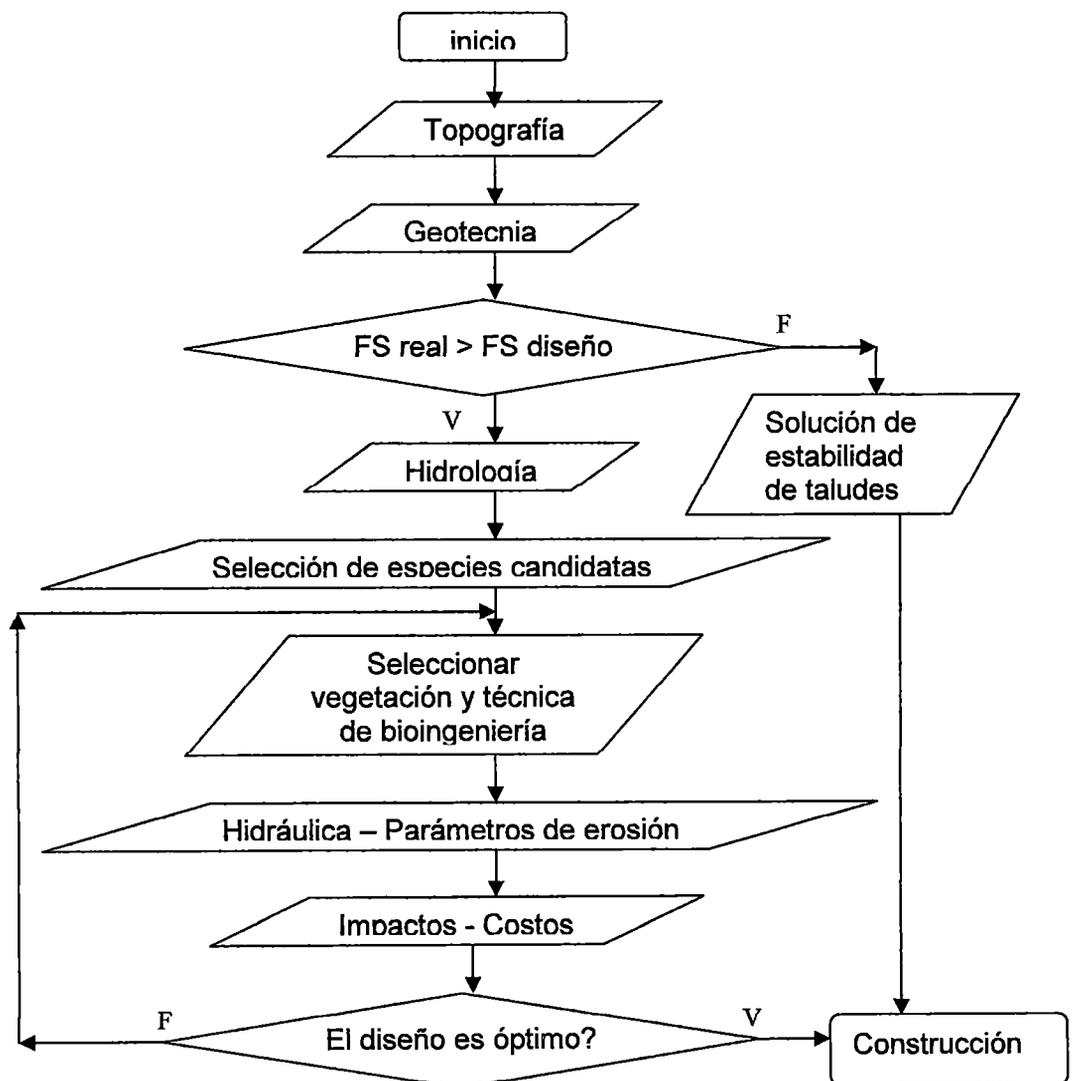


FIGURA 2-27. Diagrama de diseño de las obras de bioingeniería.

Este diagrama explica los estudios a seguir durante el diseño, en Hidráulica se debe determinar los respectivos coeficientes de rugosidad de acuerdo a la solución, para esto es preferible tomar datos de otros estudios.

2.5 Atributos y limitaciones de la bioingeniería de suelos

A continuación se citan los más importantes atributos y limitaciones que presenta la bioingeniería de suelos, según Gray y Sotir (1996):

Requerimientos laborales

La construcción de obras de bioingeniería requiere tener cierta habilidad y conocimientos, por lo que se requiere mano de obra especializada. Según el caso de la obra de bioingeniería, talvez sea necesario usar maquinaria pesada, como bulldozer por ejemplo, cuando se usan técnicas como las capas de ramas.

Uso de vegetación nativa

La bioingeniería de suelos se acomoda mejor cuando se usan elementos nativos, ya sea cuando se quiere transplantar la planta para proteger un área cercana, o para usar parte de la planta, como las fajinas vivas. La importancia de escoger material nativo radica en que se esta usando para condiciones muy similares a las que ya estuvo sometido el material (Clima, suelo, etc.)

Eficiencia de costos

Estudios de campo han demostrado que las obras de bioingeniería de suelos, donde se usan solo elementos naturales o vivos, son mas baratas que obras mixtas, donde el precio radica en el costo del material inerte. Generalmente, los costos en bioingeniería de suelos, radican en el transporte, la preparación y la mano de obra. Donde los métodos de construcción son muy laboriosos, puede ser razonable usar un sistema combinado.

Compatibilidad ambiental

La bioingeniería de suelos requiere accesos para maquinarias y trabajadores, de manera que causen los menores efectos posibles durante su instalación. Por otro lado, al término de la obra, la bioingeniería de suelos proporciona efectos

positivos al medio ambiente, dado que se han agregado especies vegetales estables.

Características de auto reparación

Al contrario que los sistemas inertes, la bioingeniería de suelos tiene la propiedad de regenerarse, dado que está compuesto por materia viva, siempre y cuando la planta no haya sido grandemente afectada. Para reparar áreas afectadas, se vuelve a sembrar. (Replanting and infill planting)

Tiempo de emplazamiento para las plantas

Es necesario tener en cuenta el periodo y tiempo de crecimiento de la planta desde su instalación hasta que reúna las características suficientes para ser un elemento de control de erosión.

Usualmente es recomendable realizar las obras antes de la temporada de lluvias, teniendo en cuenta que la planta debe estar desarrollada cuando se inicien las precipitaciones; para esto es necesario realizar un estudio hidrológico.

Sitios con dificultad

A menudo, la bioingeniería de suelos es requerida en lugares inaccesibles, donde el uso de maquinarias es complicado o imposible y la mano de obra es una gran necesidad. Por otro lado, a veces el suelo no ayuda, por ejemplo en taludes de roca o gravas, con bajo contenido de finos y baja humedad, o suelos ácidos u otras condiciones tóxicas de suelos. Las obras de bioingeniería de suelos son limitadas en taludes donde a menudo se tiene una alta velocidad de flujo, o donde es sometida a constantes inundaciones, para estos casos se pueden emplear soluciones mixtas o coberturas reforzadas.

En taludes con regular inclinación (1:1) es difícil establecer la vegetación, por eso se debe escoger el método y la especie adecuada, de acuerdo con el criterio y las experiencias pasadas.

2.6 Aplicaciones de bioingeniería de suelos

2.6.1 Restauración y mejora paisajística

Ubicación

Badalona, Catalunya, España

El Torrent de Ca l'Amigó está situado en las estribaciones de la Serralada Litoral, en el sector norte del Parc Hospitalari de Can Ruti, t.m. de Badalona. Los trabajos se realizaron a lo largo de marzo del 2002.

Descripción del ecosistema afectado

El torrente de Ca l'Amigo es un torrente de régimen mediterráneo por el que discurre agua únicamente en periodos de lluvia. Se desarrollan procesos erosivos en sus márgenes y aparece una densa masa de caña americana.

Fenómenos erosivos en los márgenes de la ribera con pendientes de hasta 1:2 con formación de pequeñas cárcavas y zonas libres de vegetación.

Invasión de caña americana (*Arundo donax*) con la consiguiente disminución de la sección hidráulica.

Ausencia total de vegetación de ribera

Solución

Instalación de red de coco, la red de coco favorece la conservación de la humedad edáfica necesaria en las plantaciones en clima mediterráneo a la vez que protegen los márgenes del torrente en caso de un aumento del caudal.

Se usaron capas de ramas con red de coco colocados de forma escalonada en el margen del torrente e intercalados con arbustos que aumentan la consolidación entre las capas de ramas y la cohesión del suelo con un sistema de raíces biotécnicamente idóneo.

La permeabilidad de la estructura facilita el drenaje natural del talud evitando los procesos erosivos.

Análisis y discusión de resultados

Se logró:

- Mejoras paisajísticas.
- Mejora de la calidad del agua.
- Renovación de los ecosistemas.
- Se logró el control de erosión y cesaron los movimientos de masa de suelo.

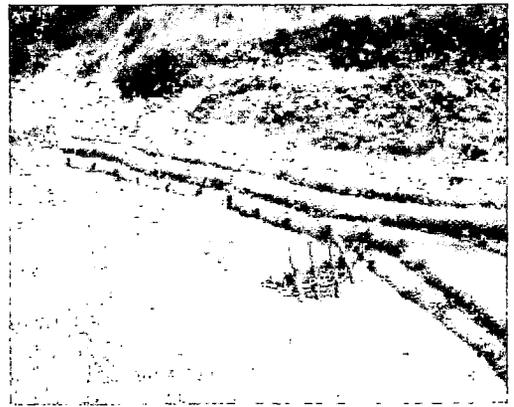


FOTO 2-10 y FOTO 2-11. Antes de las obras y Construcción, se aprecian las capas de ramas con red de coco.

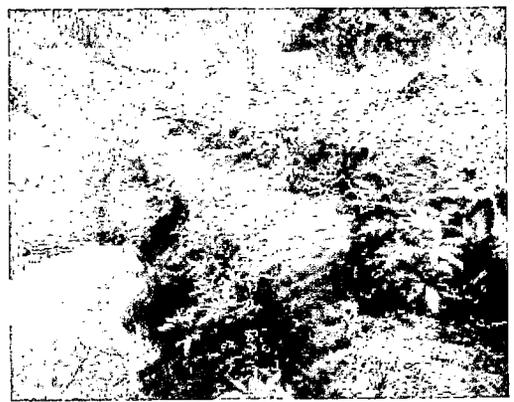


FOTO 2-12 y FOTO 2-13. Luego de tres meses de la colocación de ramas.

2.6.2 Plantación de pasto elefante

Ubicación

Cuenca de captación de Shivapuri, situada al norte de Katmandú, Nepal.

La zona está en alturas comprendidas entre 1740 y 1860 msnm.

Descripción del ecosistema afectado

En 1975 se declaró zona protegida y en 1977 el gobierno inició la construcción de una carretera circular de acceso (105 km) que facilitara la ordenación de toda aquella zona. Su trazado se hizo en una topografía de inclinación entre moderada y muy fuerte.

Entonces iban ocurriendo numerosos eventos de desprendimiento de masa, aunque ninguno muy importante.

Los factores que principalmente influenciaban a los desprendimientos eran, la humedad, movimientos sísmicos y obras civiles construidas en las cabeceras de los taludes.

Últimamente, la abundancia de grandes obras de construcción en zonas montañosas, y sobre todo de carreteras y embalses, ha pasado a ser una de las principales causas del desprendimiento de tierras.

Solución

Para contener la erosión superficial en los terraplenes, se plantó pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) y, en algunos sitios, también aliso (*Alnus nepalensis*). La siembra se inició en 1986 y se prolongó hasta 1989. Quedaron así tratados unos 20 km de terraplén.

En muchos países se ha usado el pasto elefante, originario del África tropical, para controlar la erosión superficial. Reúne buenas cualidades para consolidar el suelo y se reproduce fácilmente plantando estacas, lo cual representa ventajas en laderas muy inclinadas en que la tierra esté todavía suelta. Se reproduce impetuosamente y se extiende echando vástagos subterráneos. Tiene finalidades múltiples en el sentido de que, además de servir para contener la erosión superficial, sus hojas y sus tallos tiernos constituyen un buen forraje. Por

este último motivo es esencial cerrar al ganado el acceso a lugares recién plantados.

Se plantaron los esquejes de pasto elefante a intervalos de 45 cm, en filas paralelas, con dos esquejes por cada punto. Se colocaban formando ángulo con la superficie, con dos o tres nudos enterrados y uno asomando, con la tierra bien apisonada para impedir la formación de bolsas de aire (Ness, 1989).

La plantación se hizo a fines de la temporada de lluvias, que duraba de junio a agosto según los años. En casi todas partes prendía un elevado número de esquejes. Sólo se perdían algunos en suelos muy pedregosos, anegados, o cuando no se sembraban como es debido.

Análisis y discusión de resultados

Después de un año de desarrollo, un muestreo de la producción de biomasa hecho en 1987 en diez lugares a diferente altura, reveló un rendimiento anual de materia tierna de 127 toneladas por hectárea, con valores comprendidos entre 80 toneladas/ha en terraplenes muy inclinados a 1 850 m de altura, y 190 toneladas/ha en terreno relativamente llano a 1 790 m (Nunkoo y Ness, 1989).

Al cabo de dos años se investigó la profundidad de las raíces, las más superficiales bajaban a 0,3 m y las más profundas a 1,0 m (Hansen, 1989).

El citado pasto elefante se ha desarrollado bien en Shivapuri, en condiciones muy diversas de fertilidad y humedad. Parece que las raíces atraen a los roedores, aunque este fenómeno no se ha observado en Shivapuri. Debido a las bajas temperaturas dominantes a las mayores alturas, la planta permanecía en estado latente durante los meses fríos. Eso no tuvo efectos negativos: el suelo seguía estando bien cubierto y el pasto brotaba antes de que se iniciaran las lluvias de verano. Eso sí, la producción de forraje en invierno era escasa.



FOTO 2-14
Plantación de pasto elefante en un terraplén de la cuenca de Shivapuri



FOTO 2-15
Recogida de forraje de pasto elefante, Junto a una carretera de Nepal

2.6.3 Medidas ambientales y control de erosión

Ubicación

Guangzhou – China

Presa de Guangzhou.

Los trabajos se realizaron durante el año 2000.

Descripción del ecosistema afectado

En Guangzhou, está la presa de tierra de Guangzhou, la cual tenía serios problemas de infiltración, y según estudios la compacidad de la presa se estaba perdiendo.

La presa tiene 100 m de longitud, 10 m de ancho de cresta.

La infiltración hacía que el material fino del cuerpo de presa se pierda, se había estimado una cantidad significativa de pérdida de masa.

Por otro lado, el talud aguas abajo estaba bastante saturado y las capas superficiales se degradaban con las lluvias.

Solución

Se sembró hileras de Vetiver a lo largo de toda la presa, siguiendo las curvas de nivel.

Análisis y discusión de resultados

Se logro mantener la superficie del talud aguas abajo por debajo del punto de saturación, consecuencia de la evapotranspiración que hizo cambiar de dirección las líneas de flujo.

La vegetación brindo protección contra el impacto pluvial e hizo mas resistente al suelo de la escorrentía superficial.

Luego de 7 meses de sembrado el Vetiver la presa ya estaba completamente cubierta por esta especie.

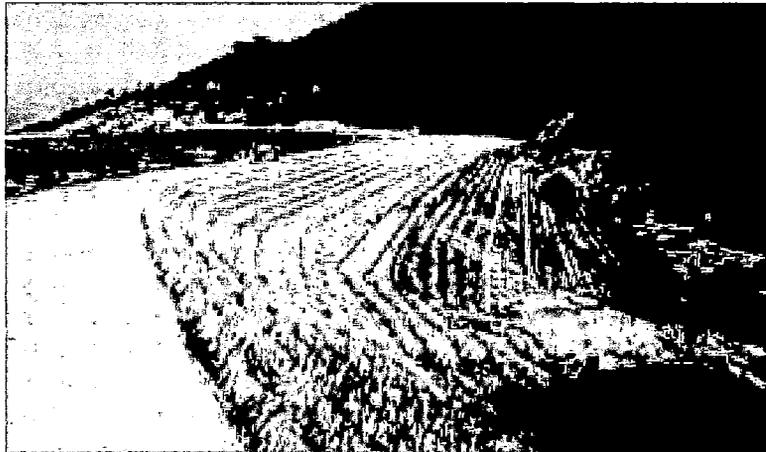


FOTO 2-16
Inicio de la siembra



FOTO 2-17
Luego de un mes

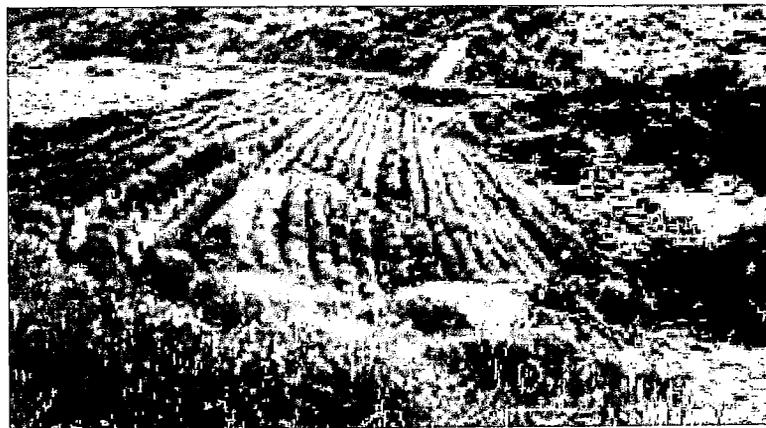


FOTO 2-18
Luego de siete meses

Plan de Proyecto y Desarrollo Técnico

En este capítulo se empieza bosquejando el ambiente a simular, se dan los parámetros del cual dependen los resultados de esta investigación y se explican las condiciones que se tomaran como hipótesis.

En la segunda parte de este capítulo, se desarrollan las ecuaciones que se usaran como modelos matemáticos usando los resultados de esta investigación; se hace una explicación detallada sobre el cálculo numérico de cada parámetro necesario en los modelos teóricos.

3.1 Plan del proyecto de investigación

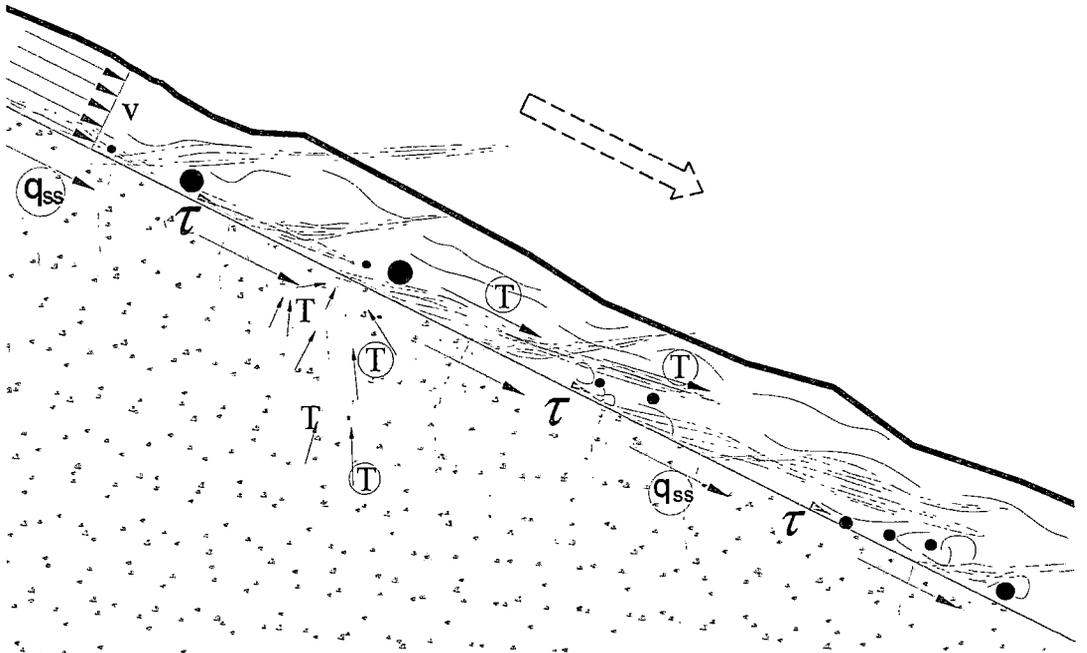


FIGURA 3-1. Acción de la escorrentía superficial en un talud.

De la figura:

T: Esfuerzos de tensión en las hojas y raíces del pasto.

v: Velocidad de flujo

τ : Esfuerzo de corte hidráulico

q_{ss} : Flujo sub superficial.

Como se muestra en la Figura 3-1, se plantea estudiar la erosión superficial en un talud de corte o relleno.

La metodología para realizar el estudio será a través de la investigación en modelo físico.

Fue necesario construir una estructura capaz de conducir agua hasta escurrirla en taludes de prueba; simulando de esta manera el flujo por escorrentía superficial originado por las lluvias.

La erosión depende directamente de los siguientes factores, según Gray y Sotir (1996):

- Clima (Intensidad de lluvia y duración, de donde se obtiene la velocidad de escorrentía y su tiempo de acción)
- Suelo (Erodibilidad, que depende del tipo de suelo y de su compactación)
- Topografía.
- Vegetación u otro tipo de cobertura

Partiendo de este enunciado y de manera más detallada, la tasa de erosión (E) está en función de las siguientes variables mensurables: pendiente del talud (i), fracción de área de vegetación (Av), altura de vegetación (hv), Caudal de escorrentía (q), tiempo de escorrentía (t), Compactación del suelo (%c), porcentaje de materia orgánica (%org), diámetro representativo (Ds) y humedad (%h).

También depende de las siguientes variables no mensurables: tipo de vegetación (veg), técnica de bioingeniería o biotécnica (bioi), es decir que es necesario efectuar pruebas de laboratorio para obtener una relación de la erosión con éstas variables.

Entonces a través de un análisis adimensional se puede encontrar que:

$$E = f(i, Av, hv, q, t, \%c, \%org, Ds, \%h, veg, bioi) \dots \dots \dots (3-1)$$

A efecto de estudiar el modelo físico, se analizará el siguiente análisis:

$$E = f(Av, v, bioi) \dots \dots \dots (3-2)$$

Lo que significa que se realizarán mediciones variando los parámetros descritos en ésta última Ecuación, tomando los siguientes enunciados como hipótesis:

- Los taludes estuvieron en estado superficialmente saturado; para esto antes de cada prueba se regó, teniendo mucho cuidado en los taludes de suelo.
- Para todas las pruebas, se tomaron los siguientes parámetros como constantes:

- Suelo, humedad y compactación del suelo sin protección; según la bibliografía estudiada; la humedad y compactación no son parámetros importantes en la erosión laminar de un suelo, es decir que su variación no genera cambios importantes respecto a la pérdida de suelo (Temple, 1987; Hanson, 1988)
 - Pendiente del terreno, aproximadamente $S_o = 0.52$
 - Tipo de pasto, altura de pasto y densidad de siembra; aunque para los dos últimos factores fue necesario determinar la densidad de pasto y altura para cada prueba, pues no resultó un valor constante a pesar que se aplicó la misma cantidad de semillas.
 - Tiempo de acción del flujo constante, fue determinado en laboratorio durante la calibración, se decidió usar un tiempo de 10 minutos, el cual se mantuvo durante todas las pruebas.
-
- Los parámetros calculados se determinaron a partir de la topografía antes de cada prueba, es decir se consideraron las características iniciales. Respecto a esto último, se sabe que la topografía cambia respecto al tiempo, es decir que el esfuerzo de corte hidráulico variará respecto al tiempo, quiere decir que para determinar valores más precisos, es necesario usar dispositivos más complejos, tomando en cuenta que en un talud la erosión se presenta en surcos.

A continuación se describirá cada parámetro mencionado anteriormente.

1. Pendiente

Se usará una pendiente de 1:2 (v:h), según la recomendación de profesionales, y según el tipo de suelo que se está usando, que es un suelo limoso arcilloso tal como se describe más adelante.

Según algunos autores, esta pendiente es la límite que se usa para revegetar con pastos.

2. Vegetación

Se utilizó el pasto Tanzania (*Panicum Maximum*), oriundo de la selva baja peruana, adaptable para las siguientes condiciones:

Altitud msnm: 0 a 2200

Temperatura °C: 20 a 30

Lluvias MM/año: 1000 a 4000

Terreno: Húmedo a bien drenado

Datos recopilados de Suárez (2004)

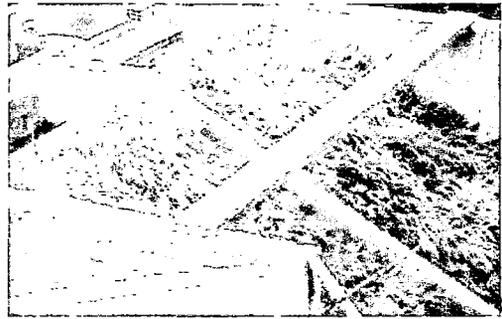
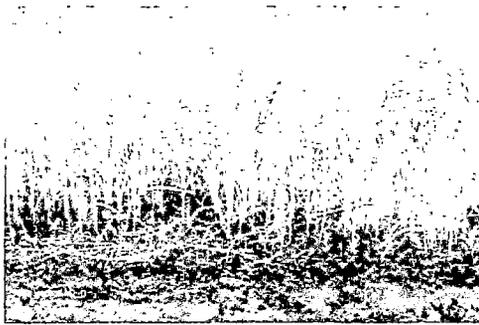


FOTO 3-1 y 3-2. Pasto Tanzania, Fotos tomadas del área de investigación (2005).

Este pasto necesita de la luz del sol y bastante humedad, por lo que se adaptaron medidas para conservar la humedad y proteger del sol al pasto en su etapa de germinación.

Para la instalación de las coberturas se usaron semillas híbridas.

3. Área de cobertura vegetal

Se usaran dos condiciones, talud sin cobertura vegetal, y talud vegetado al 100%.

La densidad de siembra que se utilizó fue de 15 Kg / Ha, o que es igual a 15gr / m²; esta cantidad fue discutida con expertos forestales y agrónomos, con experiencia en trabajos de revegetación para control de erosión.

La fracción de cobertura está representado por el parámetro "M", explicado en el capítulo 4, y es necesario para determinar el coeficiente de Manning para la vegetación. Ver Anexo B.

4. Caudal de escorrentía

Para el caso de talud sin protección, se probaron caudales aproximados de 1, 2, 3 y 6 l/s, para pastos se probaron caudales aproximados de 2, 4, 6, 15, 30 y 50 l/s.

5. Tiempo de escorrentía

Se considero un tiempo de acción del flujo de 10 min, contados a partir del momento en que el flujo ingresa al talud.

6. Obras de biotecnología

Se usaron dos tipos de geosintéticos (ver Anexo F):

- Talud 100% vegetado con geoceldas Presto® donados por ANDEX.

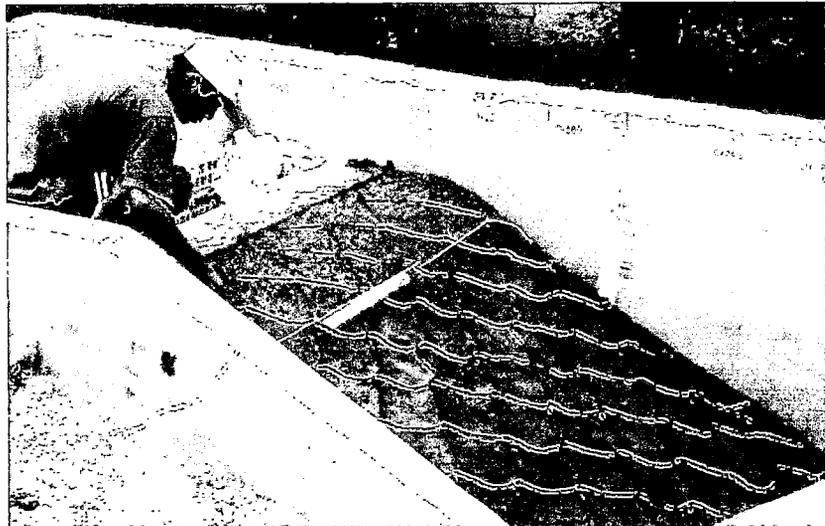


FOTO 3-3. Vista de las geoceldas rellenas con suelo orgánico en el preciso instante de la siembra.

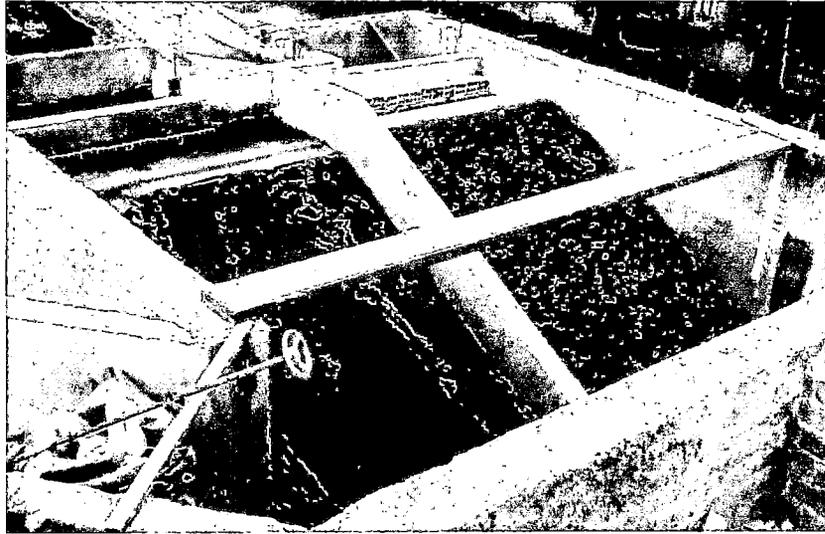


FOTO 3-4. Vista del talud reforzado con geoceldas luego de 10 días de siembra.

- Talud 100% vegetado con geomantos MacMat® de MACCAFERRI.

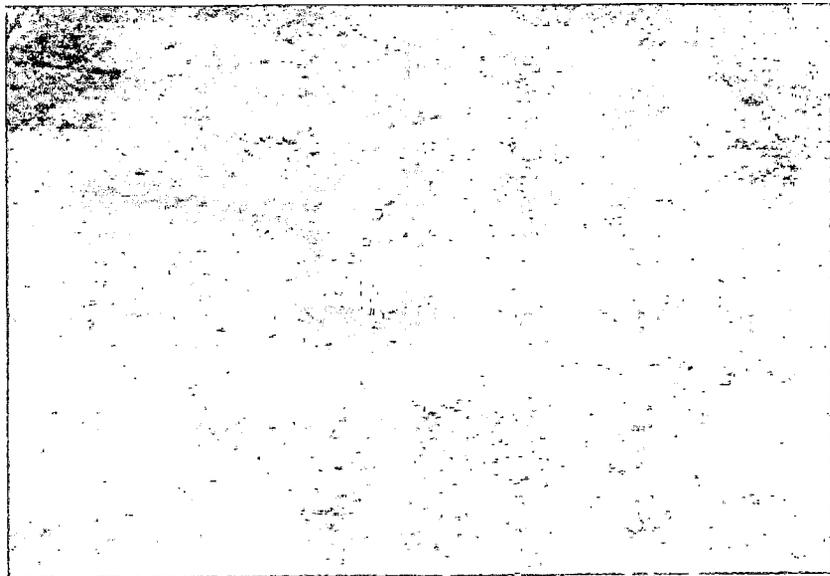


FOTO 3-5. Vista del MacMat® durante la instalación, se colocó una capa de 2 cm de suelo.

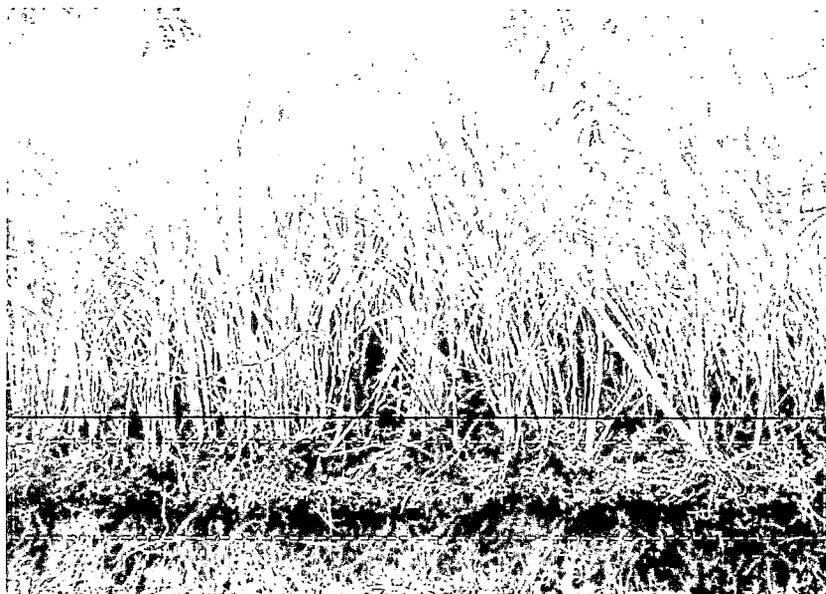


FOTO 3-6. Vista del MacMat® en el perfil del suelo (recuadro amarillo discontinuo), para 20 días de vida del pasto; la línea roja continua indica el nivel del suelo.

Los tratamientos para los dos casos anteriores son exactamente los mismos con el talud simplemente vegetado, es decir que se usó la misma semilla, y el mismo tratamiento antes, durante y después de la siembra.

7. Altura de vegetación

Para todos los casos con pruebas de taludes vegetados, se consideró una altura promedio de 20 cm. Que corresponde a un tiempo de crecimiento de 30 a 40 días para la especie estudiada. Ver Anexo B.

8. Tipo de suelo

Se requería de un tipo de suelo que facilite el establecimiento de vegetación, es por eso que se traslado suelo de cultivo del distrito de Carabaillo, para cubrir un espesor de 40 cm en el talud, teniendo en cuenta el número de pruebas y las pérdidas que se originarán durante cada prueba.

El tipo de suelo determina su erodibilidad, propiedad más importante del suelo en control de erosión y que fue explicado en el capítulo 2, de acuerdo a la clasificación SUCS, y luego de ensayos de laboratorio, se determino que el suelo es limoso arcilloso. Ver Anexo C.

9. Humedad de suelo

La condición para que el suelo sea probado fue que este saturado, lo que se logró con riego diario y justo antes de las pruebas (10 min) para todos los taludes.

El contenido de humedad promedio del suelo antes de las pruebas fue de 10% en la capa subsuperficial de 0.40 m y en estado SSH en la capa superficial.

En los taludes vegetados la humedad no es importante, aunque se regó por 10 min. antes de las pruebas.

10. Compactación del suelo

Se compactó de manera pareja, usando ladrillos kk rústicos.

La compactación la realizó una sola persona para todos los casos, consistió en rellenar en dos capas de 15 cm (espesor erosionable de 30 cm), compactando cada capa con el peso del ladrillo cuatro veces en cada punto del talud.

3.2 Desarrollo técnico

A continuación se explicarán las ecuaciones y procedimientos realizados en gabinete para obtener los parámetros con los que se elaborarán los resultados de la investigación.

Datos obtenidos en campo:

- Caudal de ingreso (Q).- medido en un vertedero de 27° para caudales menores a 10 l/s y luego en un vertedero de 90° para caudales mayores.
- Pendiente de los taludes.- Calculado a partir de la topografía.
- Profundidad de erosión (ΔZ).- Se obtiene de las mediciones de topografía realizadas antes y después de las pruebas, también se calculó en gabinete, ver Anexo B.
- Cargas agua en la poza disipadora (H), ver Anexo B.
- Altura representativa del pasto (h), ver Anexo B.
- Número de tallos por unidad de área (M), ver Anexo B.

Puesto a que es bastante difícil realizar mediciones en los taludes durante las pruebas debido a las limitaciones en equipos, en la propia estructura y por los pequeños tirantes, se tomaron en cuenta los siguiente enunciados como parte de la hipótesis en el modelamiento matemático:

- La distribución de velocidades es uniforme
- El esfuerzo de corte hidráulico se mantiene constante en un mismo punto respecto al tiempo.
- El pasto está uniformemente distribuido en todas las pruebas vegetadas.

Modelos Matemáticos

La elección de las ecuaciones de predicción a usar, se basaron en la búsqueda bibliográfica de los investigadores y las condiciones en que se elaboraron las investigaciones.

Las ecuaciones planteadas en el ítem 2.2.3 describe el desarrollo de las investigaciones en transporte de sedimentos. La mayoría de las fórmulas planteadas son producto de muestreos y ensayos en laboratorio con lecho arenoso y gravoso, y están en función del tamaño representativo del suelo D_s ; por lo tanto, no se pueden plantear estas ecuaciones para desarrollar esta investigación.

No obstante hay algunas ecuaciones que en sus supuestos no se consideraron condiciones ajenas a la erosión en suelo fino, y son:

$$\text{Duboys ,1879: } q_{bv} = k\tau_o(\tau_o - \tau_c) \dots\dots\dots(2-1)$$

$$\text{O' Brien y Rindalub, 1934: } q_{bv} = k'(\tau_o - \tau_c)^m \dots\dots\dots(2-3)$$

$$\text{Temple, 1987: } \frac{d\varepsilon}{dt} = k(\tau_e - \tau_c)^a \dots\dots\dots(2-9)$$

Todas estas ecuaciones están en función de $(\tau_e - \tau_c)$; esta resta se puede reducir a " τ_e "; porque se está ensayando suelo fino, y como se explicó en el ítem 2.2.3, " τ_c " es cero o muy pequeño según las investigaciones de Shaikh et al. (1988) en arcillas, por lo tanto se puede escribir:

$$\text{Duboys ,1879: } q_{bv} = k\tau_o^2 \dots\dots\dots(3-1)$$

$$\text{O' Brien y Rindalub, 1934: } q_{bv} = k'(\tau_o)^m \dots\dots\dots(3-2)$$

$$\text{Temple, 1987: } \frac{d\varepsilon}{dt} = k(\tau_e)^a \dots\dots\dots(3-3)$$

A continuación se desarrollarán las ecuaciones para facilitar el manejo de los datos recolectados.

Dubois ,1879

La Ecuación de Dubois fue desarrollada matemáticamente como se explica en el ítem 2.2.3.

Descomponiendo:

$$q_{bv} = \frac{dVol}{dt} = \frac{d\varepsilon \cdot dA}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} \Delta A \dots\dots\dots(3-4)$$

donde:

$\frac{dVol}{dt}$: Volumen erosionado por unidad de tiempo

ΔA : Área representativa que se erosiona una profundidad " ε ".

Considerando el procedimiento de toma de datos explicado más adelante en el capítulo 4; todas las áreas ΔA son iguales y reduciendo a partir de las ecuaciones 3-1 y 3-4:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{k}{\Delta A} (\tau_o)^2$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k_D (\tau_o)^2 \dots\dots\dots(3-5)$$

$$d\varepsilon = k_D \int_{t=1}^n (\tau_o)^2 dt$$

$$Z_o - Z_n = k_D \sum_{i=1}^p [(\gamma d_i S_i)^2] \Delta t \dots\dots\dots(3-6)$$

Donde:

Z_o : Cota de un punto representativo del área erosionar antes de las pruebas

Z_n : Cota del mismo punto luego de las pruebas.

Δt : Duración de las pruebas, (10 min)

p : número de prueba hasta el cual se estima la erosión acumulada.

Para el caso de pruebas con pastos p varía de 1 a 6, para pruebas de suelo sin protección $p = 1$, pues las pruebas no se realizaron consecutivamente.

Siendo ésta última la Ecuación que se utilizará, para calcular el coeficiente “ k_D ”, es necesario hacer un análisis de regresión con los datos obtenidos de campo.

O’ Brien y Rindlaub ,1934

Siguiendo el procedimiento anterior:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k_{OR}(\tau_o)^m \dots\dots\dots(3-7)$$

$$Z_o - Z_n = k_{OR} \sum_{i=1}^n [(\gamma d_i S_i)^m] \Delta t \dots\dots\dots(3-8)$$

Siendo ésta última la Ecuación que se utilizará, para calcular el coeficiente “ k_{OR} ”, y el exponente “ m ” es necesario hacer un análisis de regresión con los datos obtenidos de campo.

Temple, 1987

Siguiendo el procedimiento anterior:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k(\tau_e)^m \dots\dots\dots(3-9)$$

$$\tau_e = \gamma d S (1 - C_{FF}) (n' / n)^2 \dots\dots\dots(3-10)$$

; dado que la densidad de vegetación es homogénea, exuberante, y los caudales probados no llegan a una falla notable en los taludes, se considera $C_{FF} = 0$.

$$\tau_e = \gamma d S (n' / n)^2 \dots\dots\dots(3-11)$$

$$Z_o - Z_n = k_{OR} \sum_{i=1}^n [(\gamma d_i S_i (n' / n)^2)^m] \Delta t \dots\dots\dots(3-12)$$

donde:

n' : coeficiente de la rugosidad del suelo, ver ítem 2.2.3.

n : coeficiente global de Manning.

Siendo ésta última la Ecuación que se utilizará, para calcular el coeficiente “ k ”, y el exponente “ a ” es necesario hacer un análisis de regresión con los datos obtenidos de campo.

Para las pruebas de la Fase I, se considerará el esfuerzo de corte efectivo propuesto por Hanson (1990), y resumido en el ítem 2.2.3:

$$\tau_e = \gamma d S (n'/n)^a \dots\dots\dots (2-15),$$

Según Hanson, $a = 2$ para canales de suelo, por lo tanto se tiene la misma Ecuación para superficies vegetadas y de suelo sin protección.

El coeficiente de Manning de la rugosidad del suelo, fue investigado bibliográficamente, encontrando un valor de **0.0156** para suelos arcillosos, según estudios realizados por Temple (1980) y Hanson (1989), en estudios de erosión en suelos cohesivos para aliviaderos y canales.

Para determinar el tirante d y la pendiente de energía S representativos para cada prueba, se usó el programa de cómputo HECRAS calculando tirantes y pendientes de energía dentro del área efectiva de mediciones de los taludes, dada la dificultad de medir en campo utilizando instrumentos.

Se utilizaron los datos recolectados de carga de agua aguas arriba de los taludes para añadir a los datos de entrada al programa HECRAS. Ver Anexo D.

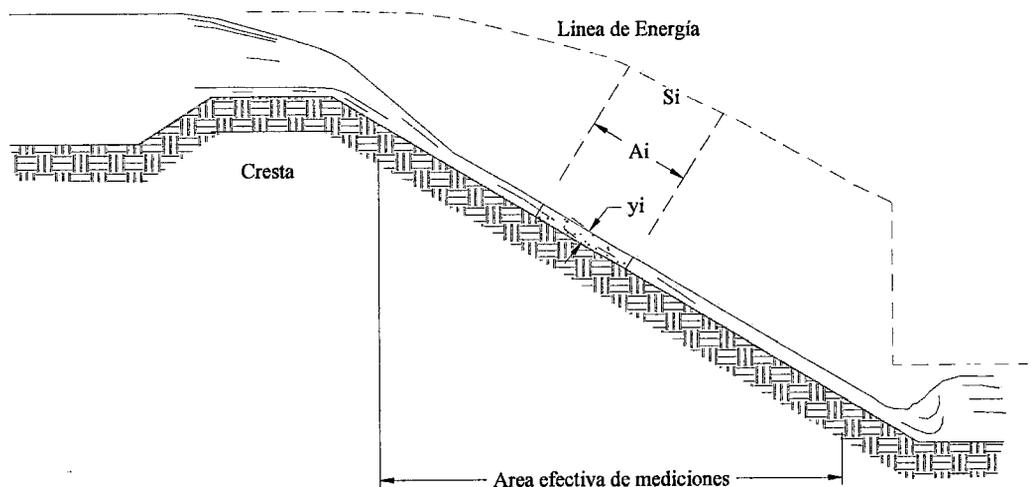


FIGURA 3-2.- Bosquejo de la Línea hidráulica y de energía en la estructura.

Estructura hidráulica de medición y Fase de Pruebas

En este capítulo se describe todo el trabajo realizado en campo, es decir, la aplicación práctica de esta tesis de investigación, que en resumen comprende la Fase de construcción de la estructura, Fase de mantenimiento y limpieza, Fase de instalación de coberturas vegetales y geosintéticos y la Fase de pruebas, también se mencionan los equipos y materiales utilizados. Esta Fase fue desarrollada en el Laboratorio Nacional de Hidráulica del 12 de Octubre de 2004 hasta el 15 de Marzo del 2005.

4.1 Construcción de la estructura

4.1.1 Planeamiento y diseño

Para la construcción del modelo se ha seleccionado un área a cielo abierto, dentro de la zona de experimentación que posee el Laboratorio Nacional de Hidráulica, ocupando una extensión aproximada de 50 m².

Se aprovecho la geometría del modelo físico construido por la Ing. Elsa Minaya Espinoza, en su tesis de maestría titulada "Erosión en lecho no cohesivo debido al impacto de un chorro de agua a la salida de un vertedero con salto de ski", como se observa en la Foto 4-1.

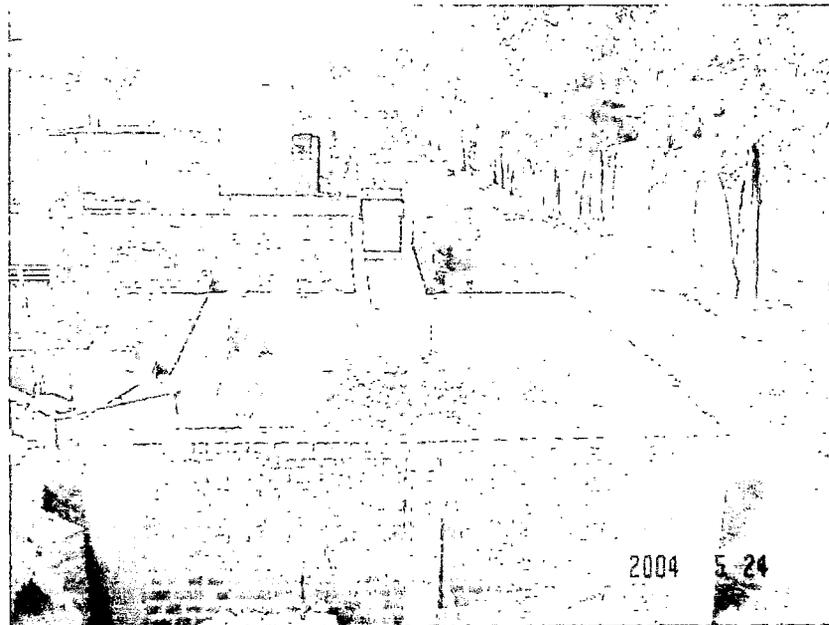


FOTO 4-1. Vista del modelo antes de la construcción.

En relación con los límites del estudio en modelo (ver Figura 4-1 y Anexo A), se pretende considerar lo siguiente:

- Vertedero triangular de caja metálica, ya construido; aquí fue necesario hacer trabajos de mantenimiento, como impermeabilización y pintado con pintura especial.
- Poza disipadora, esta ubicado a la salida del vertedero en salto de ski. Esta construido por materiales nobles, mortero de cemento y arena, ladrillos.

Existen dos compuertas de fibra de vidrio que facilitan el ingreso de agua al sistema.

- c) Taludes de prueba, de 1.91 y 1.93 m de ancho en el talud derecho e izquierdo respectivamente (vista aguas arriba, ver Figura 4-1.). En el perímetro de los taludes existen muros de cabeza pulidos. Los taludes están rellenos de material común, excepto la capa superficial de 50 cm de profundidad, que es de suelo de cultivo, óptima para el crecimiento de la vegetación. Se usó el pasto Tanzania (*Panicum Maximun*) adaptable para zonas de clima medio y cálido, puede crecer de 0 a 2000 msnm y es usado generalmente para forraje de ganado.
- d) Poza de sedimentos y Canal de retorno, sus paredes son de ladrillo de soga y tarrajeados con mortero de arena fina. A lo largo del canal de retorno hay un desarenador y retenedores de sedimentos.
- e) Poza de alimentación de agua, se aprovechó las dimensiones de un canal existente, se empleó cemento para su impermeabilización y ladrillos para su cierre.

Los trabajos de construcción se dividieron en:

- Fase de obras de albañilería
- Fase de reparaciones de la estructura antigua
- Fase de movimiento de suelos
- Fase de siembra y mantenimiento de la vegetación

4.1.2 Representación del prototipo

La representación de las dimensiones de la estructura, no obedece a algún trabajo pasado o al modelamiento de determinada cuenca. Como se explicó en el Capítulo I, el objetivo es evaluar coberturas vegetales y observar su comportamiento frente a flujos de escorrentía producto de las lluvias y determinar las bondades de un suelo vegetado frente a un suelo sin protección.

Es decir se analizará el comportamiento del suelo y del suelo vegetado frente a caudales pequeños y de corta duración.

Los caudales simulados fueron elegidos de acuerdo a los resultados obtenidos en la Fase de calibración y de acuerdo a la bibliografía revisada.

La pendiente aproximada de 1 : 2 (V : H), fue elegida de acuerdo a la bibliografía revisada, en muchos casos recomendaban proteger los suelos con pastos hasta taludes críticos de 1 : 2.

Al ser esta investigación la primera en su género (dentro de las investigaciones de la UNI-FIC), se tomaron estos datos con el criterio adoptado luego de charlas con profesionales y revisión de literatura.

Luego de esta primera investigación, se seguirán realizando pruebas a cargo de otros tesisistas quienes ya están planeando los trabajos en campo, éstos se encargarán de completar los vacíos y de ampliar los resultados de esta investigación.

4.1.3 Instalaciones auxiliares

La estructura fue abastecida de agua inicialmente por una bomba sumergible que se alimentaba de una poza de dimensiones 23 m x 1.1 m x 0.6 m, dado que la Fase de pruebas coincidió con los trabajos realizados en el modelo de Yuncán, donde necesitaban el agua limpia para las pruebas.

Para caudales mayores, la estructura fue abastecida desde la cisterna del Laboratorio por medio de cuatro bombas centrífugas que impulsan hasta 500 l/s. La tubería de alimentación a la estructura inicia en una válvula de compuerta de 14", ubicada en una tubería de 14" de diámetro a la salida del reservorio elevado de concreto armado de 27 m³ de capacidad y cuyo espejo o superficie libre se mantiene constante a 5,80 m.

La tubería de alimentación es de acero de 14" de diámetro interior en una longitud de 30 m, de ella nace la tubería de 8", la cual termina alimentando a un tanque metálico de aforos.

La regulación del caudal en el tanque de aforos se realiza mediante una válvula de compuerta de 8" que controla la alimentación de la estructura que actúa como válvula general de corte.

En el tanque metálico se ha instalado un vertedero rectangular de bronce para medir caudales, el cual está provisto de un limnómetro de gancho tipo Neypric para la lectura de cargas, que permite medir niveles con 0,1 mm de precisión.

Con el objeto de afinar el control de los caudales en la tubería de acceso se instaló una tubería by-pass de 4" provista de una válvula de compuerta, a esta válvula se le giró de manera que desfogara el agua fuera de la poza dispasadora.

Se construyó una poza de decantación con la finalidad de retener los sedimentos más pesados. Las aguas vuelven a la cisterna por un canal de retorno construido de concreto, de sección rectangular; al cual se construyó un desarenador y se le colocaron geotextiles para retener los sedimentos. Ver Anexo E.

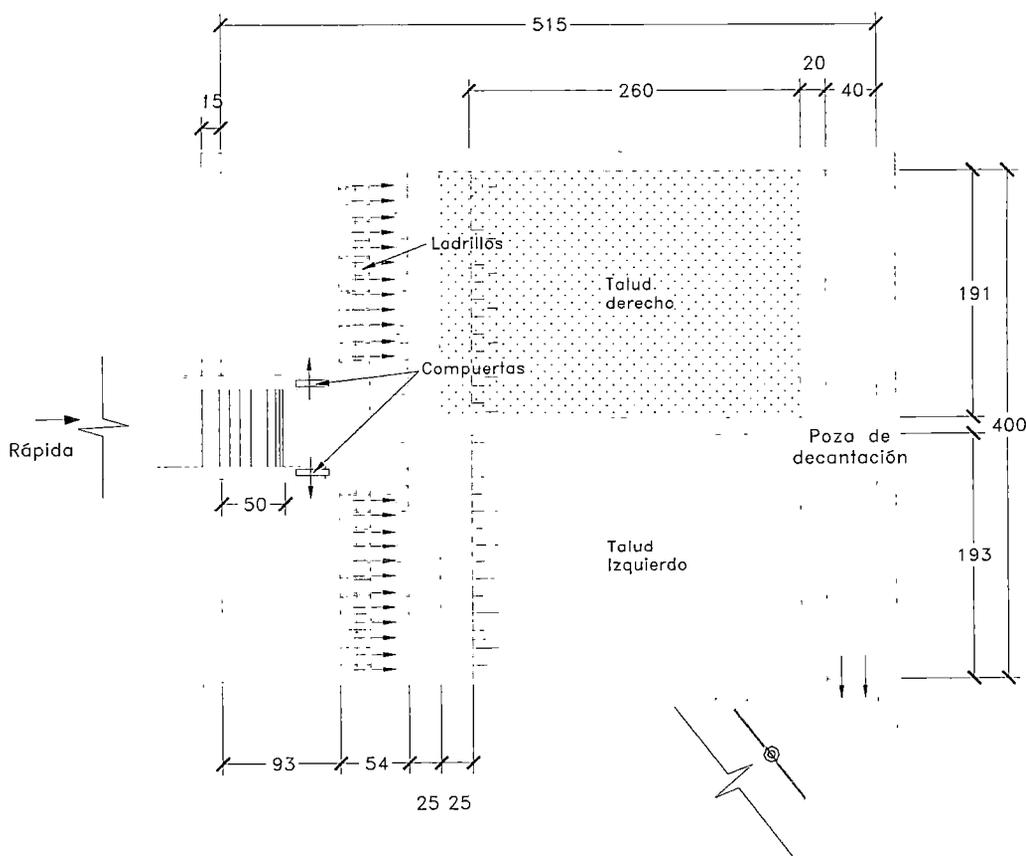


FIGURA 4-1. Bosquejo del área de mediciones de la estructura.

4.1.4 Detalles del proceso constructivo

Los trabajos empezaron con el retiro del material en la poza y la demolición de muros, tal como se muestra en la Foto 4-2.



FOTO 4-2. Durante la Fase de movimiento de suelos y demolición



FOTO 4-3. Pulido del muro central y construcción de la poza de decantación.

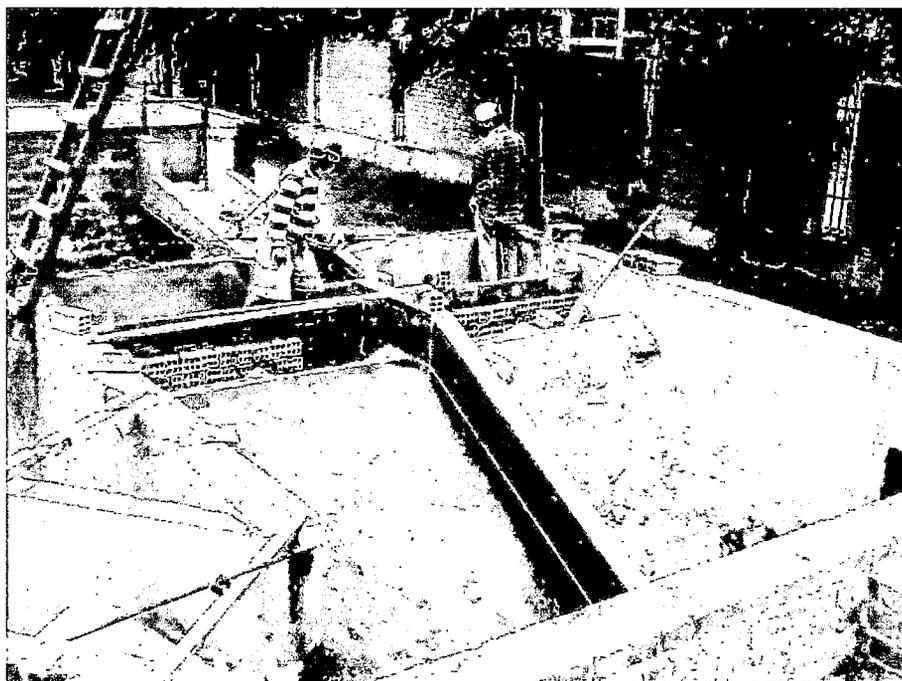


FOTO 4-4. Construcción de la Poza disipadora aguas debajo de los vertederos de los taludes.

Para el control altimétrico se estableció un BM en la proximidades de la estructura, con cota 70, 00 cm. El control vertical se realizó empleando un nivel y una mira metálica con graduación al milímetro.

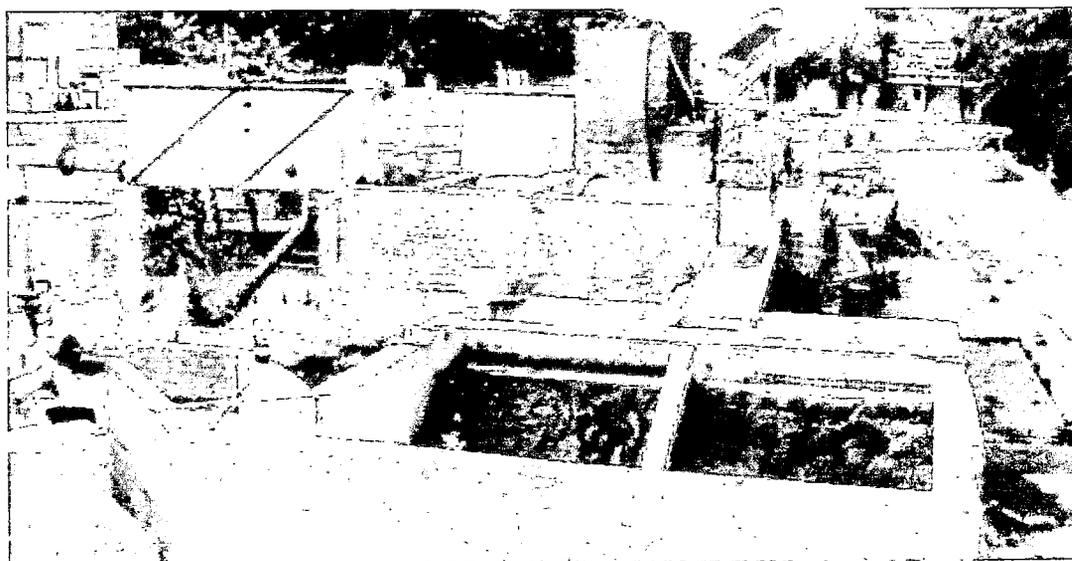


FOTO 4-5. Vista de la estructura completamente terminada, talud izquierdo con suelo sin protección y el derecho con pasto muy joven reforzado con geoceldas.

4.2 Equipo para la adquisición de datos y desarrollo de las pruebas

4.2.1 Ingreso y medición de caudales

El vertedero que se ha considerado para la medición de las descargas es un vertedero tipo pared delgada, en forma de V con ángulo de 27° para caudales menores a 10 l/s, y luego de 90° para caudales mayores. Los niveles de la carga "h" son medidos en el limnómetro, el cual va colocado a un lado del tanque del vertedero. Dicho instrumento previamente ha sido nivelado respecto al vértice del triángulo, es decir en el limnómetro se colocó el cero respectivo. Los caudales e el vertedero están regidos por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2gC_D} h^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots(4-1)$$

Donde:

Q : Descarga (m³/s)

C_D : Coeficiente de descarga (adimensional)

h : Carga de agua respecto al vértice del vertedero triangular (m)

g : Aceleración debido a la gravedad (m/s²)

De acuerdo a las descargas se determinaron las cargas "h" necesarias, de las tablas de vertederos de NEYRPIC¹, como se muestra en el Cuadro 4-1.

¹ (1957) Constructions mecaniques et hydrauliques. NEYRPIC. Grenoble - Lyon. France.

CUADRO 4-1. Caudales utilizados en las pruebas.

Caudal (m ³ /s)	Caudal (l/s)	Ángulo de Vertedero °	Lectura en el limnómetro mm
0.001	1	27	97
0.002	2	27	128,5
0.003	3	27	151
0.004	4	27	169,4
0.006	6	27	199,1
0.01	10	90	138,3
0.015	15	90	163,1
0.03	30	90	215,4
0.05	50	90	263,8

4.2.3 Mediciones de pérdida de suelos

Se utilizó el equipo topográfico convencional, nivel de Ingeniero y mira, para tomar datos topográficos en los taludes antes y después de la pruebas, siguiendo el procedimiento seguido por Hanson (1990) en sus investigaciones de pérdida de suelos en canales de suelo.²

Los puntos de control topográfico se señalaron con letras en las paredes, separados cada 0.15 m y tomados en la zona válida para efectuar medidas, determinada en la Fase de calibración.

Asimismo, se colocó una regla de madera con marco metálico, sobre el cual caminará el portador de mira durante las mediciones; esta regla también fue dividida cada 0.15 m.

² Ver referencia 10.

4.3 Procedimiento general para la ejecución de las pruebas

4.3.1 Materiales usados en los taludes

Las pruebas fueron divididas en cuatro Fases, que corresponden a la variable técnica de bioingeniería o biotécnica; como se describe a continuación:

FASE I: Fase de pruebas con suelo sin protección

Se utilizó suelo limo arcilloso (Ver Anexo C)

FASE II: Fase de pruebas con Tanzania

Se utilizó el mismo suelo protegido con pasto Tanzania (*Panicum Maximum*),

FASE III: Fase de pruebas con Tanzania y Geoweb®

Se utilizó el mismo suelo protegido con pasto Tanzania (*Panicum Maximum*) y reforzado con el sistema de confinamiento celular Geoweb® de Presto

FASE IV: Fase de pruebas con Tanzania y MacMat™

Se utilizó el mismo suelo protegido con pasto Tanzania (*Panicum Maximum*) y reforzado con geomantas MacMat™ de Maccaferri.

4.3.2 Matriz de pruebas

Para el desarrollo de los ensayos de investigación se han adoptado como variables el caudal (Q) y la técnica de bioingeniería o biotécnica.

En base a estas consideraciones generales se ha planteado la matriz de pruebas, considerando cuatro Fases; cada Fase corresponde a un tipo de cobertura, en la cual se altera el caudal y así sucesivamente obteniendo un total de 22 pruebas, como se muestra en el Cuadro 4-2, de la matriz de pruebas.

En las pruebas se verificó que el talud a probar esté saturado superficialmente, luego se realizaron las siguientes mediciones:

- Caudal de ingreso Q, controlado por un vertedero triangular.

- Tiempo de escurrimiento t , correspondiente a 10 min.
- Carga de agua aguas arriba del talud (H); como se muestra en la Figura 4-3.
- Parámetros de erosión en los taludes, que son la profundidad de erosión sobre un conjunto de puntos en la superficie erosionada, para esto se hizo topografía en los taludes antes y después de cada prueba. ($E_i - E_{i-1}$ ó ΔZ)

CUADRO 4-2. Matriz de Pruebas

Fase	Prueba	Caudal unitario (l/s)/m	Cobertura
I	1-1	0.51	Sin protección
	1-2	1.04	Sin protección
	1-3	1.55	Sin protección
	1-4	3.11	Sin protección
II	2-1	1.04	Tanzania
	2-2	2.09	Tanzania
	2-3	3.18	Tanzania
	2-4	6.01	Tanzania
	2-5	8.37	Tanzania
	2-6	20.64	Tanzania
III	3-1	1.30	Tanzania con Geoweb®
	3-2	2.07	Tanzania con Geoweb®
	3-3	3.06	Tanzania con Geoweb®
	3-4	7.87	Tanzania con Geoweb®
	3-5	16.25	Tanzania con Geoweb®
	3-6	27.38	Tanzania con Geoweb®
IV	4-1	1.24	Tanzania con MacMat™
	4-2	2.06	Tanzania con MacMat™
	4-3	3.11	Tanzania con MacMat™
	4-4	7.77	Tanzania con MacMat™
	4-5	15.54	Tanzania con MacMat™
	4-6	25.91	Tanzania con MacMat™

4.3.3 Fase de Calibración

Se realizó con un caudal de 6 l/s, que es la máxima capacidad de la bomba sumergible, con las pruebas de calibración se consiguió lo siguiente:

- El plan de trabajo a seguir durante las pruebas, las personas necesarias, la función y la forma de trabajar de cada uno. Se necesitaba como mínimo dos personas, primero se regulaba el caudal, una persona estaba en el nivel mientras controlaba el tiempo y la otra con la mira.
- Los problemas que pudiesen ocurrir durante las pruebas. Se decidió romper un desarenador dado que para caudales mayores de 5 l/s, el nivel de agua en la poza de decantación aumentaba tanto que llegaba a la falda del talud. También se decidió usar geotextiles para retener los sedimentos, estos se colocaron en el canal de retorno y en el canal que comunica al canal principal de retorno a la zona de didáctica del laboratorio.

Para la Fase I, se optó por usar geotextiles en la zona de transición concreto-suelo, pues se verificó que en la junta se producía bastante pérdida de suelo.

- Tiempo de duración de la prueba. Se estableció un tiempo de 10 min, pues para un tiempo de 6 min y caudal de 6l/s, el talud estaba bastante erosionado, con tiempos mayores, posiblemente las pruebas no sean significativas dado que se reduce las dimensiones del área efectiva de mediciones, el problema se origina por la existencia de un muro de confinamiento en el pie del talud, que por otro lado, es necesario.
- Área de toma de datos, se eligió un área central del talud, pues los bordes y el tramo aguas arriba no es representativo dada la existencia de las paredes que generan interfases de rozamiento (concreto-suelo), produciéndose efectos diferentes a los planteados en la hipótesis. Se obviaron los 15 cm de los extremos cada lado del talud y los primeros 40 cm desde aguas arriba. Ver Figura 4-4.

4.3.4 Descripción general de la ejecución de las pruebas

El proceso de ejecución para las pruebas de la Fase I difiere pequeños detalles de las pruebas de las Fases II, III y IV.

A continuación se detalla el procedimiento:

- Condiciones iniciales. Los taludes de la Fase I eran preparados por capas de 15 cm y compactados con cuatro golpes de un ladrillo kk, realizados por la misma persona en todas las pruebas. Los taludes estaban húmedos superficialmente saturados, para esto se regaba por buen tiempo.
- Para las Fases II, III y IV, simplemente se regó las superficies vegetadas cuando ya estaban listas para ser ensayadas.
- Se hacían trabajos de topografía en cada talud antes de cada prueba, se usó una cuadrícula de 15 x 15 cm; se tomo como BM un punto fijo dentro de la estructura con cota 100.00 m. Ver Figura 4-2.

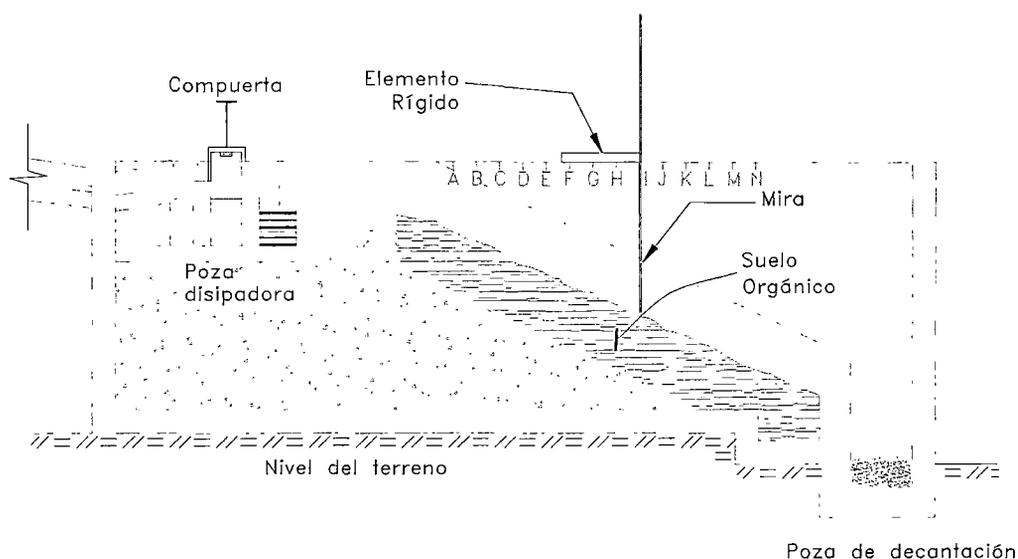


FIGURA 4-2. Vista en corte de la estructura durante las mediciones topográficas luego de las pruebas en el punto I, se observa el bosquejo con superficie erosionada.

- Para la Fase I se colocaba un geotextil de 1 mm a lo largo de la transición de concreto-suelo, para reducir la erosión en esta zona, este procedimiento no fue necesario en las demás Fases.
- Se abría la compuerta correspondiente al talud a ensayar y se cerraba la otra.

- Se colocaba el nivel de ingeniero en posición para efectuar las mediciones.
- Para el establecimiento de la vegetación, se usó fertilizante para suelo Superfosfato triple N-P-K y para la germinación de la semilla se usó musgo PROMIX PGX®, aproximadamente el pasto estuvo listo luego de 45 días de sembrado, para una altura aproximada de 20 cm.
- Para las Fases II, III y IV se determinaron la altura del pasto para cada prueba y el número de tallos por unidad de área, teniendo en cuenta que esta densidad no varía hasta que el pasto madure (3 meses), se cuantificó la densidad dos veces por fase, resultando casi lo mismo.
- Una vez realizados los enunciados anteriores, se daba inicio a la prueba, el caudal se controlaba directamente con la válvula de compuerta de 8", hasta que el caudal se mantenga constante, luego se esperaba que se llenara la poza y se controlaba el tiempo a partir del momento que el agua llenaba la poza de decantación.
- Durante la prueba se medían las cargas de agua "H", como se detalla en la Figura 4-3, estos valores se utilizaron en las entradas del HECRAS para ver la confiabilidad de los datos.

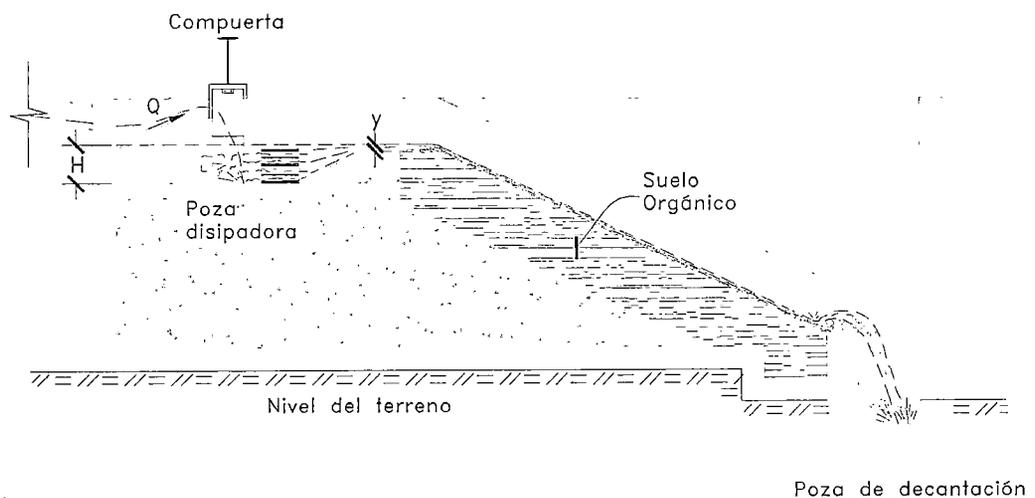


FIGURA 4-3. Vista en corte del modelo durante las pruebas

- Al acabar los 10 min de las pruebas, se apagaba la bomba y se esperaba que deje de escurrir completamente el agua; para empezar la topografía.

- En la Fase I, dada la formación de surcos, fue necesario realizar una topografía a detalle, que abarcara las formas de erosión, en muchos casos se tomó más de 35 puntos por sección longitudinal (A, B, C, etc).
Para las demás Fases no fue necesaria una topografía muy detallada, pues el agua escurría de manera más uniforme dada la presencia de pasto, se usó con la cuadrícula de 15 x 15cm.

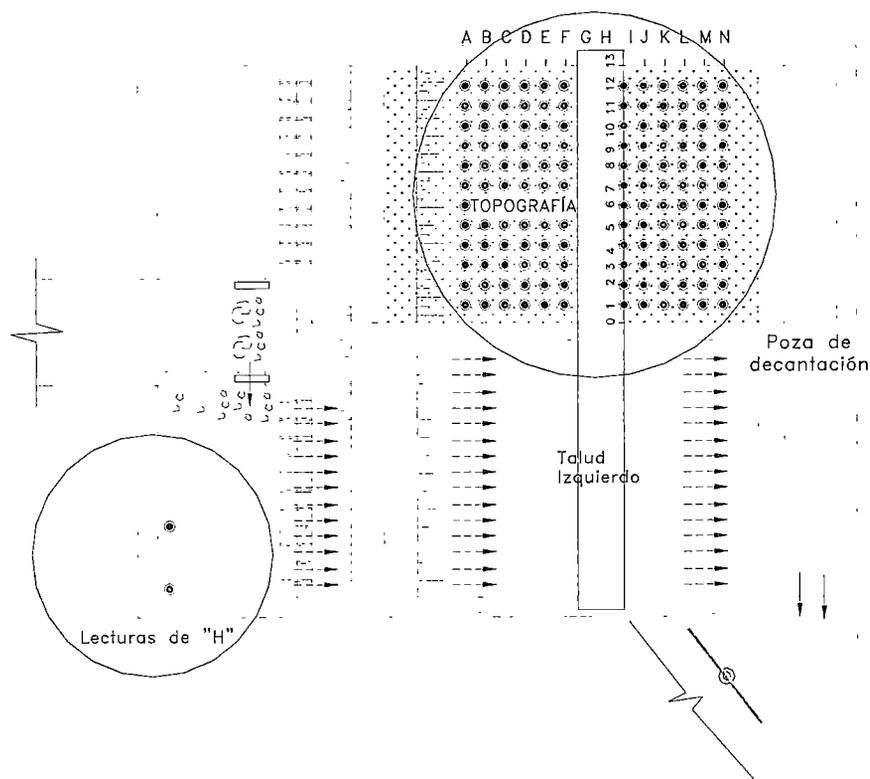


FIGURA 4-4. Los puntos guinda indican los puntos de control, tanto topográfico como de medición de cargas de agua (H).



FOTO 4-6. Compactación antes de las pruebas de la Fase I.

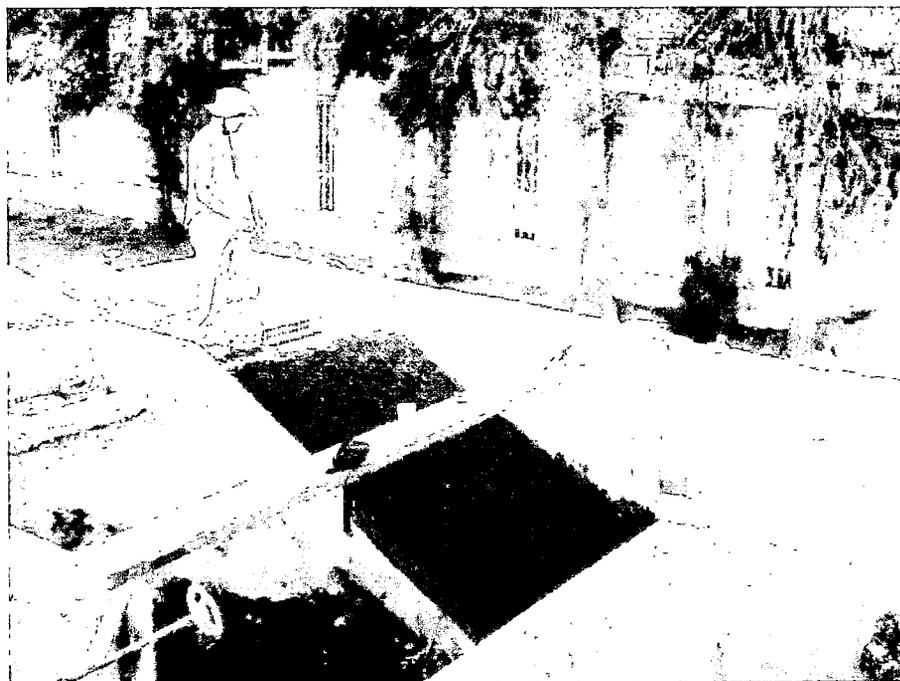


FOTO 4-7. Riego para el establecimiento de la vegetación para pruebas de la Fase III.

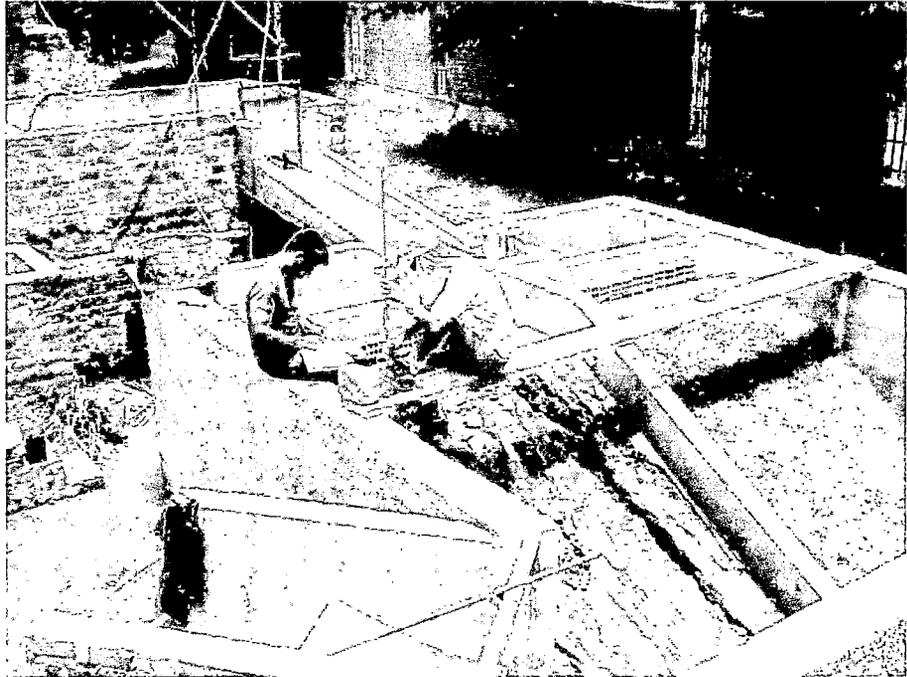


FOTO 4-8. Durante la toma de datos topográficos luego de la prueba 2 de la Fase I; $Q = 2 \text{ l/s}$, una persona sostiene la mira y la otra apunta las lecturas y mide las distancias horizontales.



FOTO 4-9. Vista donde se aprecia la mejor ubicación del nivel.



FOTO 4-10. Vista durante la prueba 16 de la Fase III, se observa claramente que el pasto se ha inclinado totalmente. (Talud derecho)

Datos recolectados y proceso de datos

En este capítulo se muestran las mediciones realizadas en campo, luego de un primer proceso de datos, para la recolección de datos se siguió el procedimiento descrito en el Capítulo 4.

Más adelante se muestran los resultados luego de procesar los datos según el ítem 3.2 Desarrollo técnico; se hace un análisis de los resultados haciendo una comparación entre las diferentes Fases y analizando independientemente cada Fase.

5.1 Generalidades

El presente estudio de investigación se desarrollo entre los meses de Octubre de 2004 y Marzo de 2005 utilizando un modelo ffsico construido en el área cedida por el Laboratorio Nacional de Hidráulica. La etapa de campo consistió en desarrollar 22 pruebas de acuerdo a las condiciones mencionadas en el capítulo 4 y en el Cuadro 4-3, siguiendo el procedimiento descrito en el subcapítulo 4.3.

5.2 Datos Recolectados

5.2.1 Duración de las pruebas

Como se determinó en la Fase de calibración; se decidió usar un tiempo de duración de las pruebas de 10 min, por las razones indicadas en el ítem 4.3.3.

En los gráficos 5-1, 5-2, 5-3 y 5-4, se muestra la realización de las pruebas respecto al tiempo.

5.2.1 Mediciones Hidráulicas

Los caudales fueron medidos en el limnómetro del vertedero, y regulados con la válvula de 3" del vertedero como se detalla en el ítem 4.3.4.

También se tomaron datos de cargas de agua aguas arriba del talud, (donde la velocidad del agua es cero con el uso de equipo topográfico) como se explicó en el ítem 4.3.4. En el Cuadro 5.1 se muestran las lecturas de campo.

El Objetivo de medir las cargas de agua es definir una condición de borde en el programa de cómputo HECRAS.

Los datos necesarios de las salidas del HECRAS son los productos entre el tirante de agua (y) y la pendiente de energía (S), (ver Anexo D), para esto se estableció un promedio entre las secciones representativas.

Es necesario aclarar que los datos no eran confiables para caudales menores a 6 l/s, es decir que el programa no da buenos resultados para estos valores de

entrada; pero se determinó que mientras el caudal disminuye, el producto (γS , tirante por pendiente de energía) de las salidas del HECRAS se hace similar con los resultados de la Ecuación de Manning; para caudales mayores a 6 l/s, los resultados del HECRAS y de la Ecuación de Manning son muy cercanos. Es por esto que para los datos en los cuales no se pudo ejecutar el programa, se establecieron los resultados de la Ecuación de Manning; en la Figura 5-2 se muestran los resultados del HECRAS.

CUADRO 5-1. Lecturas de carga de agua (H) medidas durante las pruebas, los valores mostrados son un promedio de los datos mostrados en el Anexo B

Prueba	Caudal l/s	Ángulo de vertedero °	Lectura del limnómetro mm	H _{PROM} cm
1-1	1.00	27	97.5	--
1-2	2.00	27	128.5	--
1-3	3.00	27	151	1.4
1-4	6.00	27	199	2.0
2-1	2.00	27	128.5	--
2-2	4.00	27	170	2.2
2-3	6.10	27	201.2	3.0
2-4	11.60	27	259.4	5.3
2-5	16.20	27	296	6.3
2-6	39.80	90	241.5	8.5
3-1	2.50	27	139.9	1.6
3-2	4.00	27	168.5	2.4
3-3	5.80	27	197	3.1
3-4	15.00	27	287.5	6.0
3-5	31.00	90	216	7.8
3-6	52.20	90	268.3	11.4
4-1	2.40	27	128.5	--
4-2	4.00	27	170	2.2
4-3	6.00	27	199	2.9
4-4	15.00	90	163.5	5.6
4-5	30.00	90	215.5	7.2
4-6	50.00	90	263.8	10.1

Donde:

H_{PROM} : Lectura de las cargas de agua.

CUADRO 5-2. Datos hidráulicos necesarios para la estimación de la profundidad de erosión

Prueba	Caudal unitario m^2/s	Tirante calculado con la Ec. De Manning y_n m	Pendiente medida en campo S_n m/m	Resultados del HECRAS $(y.S)_{PROM}$ m	Resultados de la Ecuación de Manning $y_n S_n$ m
1-1	0.0005	0.0023	0.52	--	0.0012
1-2	0.0010	0.0035	0.52	--	0.0018
1-3	0.0016	0.0044	0.53	0.0025	0.0023
1-4	0.0031	0.0067	0.52	0.0040	0.0035
2-1	0.0010	0.0084	0.51	--	0.0043
2-2	0.0021	0.0129	0.51	--	0.0066
2-3	0.0032	0.0166	0.51	0.0093	0.0084
2-4	0.0060	0.0245	0.51	0.0139	0.0125
2-5	0.0084	0.0299	0.51	0.0191	0.0153
2-6	0.0206	0.0475	0.51	0.0246	0.0243
3-1	0.0013	0.0100	0.52	--	0.0053
3-2	0.0021	0.0133	0.53	--	0.0070
3-3	0.0031	0.0170	0.52	0.0108	0.0089
3-4	0.0079	0.0298	0.53	0.0157	0.0158
3-5	0.0162	0.0464	0.53	0.0250	0.0244
3-6	0.0274	0.0564	0.52	0.0290	0.0294
4-1	0.0012	0.0095	0.53	--	0.0050
4-2	0.0021	0.0130	0.52	--	0.0068
4-3	0.0031	0.0166	0.52	0.0094	0.0087
4-4	0.0078	0.0289	0.52	0.0156	0.0151
4-5	0.0155	0.0441	0.52	0.0283	0.0231
4-6	0.0259	0.0511	0.52	0.0305	0.0268

Donde:

Donde el caudal unitario resulta de dividir el caudal mostrado en el Cuadro 5-1 entre el ancho del talud siendo:

L_1 : 1.93 m. Ancho del talud izquierdo donde se ensayaron las Fases I, II y IV

L_2 : 1.905 m. Ancho del talud derecho donde se ensayó la Fase III.

5.2.2 Mediciones Topográficas

Como se explicó en el ítem 4.3.4, por cada prueba realizada se ejecutaron levantamientos topográficos antes y después de cada prueba.

El objetivo fue determinar las profundidades de erosión para luego ser comparadas con los resultados de las ecuaciones desarrolladas en 3-2.

Para determinar la profundidad de erosión representativa de cada área efectiva por prueba, fue necesario determinar las cotas en cada punto medido antes y después de cada prueba, y luego se calculó la pérdida de suelo luego de cada prueba, y de estos resultados se estableció un promedio.

Los resultados se muestran en el Cuadro 5-3.

CUADRO 5-3. Profundidades de erosión para cada prueba.

Prueba	Cobertura	Caudal unitario (l/s)/m	Prof. de erosión m
1-1	Sin protección	0.51	0.032
1-2	Sin protección	1.04	0.049
1-3	Sin protección	1.55	0.080
1-4	Sin protección	3.11	0.158
2-1	Tanzania	1.04	0.000
2-2	Tanzania	2.09	0.001
2-3	Tanzania	3.18	0.003
2-4	Tanzania	6.01	0.003
2-5	Tanzania	8.37	0.004
2-6	Tanzania	20.64	0.007
3-1	Tanzania con Geoweb®	1.30	0.000
3-2	Tanzania con Geoweb®	2.07	0.001
3-3	Tanzania con Geoweb®	3.06	0.001
3-4	Tanzania con Geoweb®	7.87	0.001
3-5	Tanzania con Geoweb®	16.25	0.002
3-6	Tanzania con Geoweb®	27.38	0.004
4-1	Tanzania con MacMat™	1.24	0.000
4-2	Tanzania con MacMat™	2.06	0.001
4-3	Tanzania con MacMat™	3.11	0.002
4-4	Tanzania con MacMat™	7.77	0.002
4-5	Tanzania con MacMat™	15.54	0.002
4-6	Tanzania con MacMat™	25.91	0.005

5.2.3 Características geométricas del pasto

Como se describió en el ítem 4.3.4, para determinar el coeficiente de Manning en superficies vegetadas, es necesario determinar el parámetro Cl. (Coeficiente de retardo).

Para esto se tomaron medidas de altura de pasto "h" y densidad de tallos por unidad de área "M", como se muestra en el Cuadro 5-4.

CUADRO 5-4. Datos del Pasto

Prueba	Cobertura	Fecha de siembra dd/mm/aa	Fecha de prueba dd/mm/aa	Edad del pasto días	Densidad (M) tallos/m ²	Altura del pasto (h) m
1-1	Sin protección	--	10/01/05	--	--	--
1-2	Sin protección	--	07/12/04	--	--	--
1-3	Sin protección	--	12/01/05	--	--	--
1-4	Sin protección	--	25/11/04	--	--	--
2-1	Tanzania	17/12/04	25/01/05	39	2814	0.19
2-2	Tanzania	17/12/04	27/01/05	41	2814	0.19
2-3	Tanzania	17/12/04	27/01/05	41	2814	0.19
2-4	Tanzania	17/12/04	01/02/05	45	2814	0.20
2-5	Tanzania	17/12/04	01/02/05	45	2814	0.20
2-6	Tanzania	17/12/04	02/02/05	46	2814	0.21
3-1	Tanzania con Geoweb®	21/12/04	27/01/05	37	4105	0.20
3-2	Tanzania con Geoweb®	21/12/04	28/01/05	38	4105	0.21
3-3	Tanzania con Geoweb®	21/12/04	28/01/05	38	4105	0.22
3-4	Tanzania con Geoweb®	21/12/04	03/02/05	44	3997	0.22
3-5	Tanzania con Geoweb®	21/12/04	04/02/05	45	3997	0.23
3-6	Tanzania con Geoweb®	21/12/04	04/02/05	45	3997	0.23
4-1	Tanzania con MacMat™	30/12/04	14/02/05	46	2921	0.20
4-2	Tanzania con MacMat™	30/12/04	14/02/05	46	2921	0.21
4-3	Tanzania con MacMat™	30/12/04	16/02/05	48	2921	0.21
4-4	Tanzania con MacMat™	30/12/04	17/02/05	49	2983	0.21
4-5	Tanzania con MacMat™	30/12/04	18/02/05	50	2983	0.22
4-6	Tanzania con MacMat™	30/12/04	18/02/05	50	2983	0.22

5.2.4 Propiedades físicas del suelo

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar los beneficios de la bioingeniería como herramienta en control de erosión, para esto se utilizó un tipo de suelo al que se le sometieron a pruebas en condiciones de suelo vegetado y no vegetado. Para determinar los parámetros que indicarán matemáticamente los resultados de la investigación, es necesario determinar la granulometría del material utilizado.

El parámetro asociado a la granulometría del suelo se le conoce como erodibilidad, explicado en el ítem 2.2.2.1.

En el Anexo C se muestran los resultados de los análisis de mecánica de suelos realizados por el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Las propiedades físicas del suelo se detallan en el Cuadro 5-5.

CUADRO 5-5. Propiedades físicas del suelo

Propiedades físicas	Valores
% Arena > 0.05 mm	37.3
% Limo > 0.002 mm	51.0
% Arcilla < 0.05 mm	11.7
Tipo de suelo	Limo arenoso

Este tipo de suelo reúne regulares características granulométricas para el establecimiento de la vegetación, pero no tiene nutrientes o contenido de materia orgánica. Por esta razón se usó fertilizantes como se mencionó en el capítulo 3.

5.2.5 Cálculo de coeficiente de Manning del suelo

De acuerdo a los resultados observados en la Fase de calibración y durante la Fase de pruebas; se analizó las formas de erosión geoméricamente y se siguió el método del Servicio de Conservación de Suelos para estimar el coeficiente de Manning, por ser el más completo según los datos de campo.



FOTO 5-1. Vista de las formas de erosión en el suelo utilizado.



FOTO 5-2. Vista durante una de las pruebas de calibración.

Las tablas del servicio de conservación de suelos que se usaron para el cálculo del coeficiente de Manning, se encuentran en el Anexo F.

En el Cuadro 5-6, se resume la metodología para la estimación de n .

CUADRO 5-6. Solución para la estimación del coeficiente de Manning global del suelo.

Paso	Comentario	Valor modificante
1	Valor básico estimado de n , tabla 1 de Anexo F	0.020
2	Descripción de la vegetación, nula, tabla 2 de Anexo F	0.000
3	Cambios significantes en el tamaño y forma del canal, ver tabla 3 de Anexo F.	0.005
4	Taludes erosionados, tabla 4 de Anexo F.	0.010
5	Presencia de apreciables obstrucciones tabla 5 de Anexo F.	0.020
6	Grado de tortuosidad casi nulo, tabla 6 de Anexo F.	0.000
Total estimado $n =$		0.055

En el Anexo F, se muestran otros procedimientos para determinar el coeficiente de Manning, extraídos de French (Ref. 6).

También se siguió la metodología propuesta por Cowan, (ver Anexo F):

$$n_0 = 0.02$$

$$n_1 = 0.01$$

$$n_2 = 0.01$$

$$n_3 = 0.02$$

$$n_4 = 0.00$$

$$m_5 = 1.00$$

$$n = (0.02+0.01+0.01+0.02).1.00$$

$$\mathbf{n = 0.06}$$

Ven Te Chow, recomienda un valor de **0.04**.

Finalmente se tomó un valor de **0.055**, correspondiente al método de Servicio de Conservación de Suelos, explicado anteriormente

5.3 Proceso de Datos y Discusión

En este subcapítulo se calcularán los parámetros explicados en el capítulo 3 y que serán el resumen del trabajo realizado en laboratorio.

También se compararán los resultados obtenidos de campo con las ecuaciones teóricas desarrolladas en el subcapítulo 3.2.

5.3.1 Relación entre el tiempo y la profundidad de erosión

Las Figuras 5-1, 5-2, 5-3 y 5-4, muestran los resultados obtenidos de campo, luego de procesar los datos recolectados y mostrados en los Anexos B y D.

Las Figuras 5-2, 5-3 y 5-4 muestran los resultados de profundidad de erosión acumulados, recordando que las pruebas se realizaron en forma consecutiva.

Como se puede apreciar en las Figuras, se han colocado las variables caudal unitario " q ", esfuerzo cortante total " τ_o ", esfuerzo efectivo " τ_e " y profundidad de erosión " $Z_o - Z_n$ "; en función del tiempo de las pruebas.

En la Fase I, se explicó que el proceso de pruebas era distinto al de las Fases II, III, IV; porque luego de cada prueba se reparó el talud para ejecutar la siguiente prueba, hasta obtener un total de cuatro pruebas con suelo sin protección; es por eso que en todas las gráficas de la Figura 5.1, las curvas están separadas cada 10 min de duración de la Fase de pruebas. En la última gráfica se muestran los valores de erosión obtenidos para cada término de prueba.

En las Fases II, III y IV; las pruebas se realizaron en forma consecutiva, puesto a que la erosión no se presentaba ni al 2% de la Fase I.

Los valores de profundidad de erosión son valores acumulados de cada prueba. Esta metodología fue adaptada de las investigaciones de Hanson (1990)¹.

¹ Hanson (1990), realizó ensayos en canales con cuatro tipos de suelo, determinando los coeficientes de erodibilidad para cada uno, la Fase de pruebas que Hanson siguió fue adaptada en esta investigación.

PRUEBAS FASE I

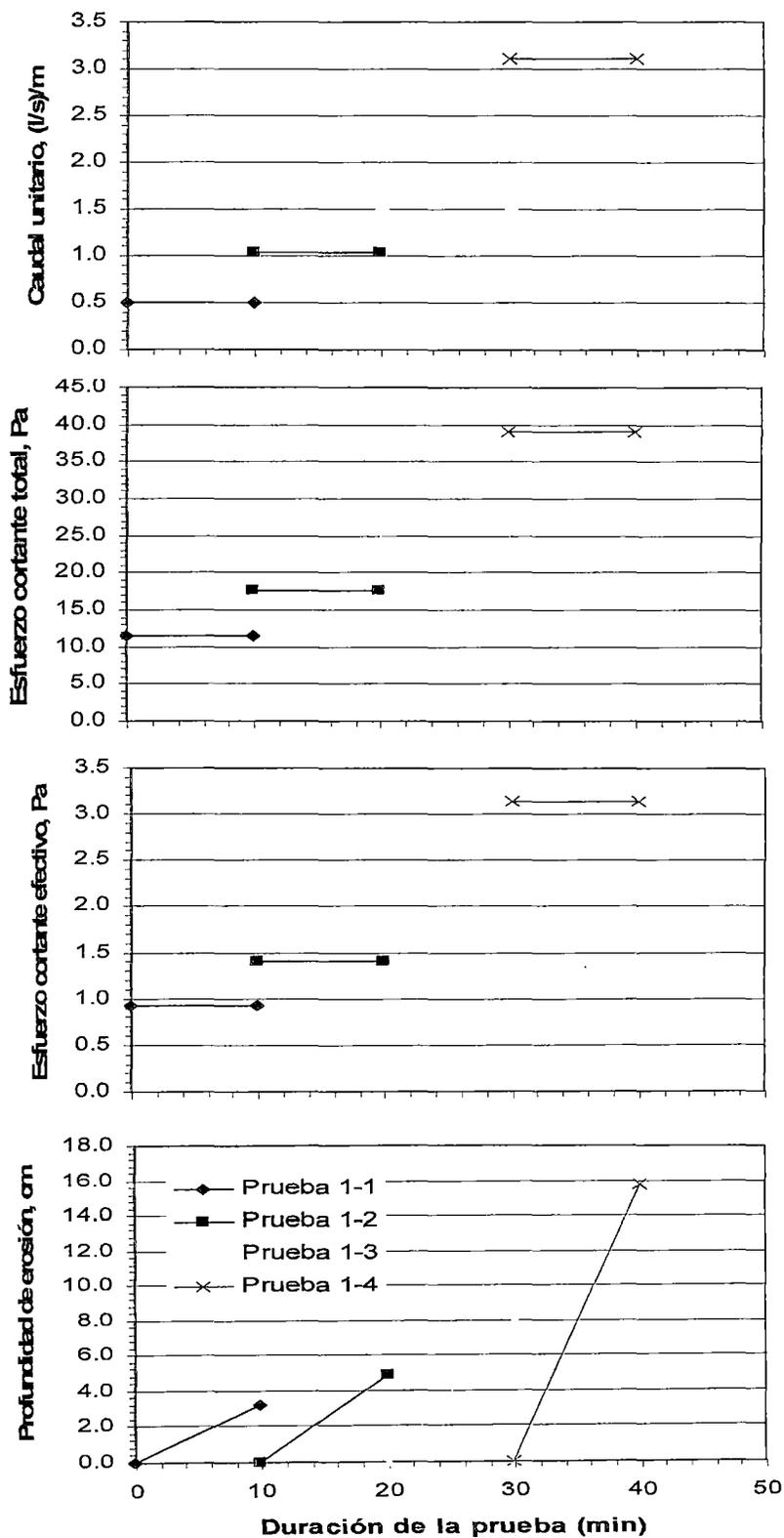


FIGURA 5-1. Proceso de datos de campo, FASE I.

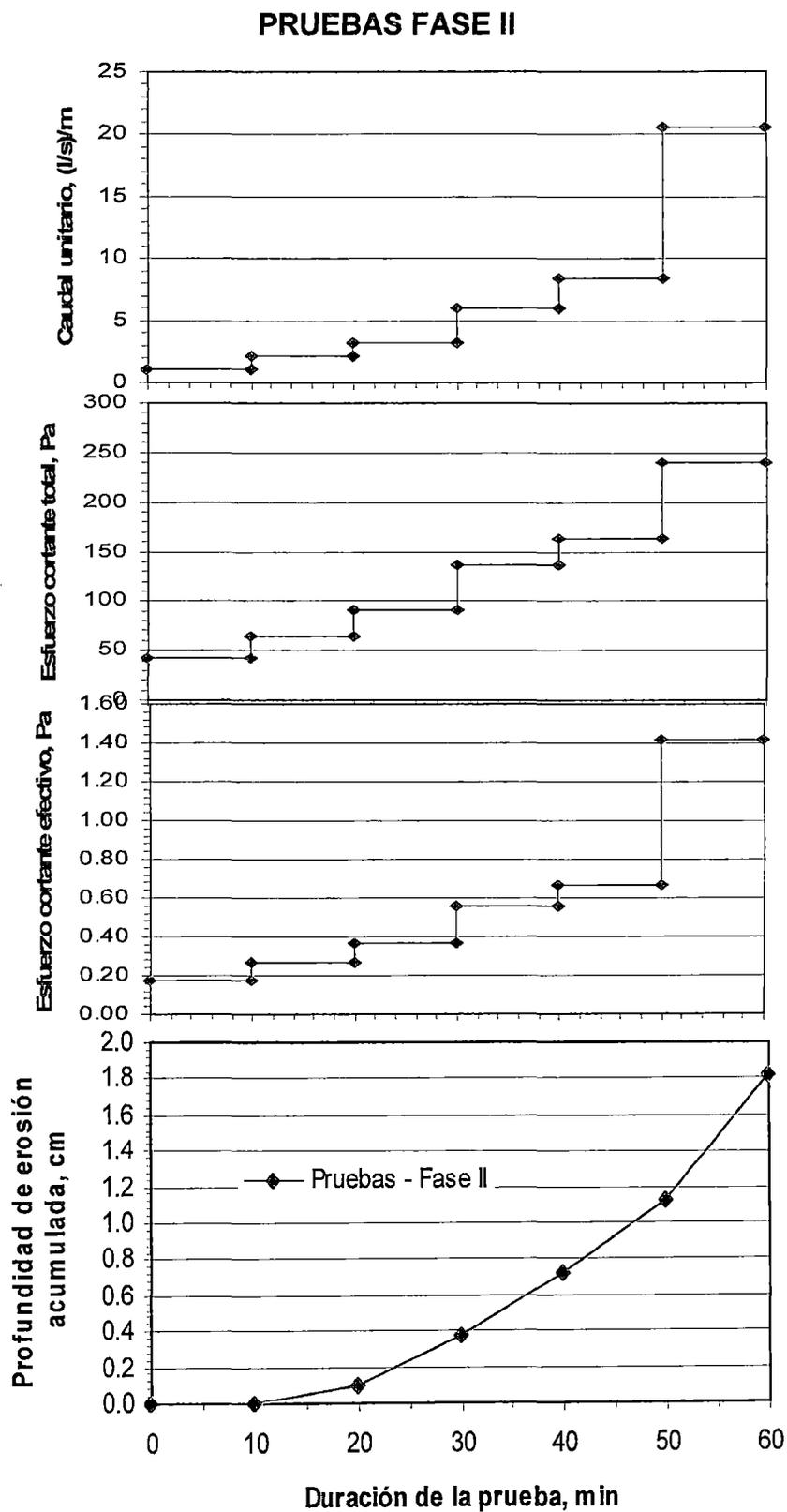


FIGURA 5-2. Proceso de datos de campo, FASE II. (Acumulados)

PRUEBAS FASE III

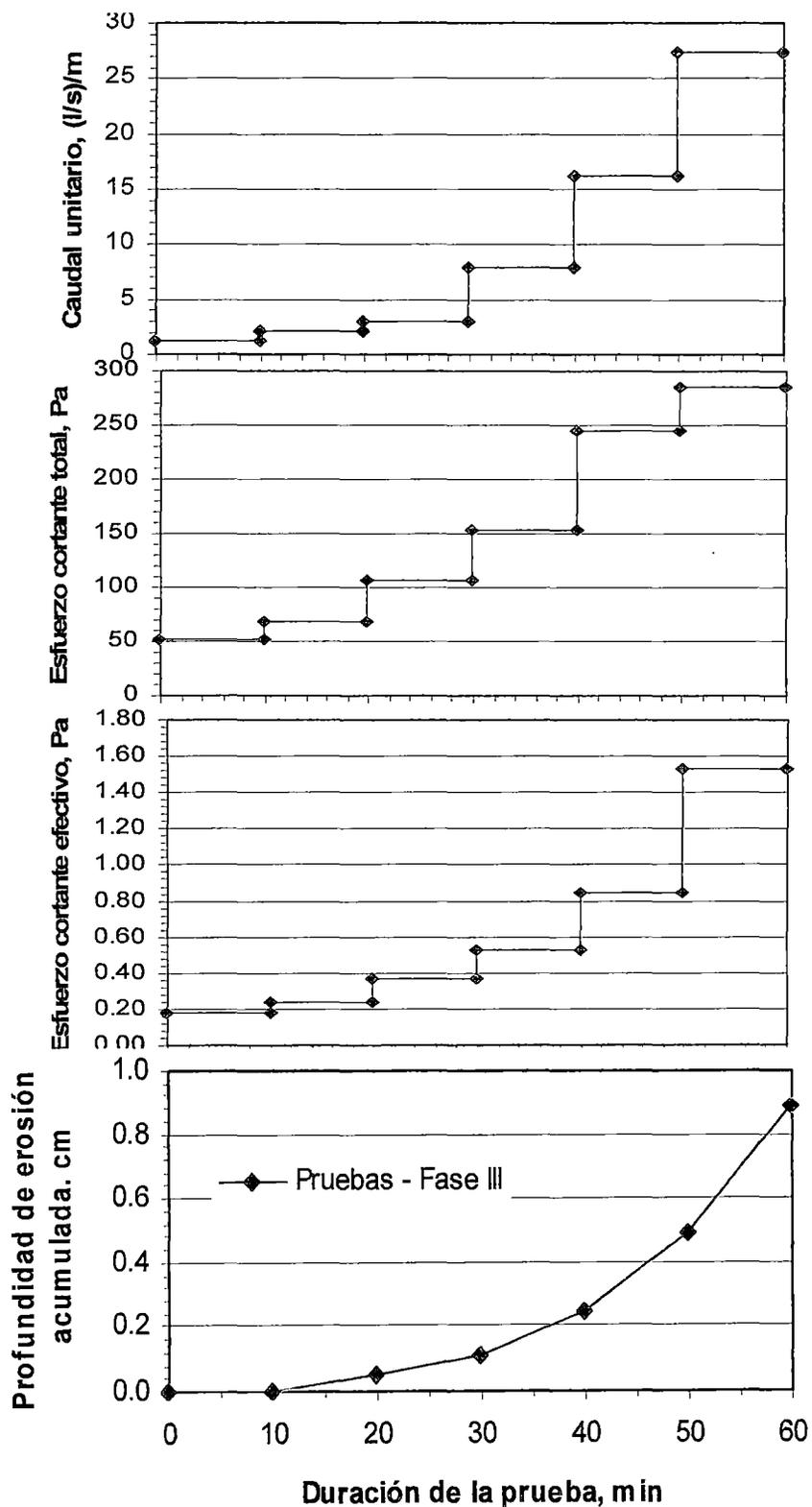


FIGURA 5-3. Proceso de datos de campo, FASE III. (Acumulados)

PRUEBAS FASE IV

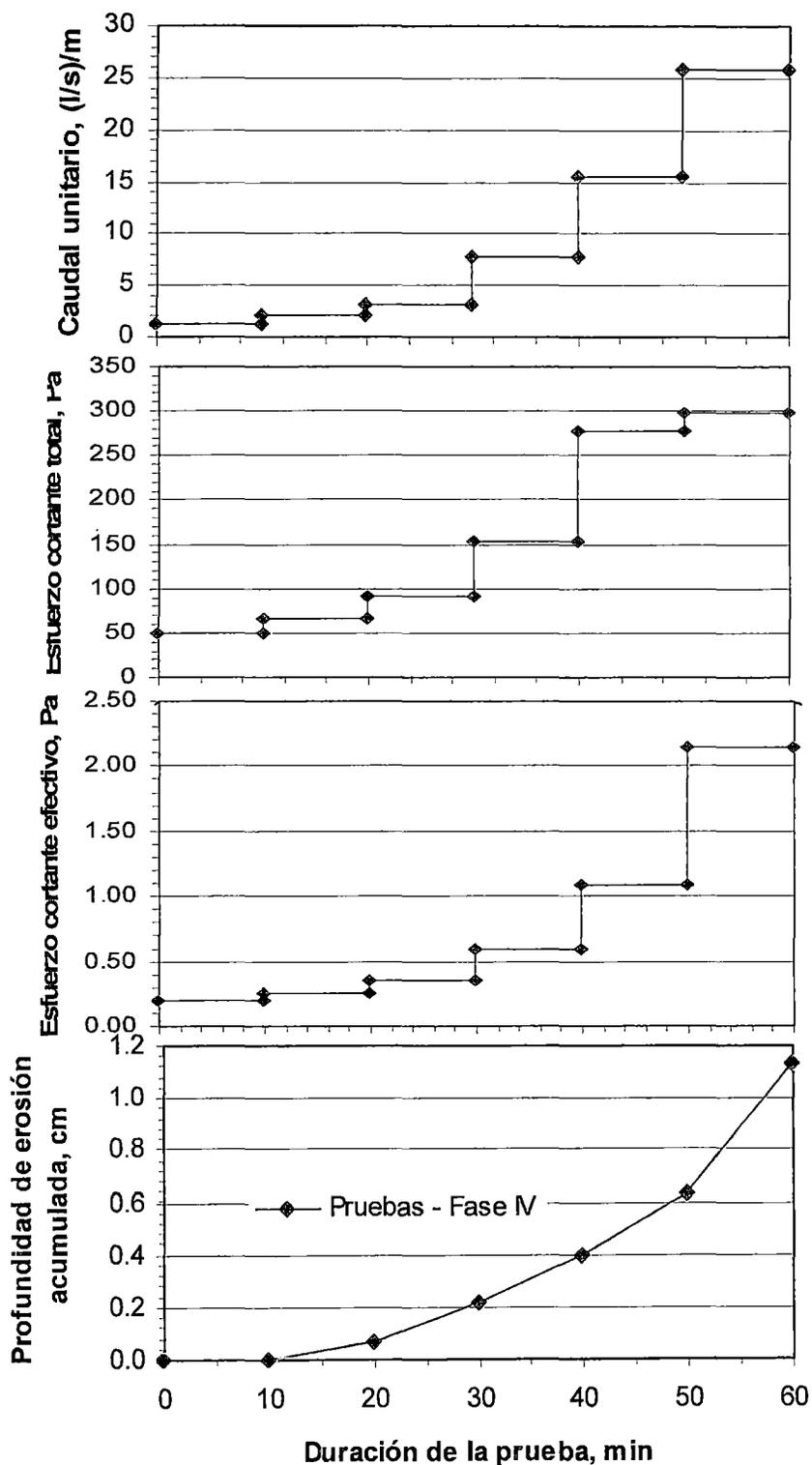


FIGURA 5-4. Proceso de datos de campo, FASE IV. (Acumulados)

Resultados de la Fase I

Tal como lo indica el Cuadro 4-2, Matriz de pruebas; se realizaron cuatro pruebas en suelo sin protección.

Los resultados son bastante similares, es decir, se nota una clara tendencia en el proceso de erosión respecto al aumento del caudal. La erosión se produjo en surcos.

La Figura 5.5 muestra la relación entre Profundidad de erosión (m/h) versus Esfuerzo cortante efectivo (Pa), es visible que la curva tiene una tendencia bastante clara, es decir que se puede ajustar a una relación matemática.

Estos resultados serán los que se compararán con los resultados de las ecuaciones 3-6, 3-8 y 3-12.

No se probaron caudales mayores por el grado de erosión alcanzado, como se puede ver en las fotografías (Anexo E), la causa principal es el espesor de 40 cm de suelo de prueba.

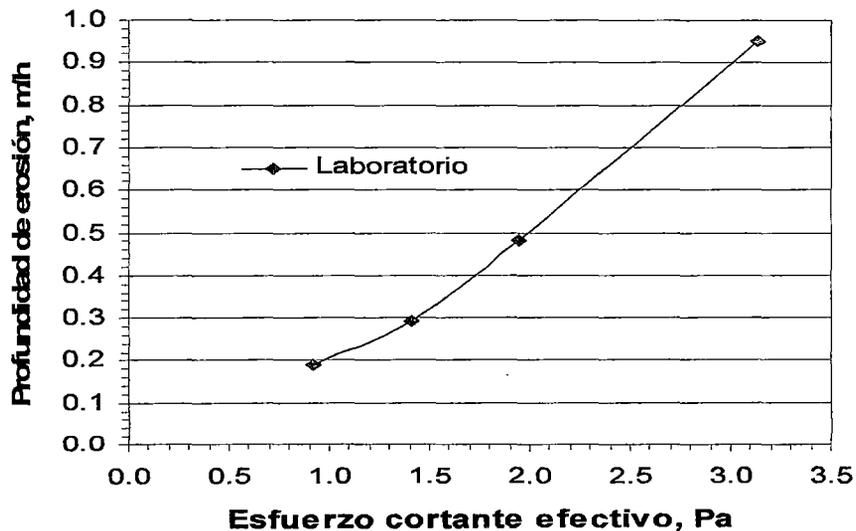


FIGURA 5-5. Profundidad de erosión versus Esfuerzo cortante efectivo Fase I.

Discusión de Resultados de la Fase II

A diferencia de las pruebas de la Fase I, las pérdidas medidas en esta Fase son prácticamente indetectables, es decir el pasto es una excelente herramienta en control de erosión.

Cuando se probó $q = 20.6$ l/s/m, prueba 2-6, el pasto se inclinó, teóricamente este efecto es normal, pues según los resultados en la fórmula de Temple para calcular el coeficiente de Manning (subcapítulo 3.2), para esta condición el coeficiente disminuye, es decir que el agua escurre sobre el pasto flexionado con menor obstrucción.

En esta condición la fuerza del flujo trata de arrancar el pasto, lo que se consiguió en algunas zonas donde el pasto fue arrancado de raíz.

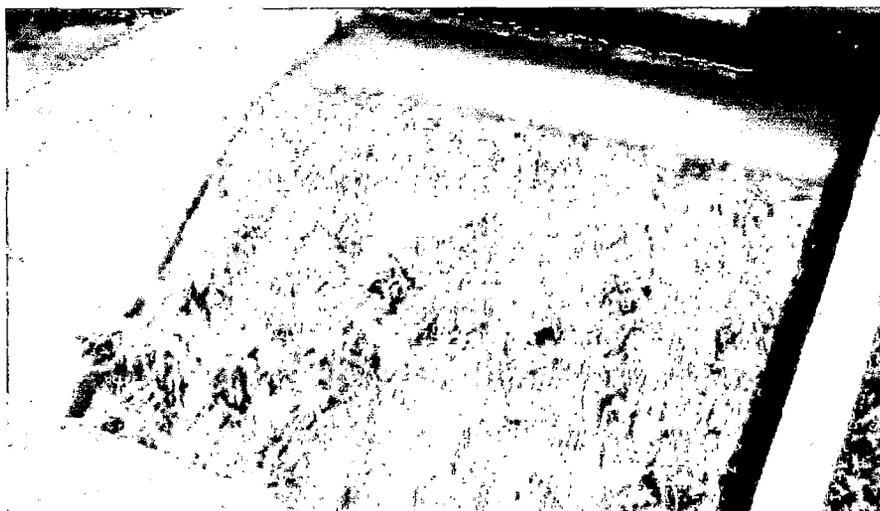


FOTO 5-3. Inicio de la prueba 2-6, casi todo el pasto está flexionado y el agua tiene menor impedimento a su paso. El flujo trata de remover el pasto del suelo.

Algo muy importante observado en campo, fue la variación de la estructura del suelo, el suelo en superficies vegetadas era más consistente y cohesivo que cuando estaba sin vegetación, la causa es el aumento de nutrientes otorgado por el pasto al suelo, lo que ofrece mayor resistencia a la erosión.

Según la USDA², el coeficiente de erodibilidad de la USLE (ver 2.2.4) aumenta mientras más contenido de materia orgánica presente el suelo.

² Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, United States Department of Agriculture

Como muestra la Figura 5-6, los datos medidos son bastante imprecisos y no se pueden ajustar a alguna curva matemática; según varios autores, la pérdida por erosión en superficies vegetadas es bastante variable, depende de muchos factores (ver 2.3), por ejemplo mientras el agua escurre deposita los sedimentos detrás del pasto, lo que los hace más propensos a ser desplazados en futuros eventos.

No obstante, para los tres últimos datos medidos parece que se puede ajustar una curva; Temple (1987) propuso la Ecuación 3-12 para caudales grandes; y los resultados muestran que para caudales mayores los puntos convergen a una curva.

Sin embargo, es recomendable no tomar los resultados numéricos de estos ensayos para modelar condiciones reales, pues como se explicó antes son bastante imprecisos; estos resultados pueden ser usados relativamente para evaluar la función del pasto, pero no para modelar alguna Ecuación matemática. Para esto es necesario realizar más investigaciones al respecto.

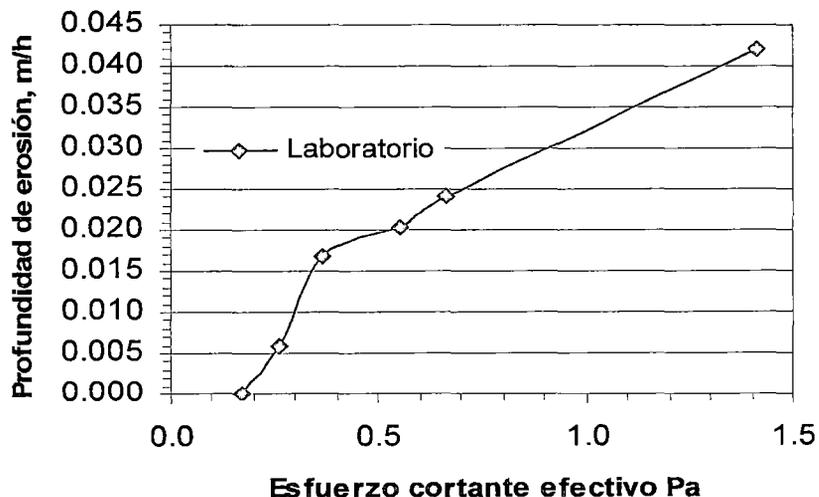


FIGURA 5-6. Profundidad de erosión por cada prueba, m/h (Valores no acumulados) versus Esfuerzo cortante efectivo, Pa; Fase II.

El tiempo de prueba para todas las pruebas fue de 10 min; de haber probado mayores tiempos, se hubiesen obtenido pérdidas mayores; según la revisión de literatura, las pérdidas hubiesen sido proporcionales respecto al tiempo de las pruebas.

Discusión de Resultados de la Fase III

En esta Fase se reforzó al suelo con sistema de confinamiento celular Geoweb® de Presto donado por ANDEX-PERÚ.

La hidráulica no varía por la adición de las geoceldas, la rugosidad se mantiene, pero el coeficiente de erodibilidad disminuye, a grandes rasgos, las características hidráulicas discutidas en los resultados de la Fase II son similares en esta Fase, salvo pequeñas excepciones como las detalladas más adelante.

En esta Fase se produjeron menores valores de profundidad de erosión, tal como se puede observar en los resultados, esto es debido a la acción de las geoceldas, estas confinan el suelo en espacios reducidos y evitan el desplazamiento superficial por surcos o láminas, pues el material que el flujo quiere desplazar es confinado en estos espacios, evitando el desplazamiento del suelo subyacente.

Se produjeron fallas puntuales debido al mal relleno de suelo que se aplicó a la geocelda en el extremo superior o aguas arriba; los vacíos existentes en la geocelda provocaron que el flujo subsuperficial debilitara esta parte levantando el suelo con raíz. Es necesario aclarar que este error representa la típica mala práctica, y no es un problema del producto.



FOTO 5-4. Falla por mala colocación de suelo en los vértices aguas arriba de la geocelda.

Para efectos de cálculo se obviaron estas partes que llegaron a tener de dos a cinco centímetros de profundidad de erosión, aumentando a 1.2 cm la profundidad final de erosión, que según la Figura 5.3 es de 0.9 cm.

En campo se encontró que el centro de la geocelda representa una zona débil, al finalizar la prueba 2-6, se notó en algunas geoceldas que el pasto estaba débil, amarillo y deteriorado pero sólo levemente. Estas condiciones no se presentaron antes de la prueba 2-5. La razón es que la parte central está más distante de las paredes de la geocelda, siendo más vulnerable al flujo.



FOTO 5-5. Pasto ubicado en el centro de la geocelda afectado por el flujo.

Algo importante de añadir, es que en las geoceldas, el pasto creció más rápido que en las Fases II y IV, una razón es la acumulación de agua que producen las geoceldas a su vez que permiten el drenaje por las perforaciones de éstas, este efecto asegura que todas las semillas reciban agua y las geoceldas no permiten el arrastre de semillas durante el riego. Por otro lado, las perforaciones existentes, reducen la probabilidad de falla por flujo subsuperficial disipando el flujo, en caso que se formasen caminos de agua paralelos al talud en el suelo.

Si no hubiese estos agujeros en las geoceldas, se tendrían los siguientes riesgos:

- Suelo con altas tasas de erodibilidad por saturación excesiva del suelo. El pasto tiene un límite de captación de agua dependiendo de su evapotranspiración, si el pasto supera este límite, el suelo se saturará más rápido y el flujo subsuperficial demorará más en escurrir debido a las paredes de la geocelda.
- Raíces del pasto sin amarre con la geocelda. Las perforaciones garantizan continuidad a las superficies vegetadas, éstas comunican las raíces entre celda y celda.

Como se ven en las Fotos del Anexo E, las raíces del pasto atravesaron las geoceldas por sus agujeros laterales, generando de esta manera un sistema integrado geocelda-pasto.

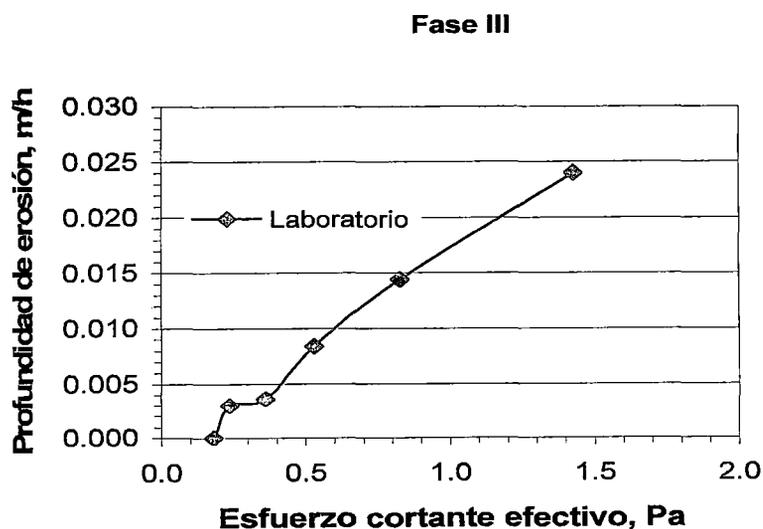


FIGURA 5-7. Profundidad de erosión por cada prueba, m/h (Valores no acumulados) versus Esfuerzo cortante efectivo, Pa; Fase III.

Discusión de Resultados de la Fase IV

En esta Fase se reforzó al suelo con mantos de control de erosión o geomantas MacMat® de MACCAFERRI-PERÚ.

Las pruebas 2-1, 2-2, 2-3, 2-4 y 2-5 de Tanzania y las pruebas 4-1, 4-2, 4-3 y 4-4 de MacMat™, pueden compararse por la similitud de caudales, y se puede apreciar mejores resultados en las pruebas con MacMat™ por considerable diferencia. El MacMat™ fue colocado a 1.5 cm debajo de la superficie del suelo, esto quiere decir que este espesor de tierra es tan erosionable como en el caso de las pruebas con Tanzania sin refuerzo, siempre y cuando no existan pérdidas de pasto, y para las pruebas citadas anteriormente no hubo pérdidas de esta naturaleza. Por tal razón es complicado determinar la causa de estos resultados, y no se observó en campo alguna explicación.

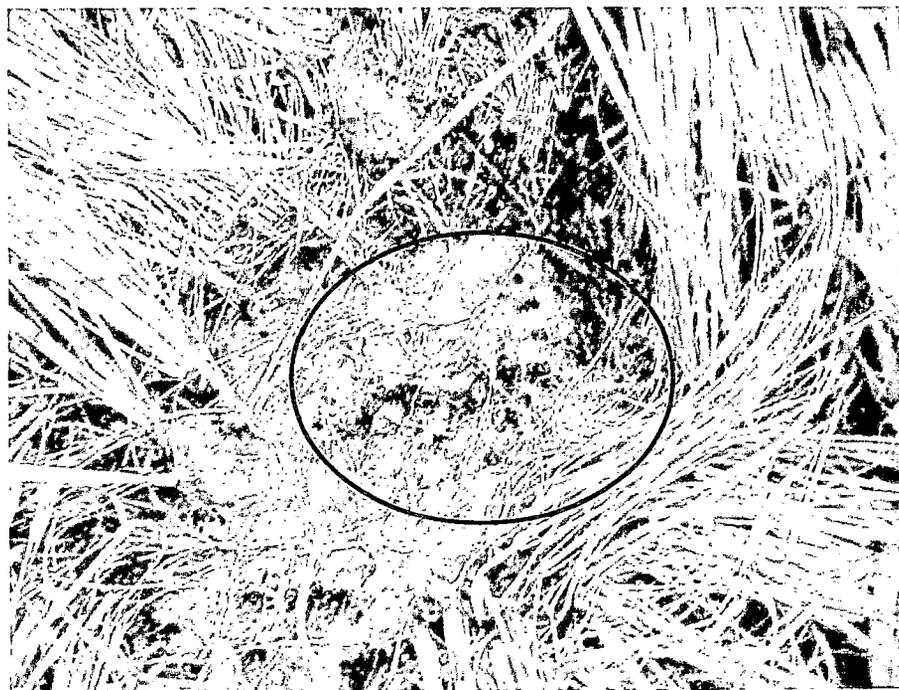


FOTO 5-6. Pasto amarrado con el MacMat™. También se pueden apreciar las raíces que amarran la geomanta.

Una posible explicación de estos resultados, que puede ser válida pero difícil de notar en campo, es la erosión de pequeñas partículas debido a la existencia de pequeños flujos subsuperficiales que aprovechan el ambiente poroso generado por las raíces y empujan las pequeñas partículas que la escorrentía superficial

no puede traer consigo debido a la protección del pasto; esta razón puede justificar las pérdidas en las pruebas con Tanzania, las cuales fueron mayores (casi el doble) que con el uso de las geomantas MacMat™ las cuales tiene la propiedad de confinar el suelo evitando el desplazamiento de las partículas en las proximidades de la geomanta reduciendo los efectos de los flujos subsuperficiales.

Es necesario agregar a éste último enunciado, que mucho depende la profundidad de colocación de la geomanta.

Los resultados de la prueba 2-6 (Tanzania) y de la prueba 4-6 (Tanzania con MacMat™) son bastante claros porque hubo pérdida de pasto en la prueba 2-6 para un caudal unitario de 21l/s, y en la prueba 4-6 ($q = 27l/s$) no hubo pérdida de pasto.

En este caso, la erosión observada en la prueba 2-6 se justifica por la pérdida de pasto, donde se produjo desplazamiento de partículas en las áreas de falla.

A pesar que se simuló un mayor caudal en la prueba 16 que en la prueba 10, no se produjo erosión, entonces queda demostrado que la función principal de la geomanta MacMat™ es generar un elemento continuo formado por el suelo, las raíces y los tallos del pasto, y a su vez reforzar la resistencia de las raíces a ser extraídas por el flujo de agua.

Las pérdidas de erosión producidas no llegaron hasta dejar el MacMat™ descubierto. La erosión se dio en láminas, pues no se produjeron surcos debido a la presencia de vegetación.

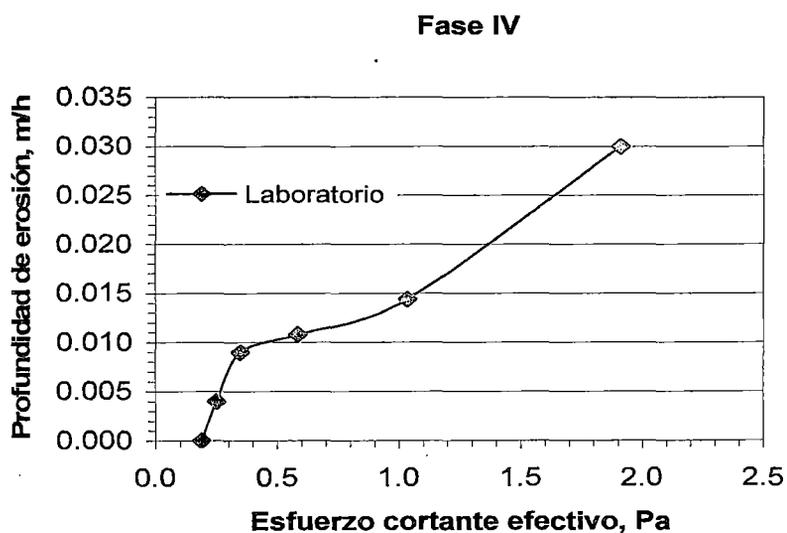


FIGURA 5-7. Profundidad de erosión por cada prueba, m/h (Valores no acumulados) versus Esfuerzo cortante efectivo, Pa; Fase IV.

5.3.2 Relación entre la técnica de bioingeniería y el caudal

El siguiente cuadro resume los resultados obtenidos en campo:

CUADRO 5-7. Relación entre la técnica de bioingeniería y el caudal de prueba

Fase	I	II	III	IV
Protección	Sin protección	Tanzania	Tanzania con Geoweb®	Tanzania con MacMat™
$M \text{ und/m}^2 \rightarrow$	0	2814	4105	2921
$q \text{ (l/s)/m} \downarrow$				
0.5	Erosión por surcos			
1.0	Erosión por surcos	Pérdidas imperceptibles	Pérdidas imperceptibles	Pérdidas imperceptibles
1.5	Severa erosión por surcos			
2.0		Pérdidas imperceptibles	Pérdidas imperceptibles	Pérdidas imperceptibles
3.0	Muy severa erosión por surcos	Formación de micro-surcos	Pérdidas imperceptibles	Pérdidas imperceptibles
6.0		Formación de micro-surcos		
7.5		Muy leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos	Pérdidas imperceptibles	Formación de micro-surcos
15.0			Pérdidas por mala instalación del geoweb (mal relleno en la parte superior de las celdas)	Muy leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos
20.0		Leves pérdidas de pasto por esfuerzo hidráulico elevado, lo que originó erosión local en las zonas afectadas		
25.0			Importantes pérdidas por mala instalación. Imperceptibles pérdidas de pasto en el centro de las celdas	Muy leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos

La línea verde del Cuadro 5-7, indica un límite de pérdidas representativas, que en esta investigación se consideró de 2 mm. Las pérdidas de mayor importancia ocurrieron al flexionarse el 100% del pasto, (últimas pruebas). Ver Figura 5-8.

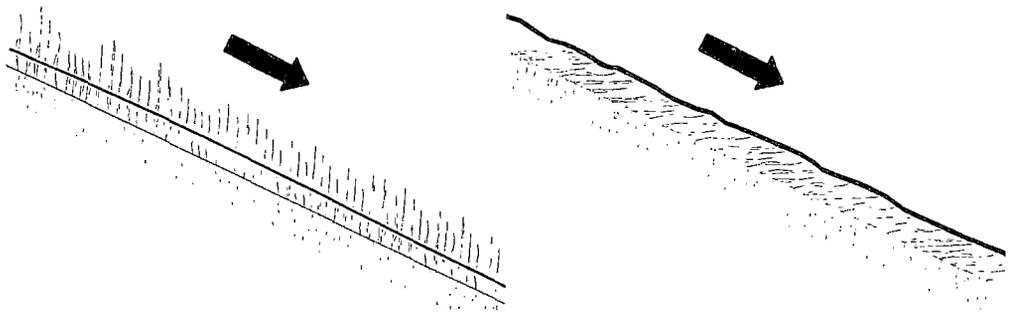


FIGURA 5-8. Comportamiento hidráulico del pasto. La Figura de la izquierda muestra el comportamiento para caudales pequeños, la Figura de la derecha muestra el comportamiento para caudales mayores, lo que se refleja en la reducción del coeficiente de Manning y el aumento de los esfuerzos de corte que tratan de remover el pasto.

El tipo de protección no influyó en el comportamiento del pasto respecto al flujo, para todas las pruebas el pasto empezó a inclinarse a partir de un caudal de 20 (l/s)/m.

Es necesario aclarar, que las pérdidas de la fase III observadas en el Cuadro 5-7, son producto de la mala instalación del producto, no es una falla del Geoweb®, las figuras elaboradas no consideran éstas pérdidas, sino las producidas en las zonas donde se colocó bien el material, que representan casi la totalidad del área.

Tomando en cuenta lo anterior, si bien es cierto que con Geoweb® se obtuvieron pérdidas de suelo menores que con MacMat®, existen ciertas ventajas entre estos productos, las cuales se han hecho referencia en el ítem anterior.

La ventaja más saltante del MacMat™ sobre el Geoweb®, es el enlace continuo que este da entre el suelo y las raíces, pues la zona crítica del Geoweb es la parte central de la celda, donde el pasto difícilmente amarra en las perforaciones del Geoweb®.

No obstante, el Geoweb® es un sistema muy completo, no solamente reduce las pérdidas por erosión confinando el suelo en espacios reducidos, sino que además garantiza la germinación y el crecimiento de la vegetación. También evita el deslizamiento superficial a través de su sistema de tensores y anclajes.

5.3.3 Predicción de la profundidad de erosión

Discusión de Resultados de la Fase I

Se ajustaron los datos mostrados en la Figura 5-1, según las siguientes ecuaciones desarrolladas en el capítulo 3:

$$Z_0 - Z_n = k_D \sum_{i=1}^n [\gamma d_i S_i]^2 \Delta t \dots\dots\dots(3-6)$$

$$Z_0 - Z_n = k_{OR} \sum_{i=1}^n [\gamma d_i S_i]^m \Delta t \dots\dots\dots(3-8)$$

$$Z_0 - Z_n = k_{OR} \sum_{i=1}^n [\gamma d_i S_i (n'/n)^2]^p \Delta t \dots\dots\dots(3-12)$$

Las Figuras 5-8, 5-9 y 5-10 muestran el ajuste para los resultados de las pruebas de la FASE I.

La Figura 5-9 y 5-10 muestran exactamente la misma forma, pues el esfuerzo cortante efectivo es proporcional al esfuerzo cortante total en un factor de $(n'/n)^2$.

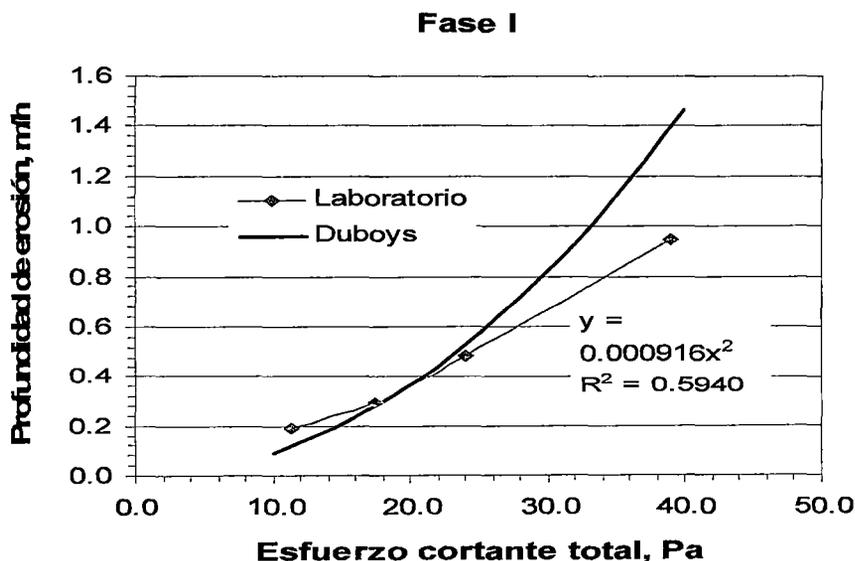


FIGURA 5-9. Ajuste de los resultados de laboratorio según la Ecuación de Duboys (1879)

En todas las figuras que siguen a continuación, las series de datos con nombre "Laboratorio", son los datos tomados durante la ejecución de pruebas de esta tesis de investigación.

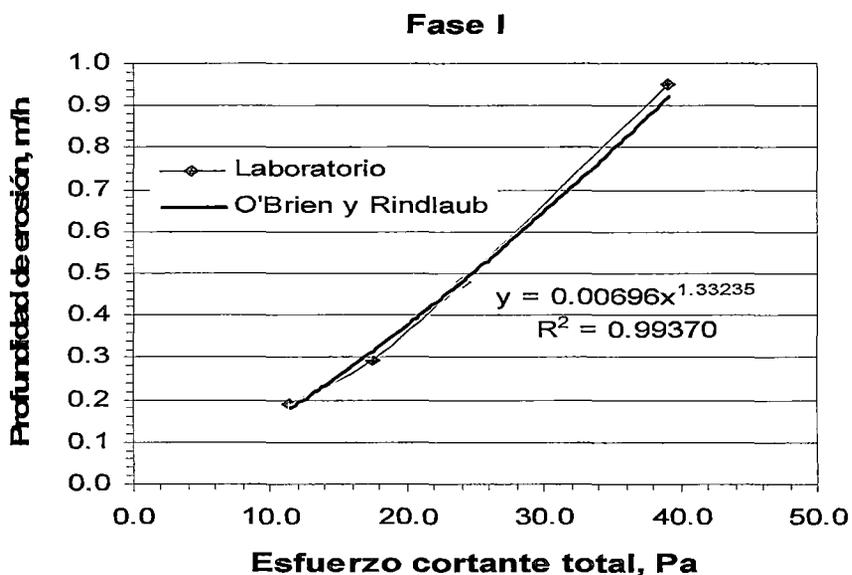


FIGURA 5-10. Ajuste de los resultados de laboratorio según la Ecuación de O'Brien y Rindlaub.

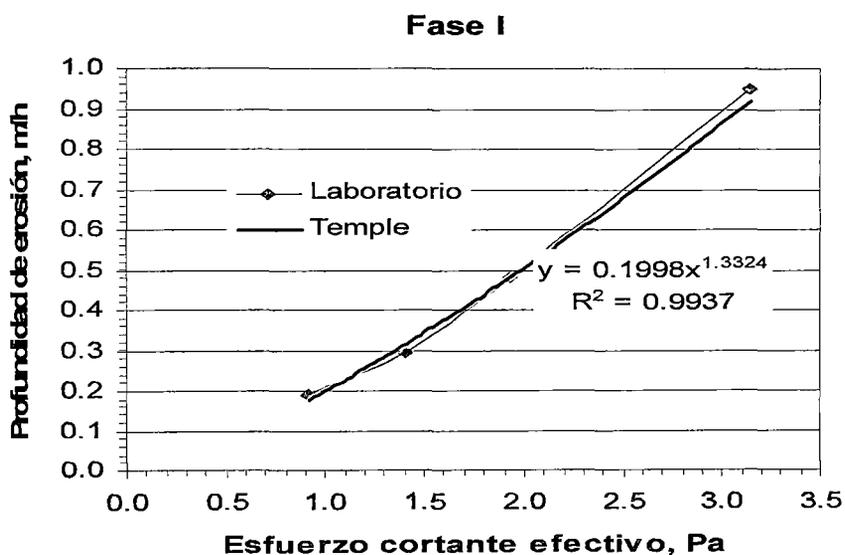


FIGURA 5-11. Ajuste de los resultados de laboratorio según la Ecuación de Temple.

Los resultados de la predicción según Duboys no son confiables, pues la curva se ajusta con un coeficiente de correlación de 0.5940 que es menor a 0.70,³ siendo éste el mínimo permitido para ajuste de curvas. La relación encontrada es $y = 0.000916x^2$, siendo y: profundidad de erosión y x: esfuerzo cortante total.

Los resultados de la predicción de profundidad de erosión según O' Brien y Rindlaub (1934) y Temple (1987), se ajustan bastante bien. Como se explico líneas antes, ambas gráficas son proporcional es, y ambas con coeficientes de correlación de 0.9937, lo que indica un buen ajuste.

Esto es lógico pues los valores se ajustan a dos parámetros, el coeficiente de erodibilidad y el exponente del esfuerzo de corte, mientras que la Ecuación de Duboys solo se ajusta con el coeficiente de erodibilidad.

Las ecuaciones encontradas son:

O' Brien y Rindlaub: $y = 0.00696x^{1.33235}$, $k_{OR} = 0.00696$, $m = 1.3324$

Temple: $y = 0.1998x^{1.3324}$, $k_T = 0.1998$, $a = 1.3324$

Es necesario recalcar que se ha considerado el coeficiente de Manning constante en la investigación, pero Hanson (1990) ha encontrado variaciones del coeficiente de Manning con la variación del caudal, aunque las variaciones no superaban el 20%.

Tomando en cuenta que los caudales probados son pequeños y no sufren de gran variación respecto al tiempo; se puede suponer que las variaciones del coeficiente de Manning son mínimas, aunque de haber tenido en cuenta este factor, los resultados de las predicciones de O' Brien y Rindlaub y Temple tendrían variaciones.

³ (2001) Ing Maritza Silva . Curso de Hidrología General. Ciclo 2001 – I. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Lima.

Discusión de Resultados de las Fase II, III y IV

Como se mencionó en el ítem 5.3.1, los resultados observados en las Fases con pasto fueron bastante dispersos, no se encontró ninguna curva de ajuste para todos los datos mencionados en campo, entonces se puede citar lo mencionado por Temple (1987)⁴ cuando planteó el modelo matemático para taludes vegetados con caudales grandes de corta duración, donde el coeficiente de Manning se calcula como, (ver 2.2.3):

$$n = \exp[C_i[0.0133 \ln^2(q/c_u) - 0.0954 \ln(q/c_u) + 0.297] - 4.16];$$

$$\text{si } 0.0025 C_i^{2.5} < q/c_u < 36;$$

$$n = \exp[0.126 C_i - 4.16]; \text{ si } 36 < q/c_u \dots\dots\dots (5-1)$$

donde no se menciona la primera expresión para caudales menores:

$$n = \exp[C_i[0.0831 \ln^2(C_i) - 0.637 \ln(C_i) + 1.346] - 4.16]; \text{ si } q/c_u < 0.0025 C_i^{2.5}.$$

$$\dots\dots\dots (5-2)$$

, con el cual se calcularon todos los caudales menores a 40 l/s.

Esta es una razón teórica muy fuerte que indica la imprecisión de los resultados, excepto para las pruebas donde las condiciones se acercaban a los flujos cuyo coeficiente de Manning se calculaba usando la expresión (5-2)

Teniendo como objetivo visualizar el efecto del esfuerzo cortante efectivo, y las diferencias entre las ecuaciones de Temple (1987) y O'Brien y Rindlaub (1934); se graficaron en las Figuras 5-11, 5-12, 5-13, 5-14, 5-15 y 5-16 la relación esfuerzo cortante total y efectivo utilizando solamente los valores que mejor se ajustan a una curva, siendo los tres últimos valores para cada caso.

Es importante recordar que la diferencia entre estas dos ecuaciones es el factor "(n/n')", que en este caso tiene variación porque el coeficiente de Manning sufre cambios para caudales grandes (40 l/s para Fase I (50 l/s para Fases III y IV), lo que no se daba en la Fase I, pues se consideró que el coeficiente de Manning permanece constante en todas las pruebas.

⁴ Citado de Ref. 22 y 23, estudios de erosión de aliviaderos y presas de tierra con vegetación.

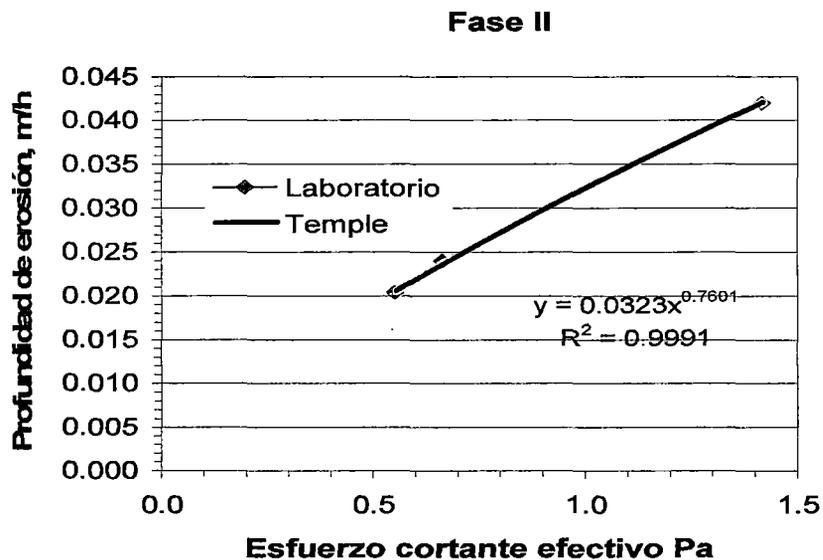


FIGURA 5-12. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de Temple.

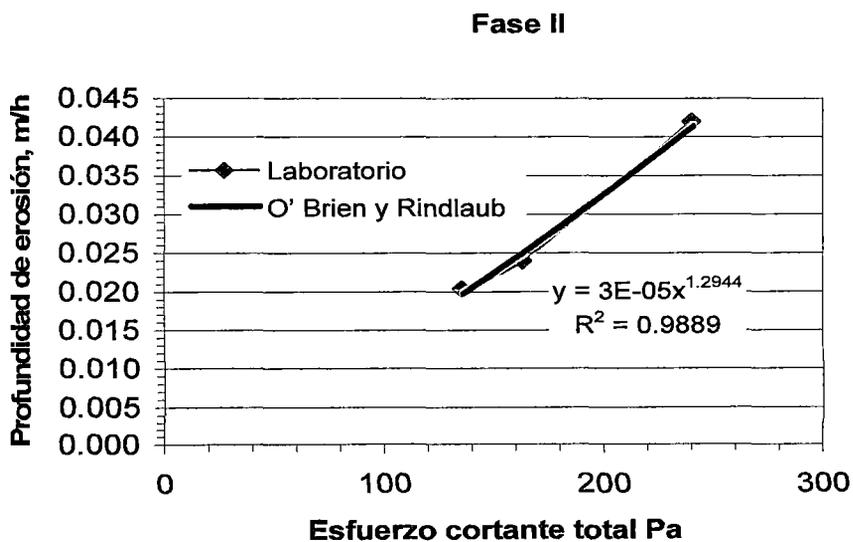


FIGURA 5-13. Ajuste de los resultados de laboratorio según la Ecuación de O' Brien y Rindlaub.

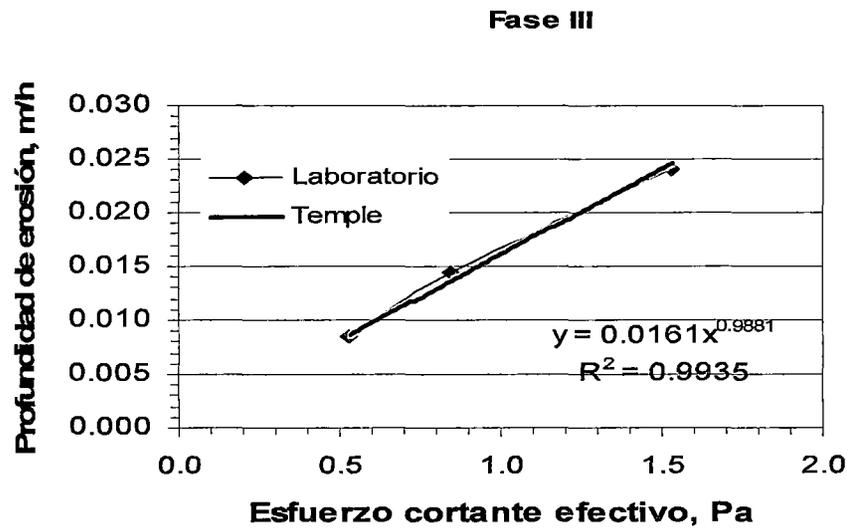


FIGURA 5-14. Ajuste de los resultados de laboratorio según la Ecuación de Temple

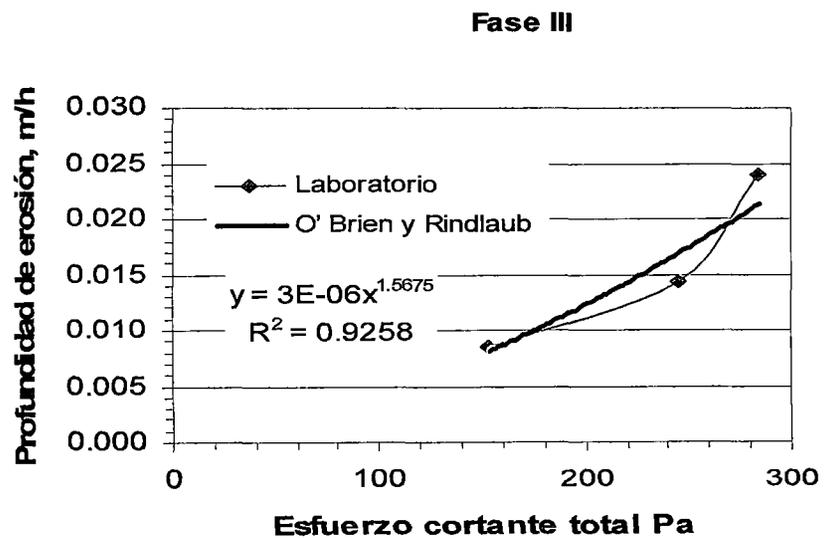


FIGURA 5-15. Ajuste de los resultados de laboratorio según la Ecuación de O' Brien y Rindlaub.

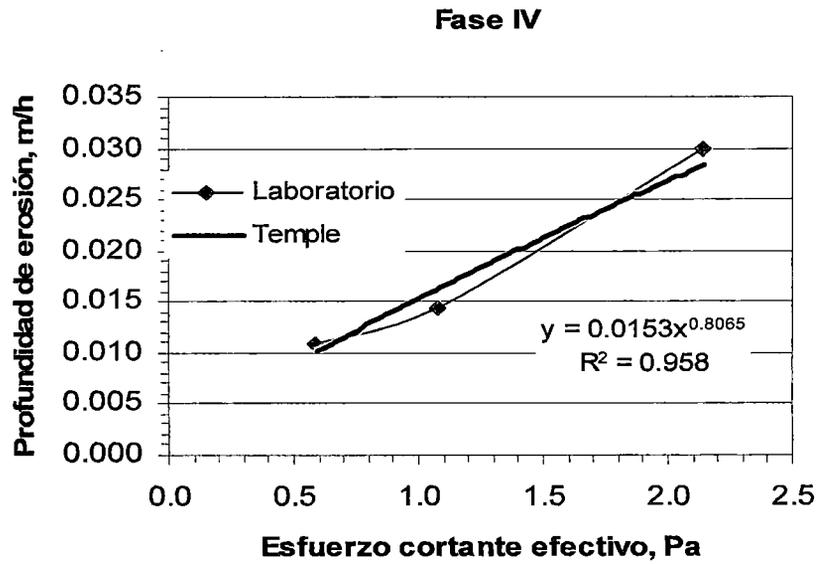


FIGURA 5-16. Ajuste de los resultados de laboratorio según la ecuación de Temple.

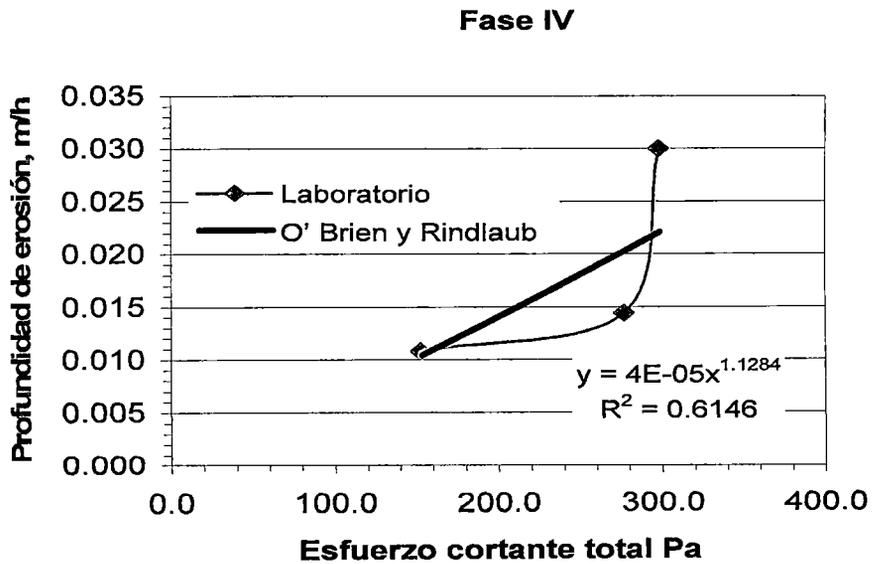


FIGURA 5-17. Ajuste de los resultados de laboratorio según la Ecuación de O' Brien y Rindlaub.

La razón por la que no se empleó la Ecuación de Duboys (1897), fueron los resultados obtenidos en la Fase I, cuya gráfica determinaba un valor de coeficiente de correlación de 0.594, el cual era muy pobre para una buena bondad de ajuste; entonces con los datos obtenidos en campo para las Fases II, III y IV; los resultados tendrían menor bondad de ajuste, pues la Ecuación de Duboys es una parábola de segundo grado y el único coeficiente que permite el ajuste es el coeficiente de erodibilidad, por esta razón sería en vano tratar de ajustar los datos a esta Ecuación.

Según muestran los resultados, para todos los casos se logra un mejor ajuste con la Ecuación de Temple (1987), lo que nos ilustra la importancia del esfuerzo cortante efectivo y su relación con la variación del coeficiente de Manning, sin embargo estas gráficas no son representativas, estos datos son pobres en número y se necesitan más resultados con caudales mayores para encontrar una gráfica con mayor ajuste

Las Fotos de las pruebas 2-6, 3-6 y 4-6, mostradas en el Anexo E, refleja este cambio pues para estas pruebas se vio en el campo que el pasto se echa hacia aguas abajo, permitiendo que el flujo pase por éste de manera más rápida y uniforme.

CUADRO 5-8. Resumen de resultados según la bondad de ajuste.

Ecuación → Protección ↓	Duboys	O' Brien y Rindlaub	Temple
Sin Protección	0.59 Mal ajuste	0.99 Buen ajuste	0.99 Buen ajuste
Tanzania	--	0.98 Buen ajuste	0.99 Buen ajuste
Tanzania con Geoweb®	--	0.93 Buen ajuste	0.99 Buen ajuste
Tanzania con MacMat™	--	0.61 Mal ajuste	0.96 Buen ajuste

Conclusiones y Recomendaciones

En este Capítulo se resumen cualitativamente los resultados de la investigación, haciendo énfasis en el aprendizaje asimilado durante y después de realizar esta Tesis de investigación.

Finalmente se explican las debilidades de esta investigación, así como recomendaciones para mejorarla y ampliarla.

6.1 Conclusiones

Tal como se explicó en el Capítulo 3, en el proceso de erosión actúan varios parámetros que pueden agruparse en Clima, Topografía, erodibilidad del suelo y cobertura protectora.

Según los resultados de esta investigación; para las condiciones de laboratorio explicadas; en un talud de pendiente 0.5 (1V:2H) con Tanzania de 40 a 50 días de edad y de 2800 a 2900 tallos/m² y luego de probarlos con caudales de escorrentía de 1 a 25 (l/s)/m, se obtendrá un rango de 1 a 1.5% de pérdida de suelo respecto a un talud sin protección de similar morfología; por lo tanto, la protección que brinda el pasto en taludes afectados por escorrentía superficial es notable.

Sin embargo, para condiciones hidrológicas más severas, se genera en el suelo esfuerzos de corte hidráulicos que a su vez transmiten esfuerzos de tensión en el pasto. En situaciones críticas; estos efectos pueden provocar la separación del pasto en el suelo; generando erosión en el mismo, lo que conlleva a mayores gastos en la fase de mantenimiento de las obras. La protección con pasto Tanzania fue efectiva hasta un caudal menor a 20 l/s/m, luego ocurrieron pérdidas de pasto que originaron las pérdidas más importantes de suelo.

Bajo estas condiciones es necesario ayudar a la vegetación (pastos) a no ser removida y por consiguiente evitar la erosión del suelo. Para esto es necesario un elemento resistente, flexible y que permita el establecimiento de la vegetación sin tener consecuencias ambientales.

En esta investigación, se utilizaron dos tipos de geosintéticos:

- La geomanta MacMat™ de MACCAFERRI; y según prueban los resultados de esta investigación, no se obtuvo pérdidas de pasto, y se obtuvo menores pérdidas de suelo que en las pruebas con Tanzania sin refuerzo (0.5 a 0.8% respecto a las pruebas con suelo sin protección).

- Sistema de confinamiento celular Geoweb® de PRESTO; y según prueban los resultados de esta investigación, se obtuvo un margen de pérdidas de 0.3 a 0.6% respecto a un talud sin protección. No solamente se consiguió una mejor protección, sino que además, se logró una mayor densidad de siembra y mejor crecimiento que en los taludes sin Geoweb®.

La cantidad y forma de erosión que se producen para similares condiciones hidrológicas y topográficas, depende del tipo de protección. Con Geoweb® se produjeron menos pérdidas que con MacMat™, las diferencias físicas entre los productos validan esta conclusión. Mientras que el Geoweb® confina el suelo y amarra las raíces en las perforaciones reduciendo la tasa de erosión, el MacMat™ amarra el 100% de las raíces pero deja un espesor de suelo libre sobre la geomanta. La protección con Tanzania y Geoweb® fue efectiva hasta el final de las pruebas. No obstante, para la última prueba (25 l/s/m), se encontró pasto ligeramente deteriorado en el centro de algunas celdas. La protección con Tanzania y MacMat™ fue efectiva también hasta el final de las pruebas (25 l/s/m). No obstante, se obtuvieron mayores pérdidas de erosión que con la protección del Geoweb®; aunque no se registraron pérdidas o fallas del pasto.

Para todas las pruebas, a partir de $q = 10$ l/s/m, el pasto empezó a flexionarse, llegando a su efecto máximo en las pruebas 2-6, 3-6 y 4-6, es decir, para $q = 20$ l/s/m, este comportamiento no dependió de la protección. Para las pruebas 2-6, 3-6 y 4-6, se observó mayores pérdidas de suelo que lo esperado si se hubiese hecho una extrapolación con los datos de las cinco primeras pruebas para cada caso. Esto quiere decir que el suelo será más erosionable si el pasto está siendo flexionado por el flujo, demostrando de esta forma que la ecuación de Temple tiene mejor ajuste, al considerar este cambio en la rugosidad del pasto.

La elección entre uno y otro producto depende de la magnitud de las condiciones esperadas y de la importancia de la obra; como en todos los proyectos civiles, es necesario realizar otros tipos de análisis, tales como el económico, etc.

6.2 Recomendaciones

Dado que esta tesis es una investigación pionera en su género en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de ingeniería, es recomendable que se siga el proceso el cual puede completarse por medio de otras tesis de investigación, a continuación se citan algunas recomendaciones a futuras investigaciones:

- Realizar el mismo procedimientos en diferentes pendientes (1:1.5, 1:1 V:H)
- Falla por erosión en taludes vegetados
- Influencia del área y uniformidad de la vegetación en la pérdida de sedimentos de taludes.
- Incidencia en el tipo de suelo para el control de erosión en taludes vegetados. (suelos cohesivos y no cohesivos)
- Comparación en el comportamiento de diferentes tipos de pastos para el control de erosión en taludes
- Aplicación de técnicas especializadas de Bioingeniería de suelos para el control de erosión en taludes.
- Determinación de coeficientes de erodibilidad para varios tipos de suelos.
- Aporte al esfuerzo cortante del suelo con vegetación.

Para dar inicio a las anteriores investigaciones se recomienda:

- Probar caudales mayores a 10 l/s/m (superficies vegetadas), hasta encontrar la falla por erosión.
- Realizar pruebas de calibración para encontrar un tiempo de prueba apropiado, si es que se desea mantener la duración de prueba constante (superficies vegetadas).
- Medir velocidades en los taludes con un objeto flotante o un trazador químico como permanganato de potasio.

- Analizar más a detalle la influencia del tiempo de duración de la prueba en la profundidad de erosión en suelo desnudo y en superficies vegetadas, si se pudiese.
- Medir el caudal de salida.
- Tomar muestras de agua con sedimentos.

Se recomienda realizar los siguientes cambios en la estructura, para tener mayor facilidad en realizar posteriores pruebas y no tener inconvenientes para mayores caudales:

- Demoler la boca de la rápida (si no hubiese inconvenientes), para tener mayor área de disipación de energía. Ver foto 6-1.

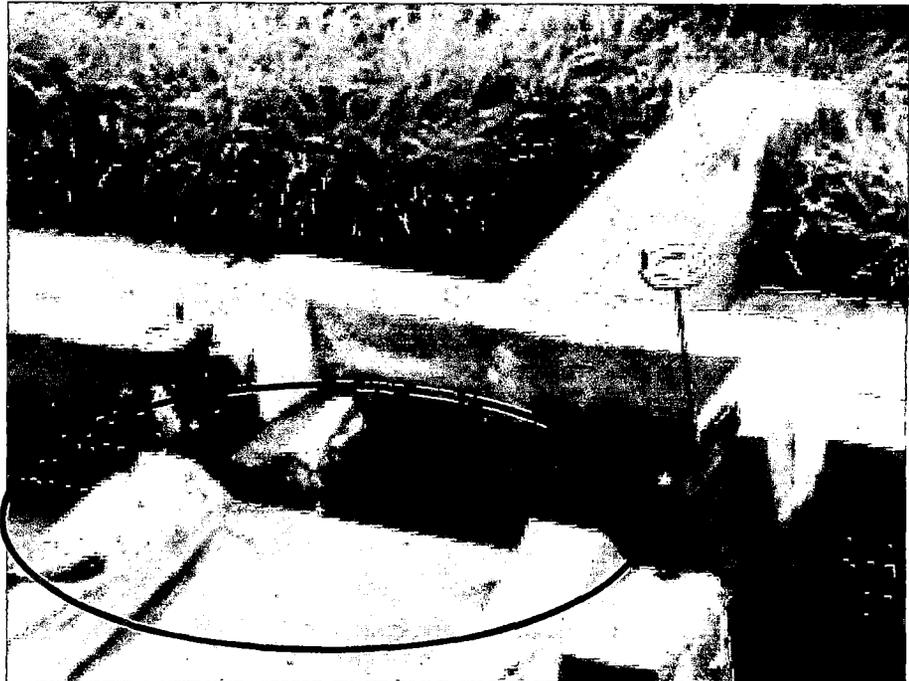


FOTO 6-1. Se recomienda demoler la boca de la rápida para mayor área de disipación.

- Ampliar la ventana de fuga de agua, ver Figura 6-2
- Colocar una hilera más de ladrillos de 6 huecos en la poza disipadora, ver foto 6-3
- Disminuir el nivel de la poza disipadora, ver foto 6-3.
- Reemplazar las compuertas por unas más altas que permitan mayores flujos.

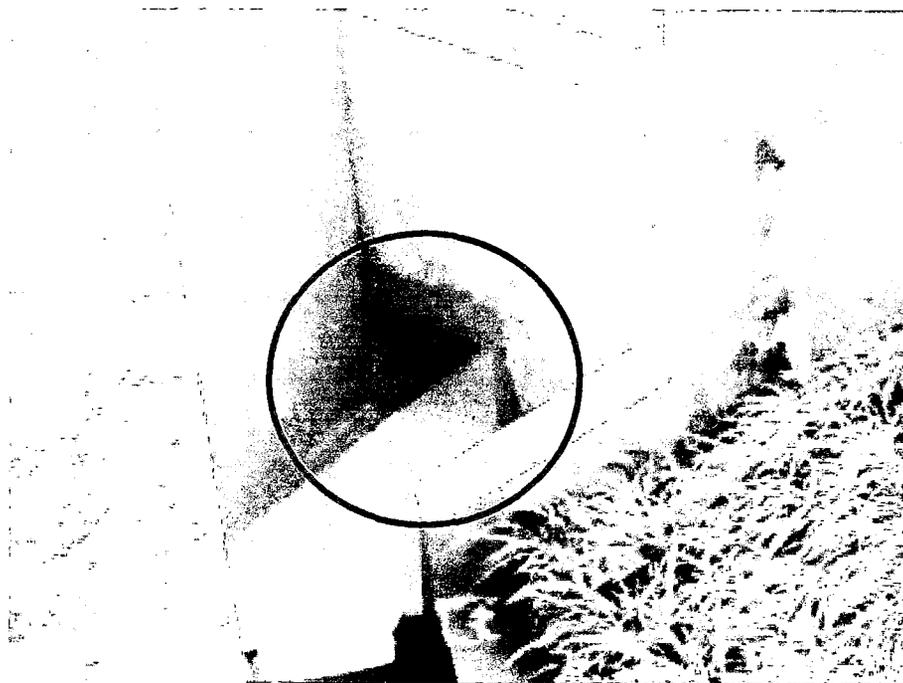


FOTO 6-2. Se recomienda ampliar la ventana de fuga.

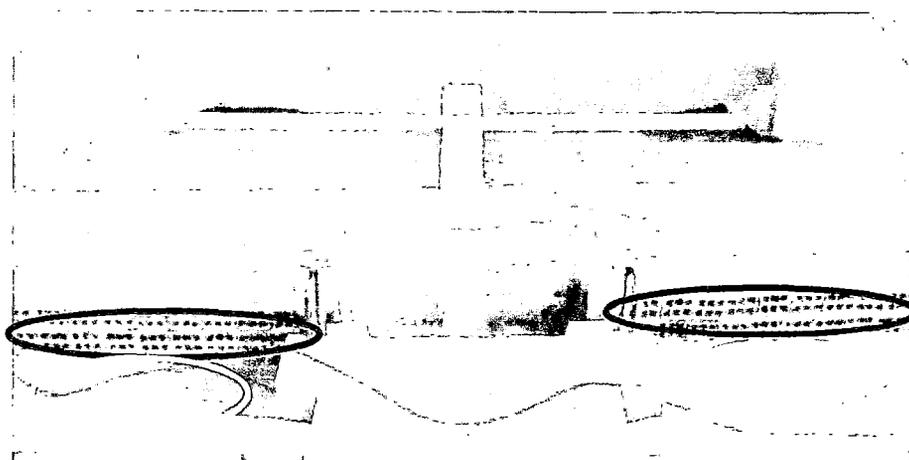


FOTO 6-3. Se recomienda aumentar hileras de ladrillos (elipse roja) y disminuir el nivel de la poza disipadora (elipse amarilla)

Referencias Bibliográficas

- (1) Allen H. H., Leech J. R. (1997) Bioengineering for Stream bank Erosion Control. U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC. EE.UU.
- (2) Bestmann Green Systems Iberica S.L. (1998), Adaptación de las Técnicas de Bioingeniería en Ambientes Mediterráneos. Sevilla, España.
- (3) Centeno Pulido, F. A., (2001), Ingeniería Biotécnica y Bioingeniería de Suelos. Nuevas tendencias de la geotecnia para las obras de tierra, la estabilidad de taludes y el control de la erosión. XVII Seminario Venezolano de Geotecnia del estado del arte a la práctica - Caracas, Venezuela. Noviembre, 2002. Sociedad venezolana de geotecnia.
- (4) De La Cruz., L. A. (2004). "Bioingeniería De Suelos Aplicado En Control De Erosion En Taludes". Ciclo de ponencias del XIICONEIC organizado por la UNSA, 6-11 setiembre-2004. Arequipa. Arequipa. Perú. 19-23
- (5) Directores ejecutivos del Banco Mundial, (1995). Vetiver: La Barrera Contra la Erosión. Tercera edición del original en inglés: The Hedge against Erosion. Washington, D.C. EE.UU
- (6) Escobar Potes, C.E., (2003). Las Coberturas Vegetales en el Control de la Erosión. Primera edición. Manizales, Colombia.
- (7) French, Richard (1988); Hidráulica de Canales Abiertos. Primera edición. Impresora Carbayón, S.A., Delegación Iztacalco, México.
- (8) Georgia Soil And Water Conservatlon Commission, (2000). "Manual For Erosion And Sediment In Georgia Control". Fifth Edition. Georgia. EEUU.

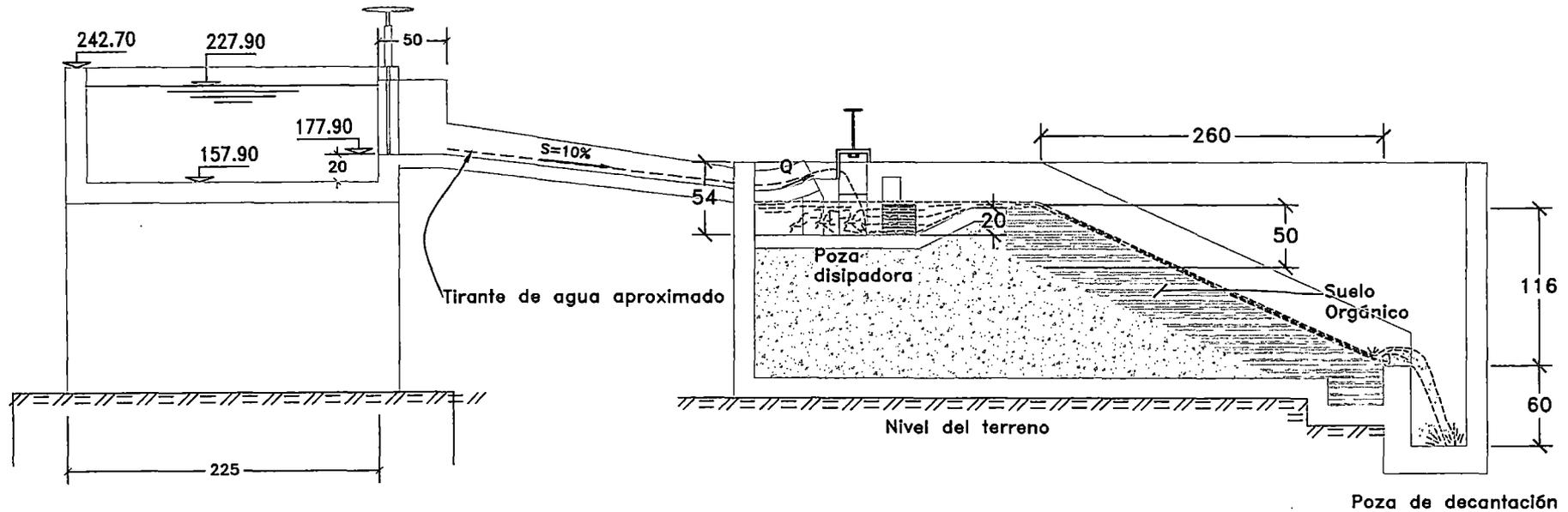
- (9) Gray, D. H., Sotir R. B., (1996), *Biotechnical and soil Bioengineering Slope Stabilization. A Practical guide for soil Erosion Control*. Primera Edición. John Wiley & Sons, INC. New York, N. Y. EE.UU.
- (10) Guerrero Campo, J. (2000). *Efectos de la Erosión del Suelo sobre los Patrones de la Vegetación y su Composición Florística. Una revisión bibliográfica*. Nº 17. Universidad de Alicante, Mediterránea, México.
- (11) Hanson., G. J. (1990), "Surface Erodibility Of Earthen Channels At High Stresses Part I - Open Channel Testing". *Transactions of the ASAE*. ASAE, St.Joseph, Michigan, EE.UU. 33 (1), 127-131
- (12) Hewlet, H; Boorman, L., Bramley, M., (1987) *Design Of Reinforced Grass waterways*. CIRIA. London. England.
- (13) Lachat, B. (1999) *Guide de Protection des Berges de Cours d' Eau en Techniques Végétales; Ministère de l' aménagement du territoire et de l' environnement*. Vicques, Switzerland.
- (14) Maccaferri; *African Gabions (2002); Soil Bioengineering Training Manual*. First edition.
- (15) Minaya Espinoza, E. (2005) *Erosión En Lecho No Cohesivo Debido Al Impacto De Un Chorro A La Salida De Un Vertedero Con Salto De Ski*. Tesis para optar el título de Maestro en ciencias con mención en Ingeniería Hidráulica. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- (16) MTC (1997). *Guía Ambiental para la Rehabilitación y Mantenimiento de Caminos Rurales*. MTC. Lima, Perú
- (17) NEYRPIC (1957) *Constructions Mécaniques et Hydrauliques*. NEYRPIC. Grenoble - Lyon. France.

- (18) Porras Murillo, G. 2000. Proyecto de graduación: Uso de la Vegetación para la Estabilización de Taludes. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- (19) Powledge, G. R., Raiston, D. C., Miller, P., Chen, Y. H., Clopper, P. E., Temple., D. M. (1989), "Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. I: Research activities". Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, St. Joseph, Michigan, EE.UU.115 (8)
- (20) Ree, W., Crow F., Huhhine W. (1977), "Annual grasses for Temporary Protection of Earth Spillways". American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph Michigan. EEUU 20(5) 934-939
- (21) Rocha, A. (1979). Hidráulica de Tuberías y Canales TOMO I. Primera edición. Lima-Perú.
- (22) Rocha, A. (1981). Hidráulica de Tuberías y Canales TOMO VI. Primera edición. Lima-Perú.
- (23) Simons, D; Şentürk, F. (1977) Sediment Transport Technology. First Edition. Water Resources Publications. Colorado, EEUU.
- (24) Suárez Díaz, Jaime (1998). Deslizamientos Y Estabilidad De Taludes En Zonas Tropicales. Primera Edición. Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga, Bucaramanga. Colombia
- (25) Suárez Díaz, Jaime (2002). Control De Erosión En Zonas Tropicales. Primera Edición. Bucaramanga, Bucaramanga. Colombia
- (26) Temple., D. M. (1984), "Erosionally Effective Soil Stress In Grass-Lined Open Channels". American Society of agricultural engineers, St. Joseph Michigan EEUU 1-9

- (27) Temple., D. M. (1987), "Discharge Coefficients for Vegetated Earth Embankments". Applied engineering in agriculture. ASAE, St. Joseph, Michigan, EE.UU. 4 (1), 53-55
- (28) Temple., D. M. (1987), "Vegetal Protection of Embankments and spillways". Proc. Of the 1987 Nat. Conf. On Hydraulic Engineering sponsored by the Hyd. Div. Of the American Society of Civil Engineers. Oklahoma. EEUU. 745-750
- (29) U.S. Army Corps of Engineers. (2000); Guidelines For Landscape Planting And Vegetation Management At Floodwalls, Levees, And Embankment Dams. Department of the Army. Washington, EE.UU.
- (30) Urrizalki, Iñaki, (2001), "Taller De Técnicas De Bioingeniería Aplicadas A La Restauración Fluvial", Espejo. Junio, 2001. Programa Life Guadajoz.
- (31) Yépez Tamayo, G.; Luque, O.; Rodríguez O.; Silva, O. (2001). "Varios temas sobre Vetiver". Boletín Vetiver. Red Latinoamericana del Vetiver, Maracay, Venezuela. 1 (9), 1-24.

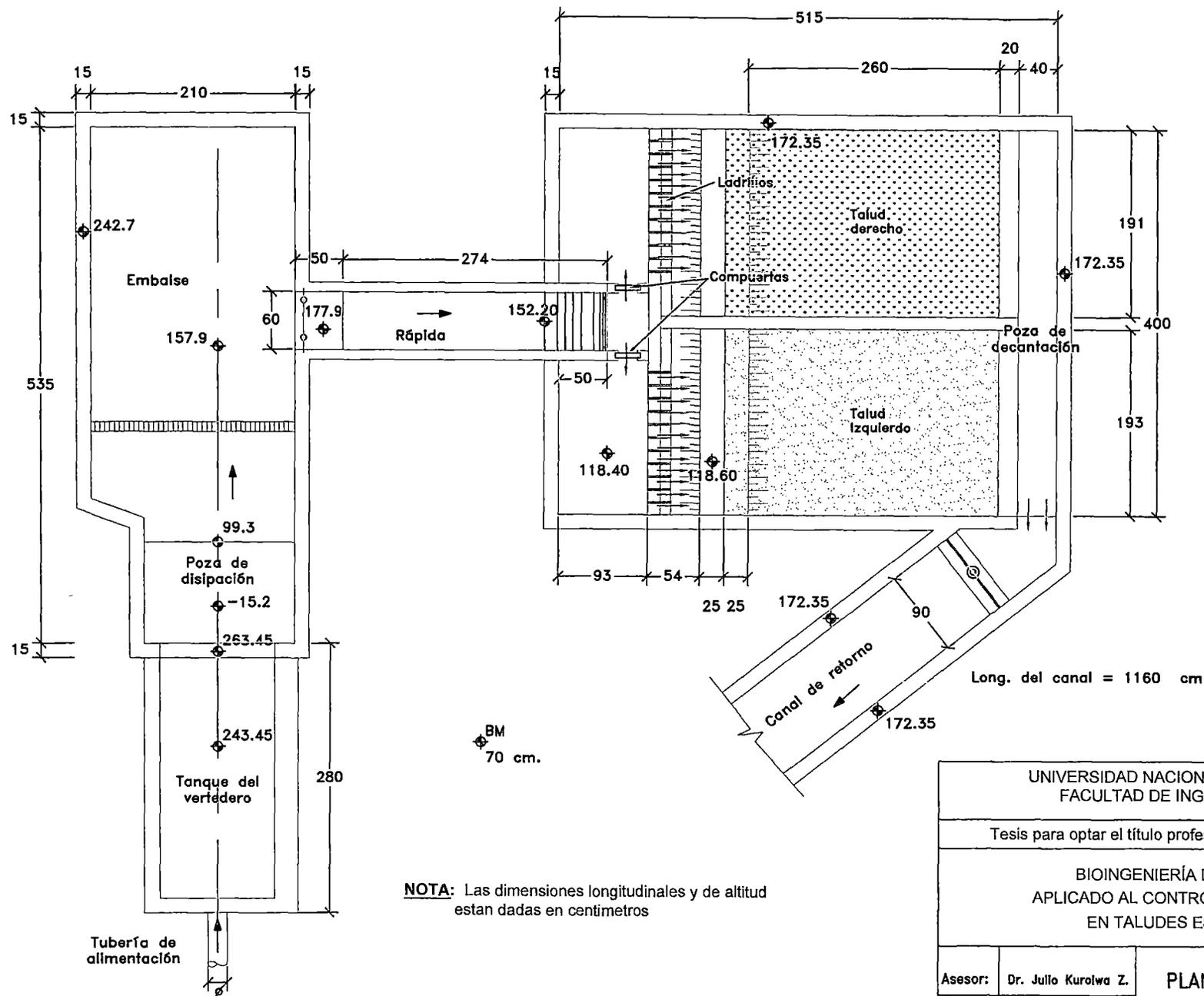
ANEXO A

LAMINAS DE LA ESTRUCTURA
HIDRÁULICA DE MEDICIÓN



NOTA: Las dimensiones longitudinales y de altitud están dadas en centímetros

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil		
BIOINGENIERÍA DE SUELOS APLICADO AL CONTROL DE EROSIÓN EN TALUDES ESTABLES		
Asesor:	Dr. Julio Kuroiwa Z.	PERFIL DE LA ESTRUCTURA DE MEDICIÓN
Tesista:	Bach. De La Cruz F.	
Fecha:	15-10-04	Escala: 1/45
		Lámina N° A-02



NOTA: Las dimensiones longitudinales y de altitud están dadas en centímetros

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL		
Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil		
BIOINGENIERÍA DE SUELOS APLICADO AL CONTROL DE EROSIÓN EN TALUDES ESTABLES		
Asesor:	Dr. Julio Kuroiwa Z.	PLANO DE CONSTRUCCION PLANTA DE LA ESTRUCTURA
Testista:	Bach. De La Cruz F.	
Fecha:	15-10-04	Escala: 1/60
		Lámina N° A-01

ANEXO B

DATOS RECOLECTADOS DE CAMPO

CUADRO B-1. Medidas de la carga de agua H, según los puntos de control señalados en la figura 4-3.

Prueba	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	H ₃ (cm)	H ₄ (cm)	H _{PROM} (cm)
1-1	--	--	--	--	--
1-2	--	--	--	--	--
1-3	1.3	1.4	1.5	--	1.4
1-4	1.9	2.0	1.9	2.0	2.0
2-1	--	--	--	--	--
2-2	2.2	2.0	2.1	2.3	2.2
2-3	3.0	3.0	3.0	2.9	3.0
2-4	5.3	5.2	5.3	5.3	5.3
2-5	6.3	6.4	--	6.3	6.3
2-6	8.5	8.6	8.5	8.4	8.5
3-1	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6
3-2	2.4	2.4	2.4	2.3	2.4
3-3	3.1	3.0	3.2	--	3.1
3-4	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
3-5	7.8	7.9	7.8	7.8	7.8
3-6	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4
4-1	--	--	--	--	--
4-2	2.2	2.2	2.3	2.2	2.2
4-3	2.9	2.9	3.0	2.9	2.9
4-4	5.5	5.6	5.6	5.6	5.6
4-5	7.2	7.3	7.2	7.2	7.2
4-6	10.1	--	10.0	10.1	10.1

CUADRO B-2. Ejemplo de toma de altura de pasto, antes de las pruebas 2-1, 3-1 y 4-1.

Nº	Altura de pasto h (cm)		
	FASE II	FASE III	FASE IV
1	12	16	23
2	21	15	9
3	18	10	13
4	24	16	15
5	30	6	16
6	18	15	18
7	15	20	19
8	26	26	23
9	25	21	28
10	25	24	29
11	12	24	32
12	21	23	33
13	15	21	11
14	23	16	12
15	21	22	13
16	26	24	7
17	20	23	19
18	15	23	21
19	11	30	22
20	17	16	23
21	20	16	28
22	23	22	19
23	23	19	16
24	30	25	15
25	16	30	13
26	15	29	18
27	21	27	17
28	29	25	20
29	20	24	28
30	23	22	26
31	22	29	31
32	24	30	25
33	21	28	20
34	16	29	16
35	17	24	22
36	15	15	25
37	19	9	28
38	20	9	28
39	18	13	35
40	17	15	21
41	14	10	20
42	5	22	26
43	7	19	34
44	13	20	25
45	15	33	28
46	18	23	22
47	21	19	26
48	20	27	28
49	16	15	29
50	15	20	23

Continuación:

Nº	Altura de pasto h (cm)		
	FASE II	FASE III	FASE IV
51	19	11	19
52	15	33	18
53	27	24	13
54	30	22	27
55	18	16	22
56	18	15	20
57	17	17	25
58	15	21	28
59	17	27	26
60	21	29	24
61	23	21	23
62	24	19	26
63	18	18	28
64	14	18	29
65	13	13	28
66	8	12	29
67	22	11	26
68	17	11	27
69	15	9	24
70	20	10	25
71	23	12	27
72	21	11	29
73	19	16	30
74	18	15	26
75	21	14	30
76	23	12	23
77	24	12	23
78	23	13	26
79	24	25	21
80	21	21	18
81	22	23	19
82	19	22	20
83	20	24	19
84	22	29	12
85	24	31	13
86	25	10	14
87	21	7	16
88	25	6	23
89	20	6	24
90	16	6	22
91	22	7	18
92	13	8	22
93	20	6	19
94	21	5	17
95	22	2	19
96	21	6	21
97	20	7	19
98	19	12	23
99	24	5	12
100	23	10	16

CUADRO B-3 Datos de densidad de siembra. Se tomaban cuatro muestras y luego se sacaba el promedio. SE hizo este procedimiento dos veces por cada fase, antes de las pruebas 2-1, 3-1, 4-1 y antes de 3-4 y 4-4.

Nº	Densidad de tallos en 30x35cm ²		
	FASE II	FASE III	FASE IV
1	273	481	291
2	300	406	299
3	312	425	320
4	297	412	317
5	--	425	315
6	--	441	324
7	--	402	315
8	--	411	299

CUADRO B-4 Proceso de datos para cálculo del coeficiente de manning del pasto.

Prueba	q (m ² /s)	h (m)	M (und/m ²)	C _i	q / 0.093	$\frac{0.0025}{C_i^{2.5}}$	n
1-1	0.0005	--	--	--	--	--	0.0550
1-2	0.0010	--	--	--	--	--	0.0550
1-3	0.0016	--	--	--	--	--	0.0550
1-4	0.0031	--	--	--	--	--	0.0550
2-1	0.0010	0.196	2814.3	5.4519	0.0111	0.1735	0.2445
2-2	0.0021	0.196	2814.3	5.4519	0.0225	0.1735	0.2445
2-3	0.0032	0.196	2814.3	5.4519	0.0342	0.1735	0.2445
2-4	0.0060	0.196	2814.3	5.4519	0.0646	0.1735	0.2445
2-5	0.0084	0.196	2814.3	5.4519	0.0900	0.1735	0.2445
2-6	0.0206	0.196	2814.3	5.4519	0.2219	0.1735	0.2032
3-1	0.0013	0.218	4104.8	6.0251	0.0140	0.2228	0.2650
3-2	0.0021	0.218	4104.8	6.0251	0.0223	0.2228	0.2650
3-3	0.0031	0.218	4104.8	6.0251	0.0329	0.2228	0.2650
3-4	0.0079	0.218	4104.8	6.0251	0.0847	0.2228	0.2650
3-5	0.0162	0.218	4104.8	6.0251	0.1747	0.2228	0.2650
3-6	0.0274	0.218	4104.8	6.0251	0.2944	0.2228	0.2127
4-1	0.0012	0.208	2921.4	5.6021	0.0134	0.1857	0.2500
4-2	0.0021	0.208	2921.4	5.6021	0.0222	0.1857	0.2500
4-3	0.0031	0.208	2921.4	5.6021	0.0334	0.1857	0.2500
4-4	0.0078	0.208	2921.4	5.6021	0.0836	0.1857	0.2500
4-5	0.0155	0.208	2921.4	5.6021	0.1671	0.1857	0.2500
4-6	0.0259	0.208	2921.4	5.6021	0.2786	0.1857	0.1843

ANEXO C

ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS

Análisis hidrométrico o granulométrico por sedimentación

El análisis hidrométrico se basa en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua. Cuando en espécimen de suelo se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad, se supone que todas las partículas de suelo son esferas y que la velocidad de las partículas se expresan por la *Ley de Stokes*, según la cual:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2 \dots\dots\dots(C-1)$$

Donde:

v : Velocidad

ρ_s : Densidad de las partículas de suelo

ρ_w : Densidad del agua.

η : Viscosidad del agua.

D : Diámetro de las partículas de suelo.

De la ecuación (C-1):

$$D = \sqrt{\frac{30\eta}{(G_s - 1)\rho_w}} \sqrt{\frac{L}{t}} \dots\dots\dots(C-2)$$

G_s : Densidad específica de los sólidos

L : Longitud recorrida por la partícula

t : Tiempo de duración del movimiento de la partícula.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S05-177

SOLICITADO : Bach. Luis Alberto De La Cruz Fallaque
PROYECTO : TESIS: "Bioingeniería de Suelos en Control de Erosión"
UBICACIÓN : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 13, Abril del 2005

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Muestra : Unica
Prof.(m) : ***

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.03473	29.62
0.02525	27.97
0.01687	24.47
0.01235	21.83
0.01033	20.06
0.00750	17.91
0.00545	15.58
0.00282	11.67
0.00123	6.62

RESULTADOS :
Limos (%) : 51.0
Arcillas y Coloides (%) : 11.7

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Realizado por : Tec. Julio Chavez U.
Revisado por : Ing. A. Quiñones V.


ANTIOCHO QUIÑONES VILLANUEVA
 ING. RESPONSABLE DE AREA
 Lab. de Mecánica de Suelos UNI





INFORME N° S05-177

Solicitado : Bach. Luis Alberto De La Cruz Fallaque
Proyecto : TESIS: "Bioingeniería de Suelos en Control de Erosión"
Ubicación : Laboratorio Nacional de Hidráulica
Fecha : 13, Abril del 2005

ANALISIS GRANULOMETRICO POR SEDIMENTACION
ASTM D422

Muestra : Unica
Prof. (m) : ***

Table with 12 columns: Tiempo (min), °C, Ct, Rd, Rc, P(%), R, L (cm), L/tiempo (cm/min), Constante K, Diámetro (mm), Material Sedimento. Rows include data for 1.00, 2.00, 5.00, 10.00, 15.00, 30.00, 60.00, 240.00, and 1440.00 minutes.

Hora de Inicio : 13:03:00 ; Peso especifico relativo de sólidos (Ss) : 2.746
Peso Suelo Seco (gr) : 100.1 % que pasa la malla N° 200 : 62.7
% que pasa la malla N° 10 : 98.8 Lectura Hidrómetro en agua (Cm) : 0.5
Coeficiente "a" : 0.9793 Lectura Hidrómetro en agua + defloculante (Cd) : 5.0

Signature of Antiocho T. Quiñanes Villanueva
ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

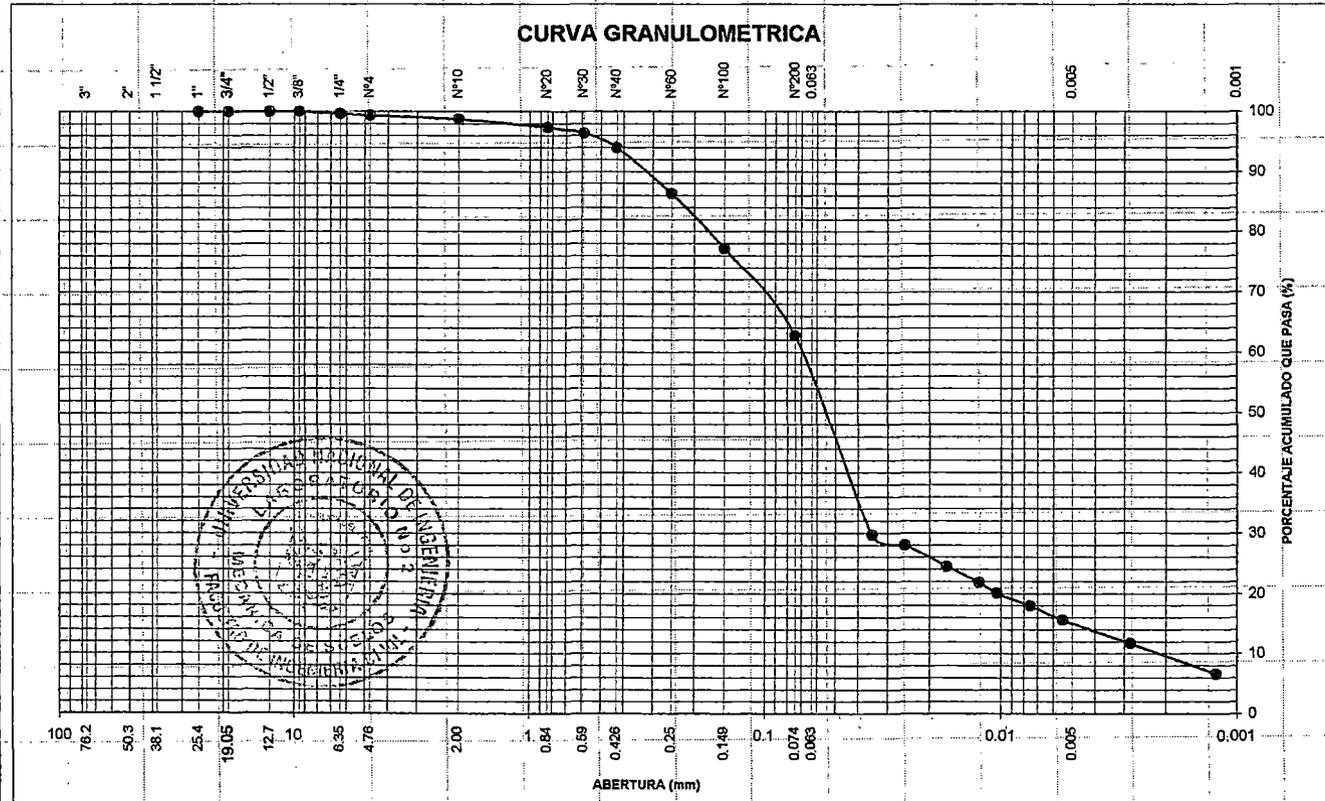
ANALISIS GRANULOMETRICO POR SEDIMENTACION

ASTM D-422

INFORME N° S05-177

Solicitado : Bach. Luis Alberto De La Cruz Fallaque
 Proyecto : TESIS: "Bioingeniería de Suelos en Control de Erosión"
 Ubicación : Laboratorio Nacional de Hidráulica
 Fecha : 13, Abril del 2005
 Muestra : Unica Prof. (m) : ***

Tamiz	Abertura (mm.)	% que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	100.0
3/4"	19.050	100.0
1/2"	12.700	100.0
3/8"	9.525	100.0
1/4"	6.350	99.7
N°4	4.760	99.4
N°10	2.000	98.8
N°20	0.840	97.4
N°30	0.590	96.4
N°40	0.426	93.9
N°60	0.250	86.3
N°100	0.149	77.1
N°200	0.074	62.7
	0.0347	29.62
	0.0253	27.97
	0.0169	24.47
	0.0124	21.83
	0.0103	20.06
	0.0075	17.91
	0.0055	15.58
	0.0028	11.67
	0.0012	6.62



ANEXO D

SALIDAS DEL HECCRAS

CUADRO D-1 Resultados para las pruebas 1-3 y 1-4.

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: 11 Reach: 11

Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Hydr Depth (m)	E.G. Slope (m/m)
0.0028	99.8007	100.01	99.8	100.01	0.21	0
0.0057	99.8007	100.02	99.81	100.02	0.216	0
0.0028	99.8007	100.01		100.01	0.21	0
0.0057	99.8007	100.02		100.02	0.216	0
0.0028	99.9988	100.01		100.01	0.011	0.001631
0.0057	99.9988	100.01		100.02	0.016	0.001699
0.0028	99.9988	100	100	100.01	0.006	0.166564
0.0057	99.9988	100.01	100.01	100.01	0.009	0.202065
0.0028	99.9317	99.94	99.94	99.94	0.004	0.80043
0.0057	99.9317	99.94	99.94	99.96	0.004	2.301973
0.0028	99.7763	99.78	99.78	99.79	0.004	0.511673
0.0057	99.7763	99.78	99.79	99.79	0.008	0.264485
0.0028	99.6178	99.62	99.62	99.63	0.003	1.08306
0.0057	99.6178	99.62	99.63	99.64	0.005	1.583059
0.0028	99.4623	99.47	99.47	99.47	0.004	0.714438
0.0057	99.4623	99.47	99.47	99.48	0.008	0.312796
0.0028	99.3069	99.31	99.31	99.32	0.004	0.542364
0.0057	99.3069	99.32	99.32	99.32	0.008	0.235791
0.0028	99.1514	99.16	99.16	99.16	0.005	0.340568
0.0057	99.1514	99.16	99.16	99.17	0.007	0.342731
0.0028	98.996	99	99	99.01	0.005	0.412051
0.0057	98.996	99	99	99.01	0.008	0.239375
0.0028	98.9167	98.92	98.92	98.93	0.004	0.6303
0.0057	98.9167	98.92	98.93	98.93	0.007	0.437743

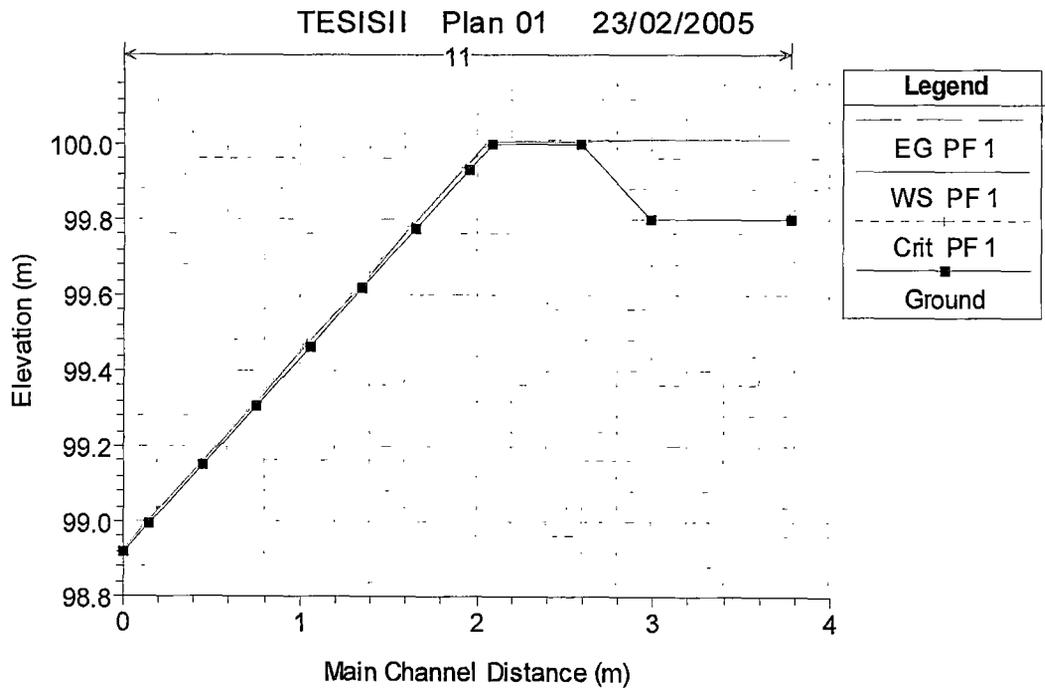


Figura D-1. Perfil de flujo para la prueba 1-3

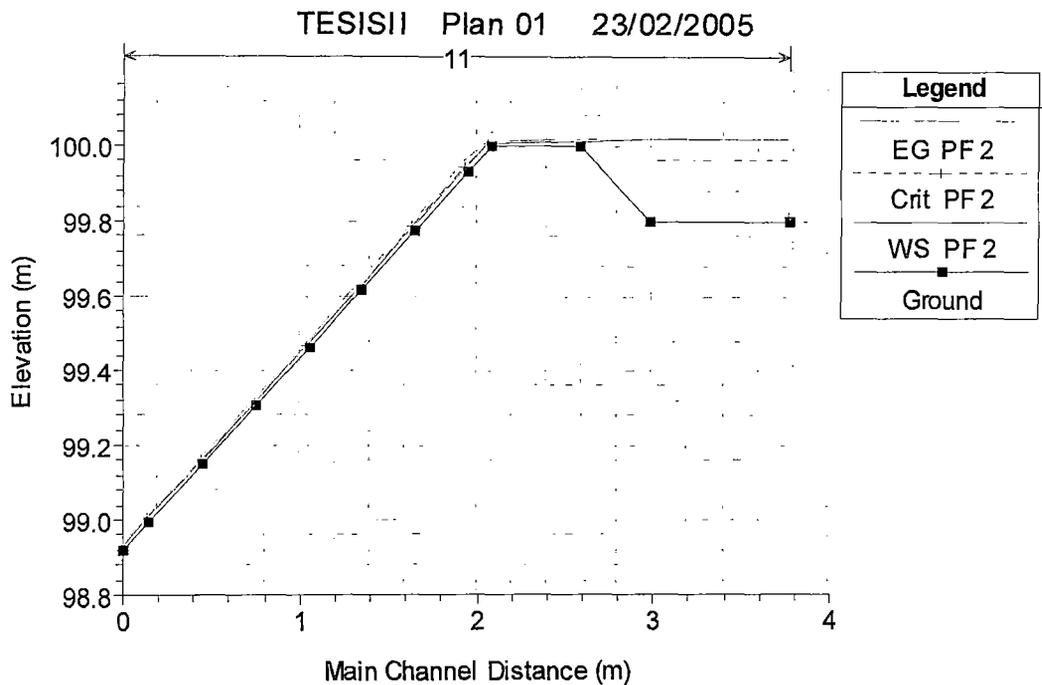


Figura D-2. Perfil de flujo para la prueba 1-4.

CUADRO D-2 Resultados para las pruebas 2-3, 2-4 y 2-5.

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: 21 Reach: 21

Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Hydr Depth (m)
0.0057	99.8007	100.02	99.81	100.02	0	0.2175
0.0113	99.8007	100.03	99.81	100.03	0.000001	0.2268
0.017	99.8007	100.04	99.82	100.04	0.000003	0.2344
0.0057	99.8007	100.02		100.02	0	0.2175
0.0113	99.8007	100.03		100.03	0.000001	0.2268
0.017	99.8007	100.04		100.04	0.000003	0.2344
0.0057	99.9988	100.02		100.02	0.00115	0.0179
0.0113	99.9988	100.02		100.03	0.00138	0.0258
0.017	99.9988	100.03		100.03	0.00151	0.0321
0.0057	99.9988	100.01		100.02	0.610859	0.0152
0.0113	99.9988	100.02		100.02	0.694152	0.0222
0.017	99.9988	100.03		100.03	0.723408	0.028
0.0057	99.8921	99.91	99.9	99.91	0.797606	0.014
0.0113	99.8921	99.92		99.92	0.466408	0.025
0.017	99.8921	99.93		99.93	0.381696	0.034
0.0057	99.7397	99.76		99.76	0.351453	0.0179
0.0113	99.7397	99.76		99.77	0.57113	0.0235
0.017	99.7397	99.76	99.76	99.77	1.020328	0.0252
0.0057	99.5843	99.6	99.59	99.6	0.706544	0.0145
0.0113	99.5843	99.61		99.61	0.503112	0.0244
0.017	99.5843	99.62		99.62	0.305541	0.0364
0.0057	99.4288	99.44	99.44	99.45	0.632462	0.015
0.0113	99.4288	99.45	99.44	99.46	0.619102	0.0229
0.017	99.4288	99.45	99.45	99.46	1.313993	0.0234
0.0057	99.2764	99.3		99.3	0.304636	0.0187
0.0113	99.2764	99.3		99.31	0.31976	0.028
0.017	99.2764	99.32		99.32	0.242142	0.039
0.0057	99.121	99.13	99.13	99.14	1.655224	0.0112
0.0113	99.121	99.14	99.14	99.14	1.79828	0.0166
0.017	99.121	99.14	99.14	99.15	1.500667	0.0224
0.0057	98.9655	98.99	98.97	98.99	0.153334	0.023
0.0113	98.9655	99		99	0.220084	0.0314
0.017	98.9655	99	98.99	99.01	0.2567	0.0384
0.0057	98.8893	98.9	98.9	98.9	3.341266	0.0091
0.0113	98.8893	98.9	98.9	98.91	2.418755	0.0152
0.017	98.8893	98.91	98.91	98.92	2.950019	0.0183

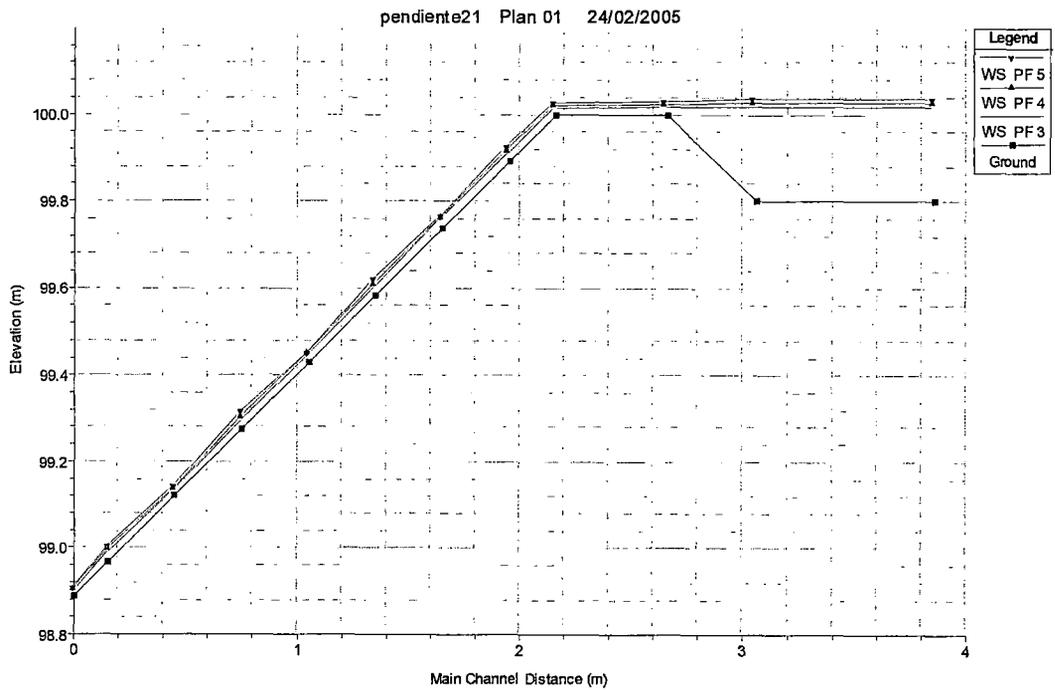


Figura D-2. Perfiles de flujo para las pruebas 2-3, 2-4 y 2-5.

CUADRO D-3 Resultados para la prueba 2-6.

Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Hydr Depth (m)	Vel Chnl (m/s)
0.0396	99.8007	100.06	99.84	100.06	0.000011	0.2569	0.08
0.0396	99.8007	100.06		100.06	0.000011	0.2569	0.08
0.0396	99.9988	100.05		100.06	0.001989	0.0495	0.4153
0.0396	99.9988	100.04		100.05	0.641585	0.0434	0.473
0.0396	99.8921	99.94		99.95	0.43333	0.049	0.4196
0.0396	99.7397	99.78		99.79	0.646106	0.0433	0.474
0.0396	99.5843	99.63		99.64	0.429851	0.0491	0.4185
0.0396	99.4288	99.47		99.48	0.795177	0.0407	0.505
0.0396	99.2764	99.33		99.34	0.345104	0.0525	0.3913
0.0396	99.121	99.16		99.17	0.830133	0.0402	0.5117
0.0396	98.9655	99.02		99.03	0.33724	0.0529	0.3886
0.0396	98.8893	98.92	98.92	98.94	1.40354	0.0342	0.6004

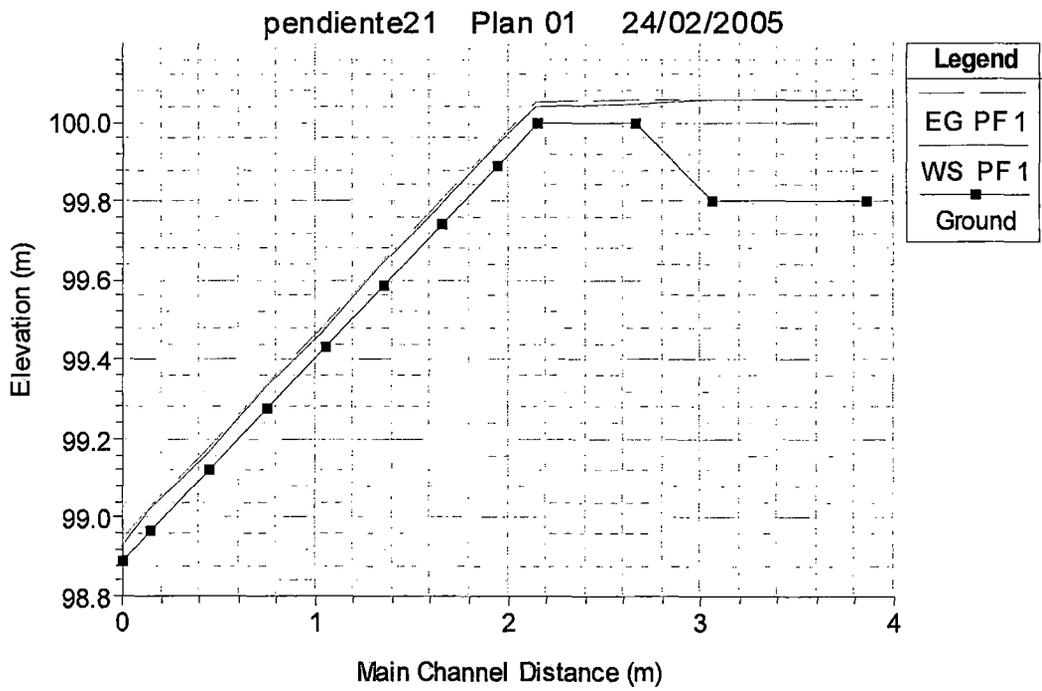


Figura D-3. Perfiles de flujo para la prueba 2-6.

CUADRO D-4 Resultados para la pruebas 3-3, 3-4 y 3-5.

Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Hydr Depth (m)	Vel Chnl (m/s)
99.8007	100.02	99.81	100.02	0	0.2191	0.0134
99.8007	100.03	99.82	100.03	0.000002	0.2315	0.0317
99.8007	100.05	99.83	100.05	0.000007	0.2526	0.0639
99.8007	100.02		100.02	0	0.2191	0.0134
99.8007	100.03		100.03	0.000002	0.2315	0.0317
99.8007	100.05		100.05	0.000007	0.2526	0.0639
99.9988	100.02		100.02	0.000834	0.0197	0.1486
99.9988	100.03		100.03	0.001301	0.0301	0.2441
99.9988	100.05		100.05	0.001314	0.0485	0.3331
99.9988	100.02		100.02	0.444907	0.0175	0.1677
99.9988	100.03		100.03	0.68341	0.0268	0.2741
99.9988	100.04		100.05	0.576286	0.0456	0.3544
99.9043	99.92	99.91	99.92	1.364134	0.0125	0.2351
99.9043	99.93		99.94	0.451871	0.0304	0.2418
99.9043	99.95		99.96	0.458672	0.0489	0.3305
99.7458	99.77		99.77	0.316021	0.0194	0.1512
99.7458	99.77		99.78	0.694488	0.0266	0.2755
99.7458	99.79		99.8	0.6666	0.0436	0.3705
99.5873	99.6		99.61	0.572474	0.0162	0.1809
99.5873	99.62		99.62	0.493418	0.0296	0.2483
99.5873	99.64		99.64	0.416829	0.0503	0.3209
99.4319	99.45	99.44	99.45	0.906627	0.0141	0.2079
99.4319	99.46		99.46	0.743837	0.0261	0.2813
99.4319	99.47		99.48	0.740531	0.0422	0.3825
99.2734	99.29		99.29	0.387	0.0183	0.1608
99.2734	99.3		99.31	0.445994	0.0305	0.2408
99.2734	99.32		99.33	0.393779	0.0512	0.3154
99.1149	99.13	99.13	99.13	1.038645	0.0136	0.2166
99.1149	99.14	99.13	99.15	0.731723	0.0262	0.2799
99.1149	99.16		99.16	0.851391	0.0404	0.3992
98.9594	98.98		98.98	0.224961	0.0215	0.1364
98.9594	98.99		99	0.311379	0.034	0.2159
98.9594	99.01		99.02	0.305015	0.0554	0.2917
98.8802	98.89	98.89	98.89	4.103788	0.009	0.3277
98.8802	98.9	98.9	98.91	2.95362	0.0172	0.4269
98.8802	98.91	98.91	98.92	2.356241	0.0297	0.5441

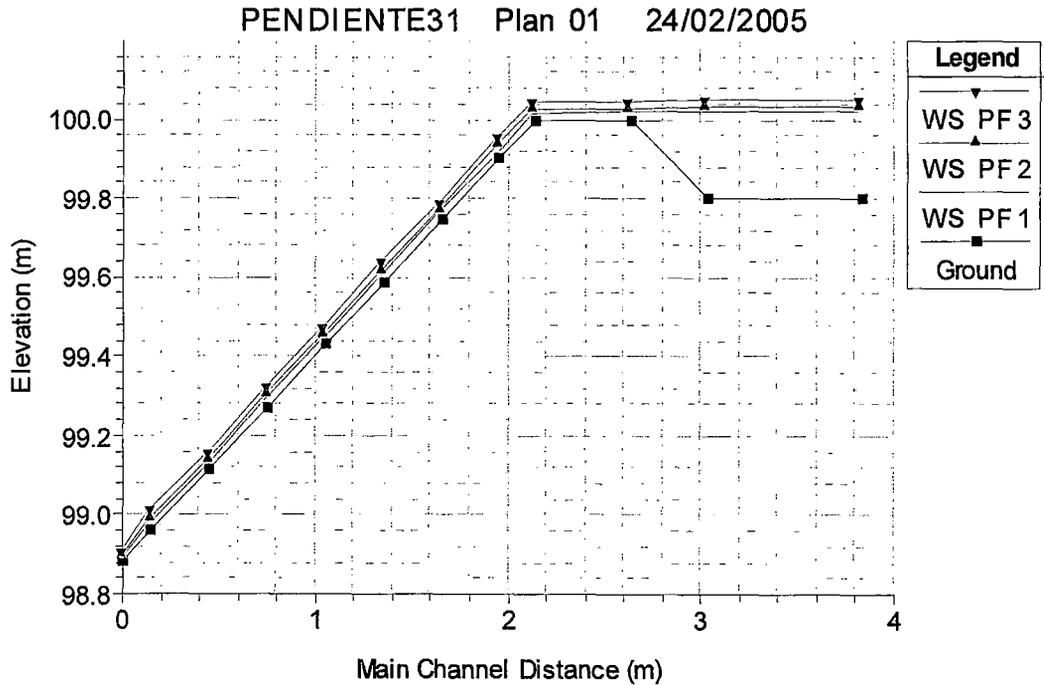


Figura D-4. Perfiles de flujo para las pruebas 3-3, 3-4 y 3-5.

CUADRO D-5 Resultados para la prueba 3-6.

Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Hydr Depth (m)	Vel Chnl (m/s)
99.8007	100.07	99.84	100.07	0.000015	0.2673	0.0988
99.8007	100.07		100.07	0.000015	0.2673	0.0988
99.9988	100.06		100.07	0.001951	0.0581	0.455
99.9988	100.05		100.06	0.627603	0.0524	0.5037
99.9043	99.96		99.97	0.412612	0.0596	0.4429
99.7458	99.8		99.81	0.647258	0.052	0.5085
99.5873	99.65		99.66	0.432493	0.0588	0.4494
99.4319	99.48		99.5	0.695255	0.0508	0.5198
99.2734	99.33		99.34	0.455079	0.0579	0.4565
99.1149	99.17		99.18	0.658355	0.0517	0.5112
98.9594	99.02		99.03	0.392734	0.0606	0.4363
98.8802	98.93	98.93	98.94	0.984225	0.0457	0.5781

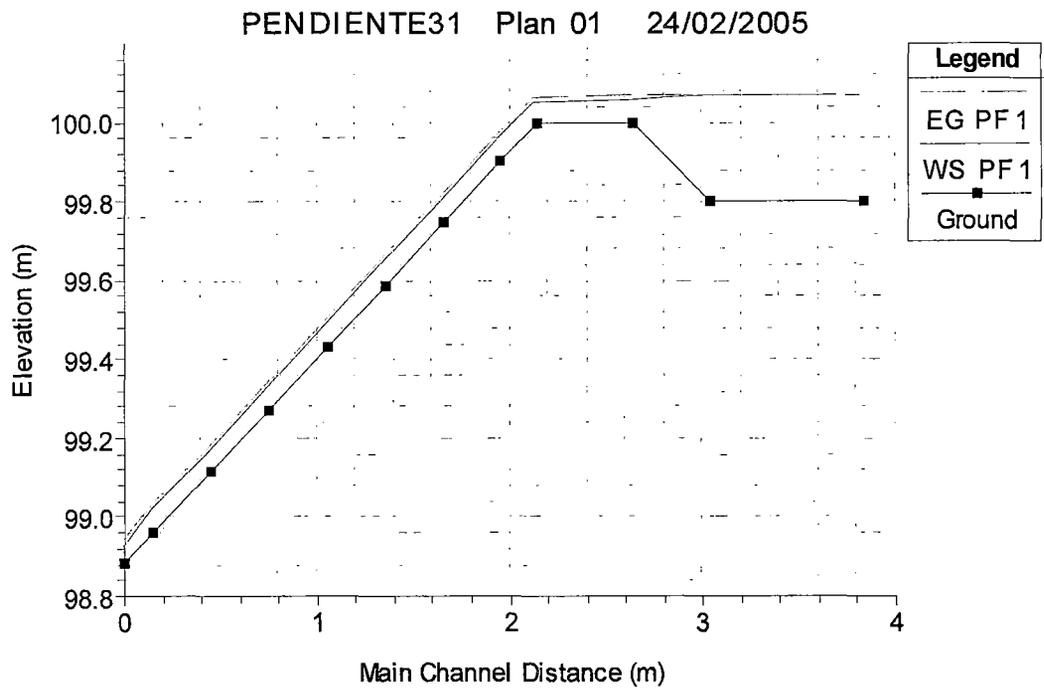


Figura D-5. Perfiles de flujo para la prueba 3-6

CUADRO D-6 Resultados para las pruebas 4-3, 4-4 y 4-5.

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: 41 Reach: 41

Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Hydr Depth (m)	Vel Chnl (m/s)
0.0057	99.8007	100.02	99.81	100.02	0	0.2167	0.0135
0.0142	99.8007	100.03	99.82	100.03	0.000002	0.2312	0.0317
0.0311	99.8007	100.05	99.83	100.05	0.000007	0.2492	0.0648
0.0057	99.8007	100.02		100.02	0	0.2167	0.0135
0.0142	99.8007	100.03		100.03	0.000002	0.2312	0.0317
0.0311	99.8007	100.05		100.05	0.000007	0.2491	0.0648
0.0057	99.9988	100.02		100.02	0.001408	0.0169	0.1742
0.0142	99.9988	100.03		100.03	0.001357	0.0297	0.2472
0.0311	99.9988	100.04		100.05	0.001864	0.0436	0.3707
0.0057	99.9988	100.01	100.01	100.01	0.983524	0.0133	0.2207
0.0142	99.9988	100.02		100.03	0.653522	0.0262	0.2802
0.0311	99.9988	100.04		100.05	0.941187	0.0379	0.4264
0.0057	99.8921	99.91		99.91	0.300819	0.019	0.1543
0.0142	99.8921	99.92		99.93	0.411641	0.0301	0.2435
0.0311	99.8921	99.95		99.95	0.2606	0.0561	0.288
0.0057	99.7367	99.75	99.75	99.75	1.380549	0.012	0.2444
0.0142	99.7367	99.76	99.75	99.76	1.101565	0.0224	0.3282
0.0311	99.7367	99.77	99.77	99.78	1.888696	0.0306	0.5271
0.0057	99.5812	99.6		99.6	0.30924	0.0189	0.1556
0.0142	99.5812	99.61		99.62	0.295326	0.0333	0.2201
0.0311	99.5812	99.64		99.64	0.208715	0.06	0.269
0.0057	99.4258	99.44	99.43	99.44	2.558277	0.01	0.2944
0.0142	99.4258	99.45	99.45	99.45	1.791704	0.0193	0.3802
0.0311	99.4258	99.45	99.45	99.47	2.7782	0.0272	0.5926
0.0057	99.2703	99.29	99.28	99.29	0.20194	0.0215	0.1368
0.0142	99.2703	99.31	99.29	99.31	0.135779	0.0422	0.1737
0.0311	99.2703	99.34	99.3	99.34	0.117603	0.0716	0.2255
0.0057	99.1149	99.17	99.17	99.18	2.423281	0.0276	0.5181
0.0142	99.1149	99.19	99.19	99.21	2.144437	0.0398	0.6222
0.0311	99.1149	99.22	99.22	99.25	1.937992	0.0545	0.7296
0.0057	98.9594	98.98	98.97	98.98	0.30425	0.019	0.1548
0.0142	98.9594	98.99	98.98	99	0.246827	0.0352	0.2084
0.0311	98.9594	99.01	98.99	99.02	0.29973	0.0537	0.3006
0.0057	98.8802	98.89	98.89	98.89	3.652357	0.009	0.3277
0.0142	98.8802	98.9	98.9	98.91	2.628711	0.0172	0.4269
0.0311	98.8802	98.91	98.91	98.92	2.097046	0.0297	0.5441

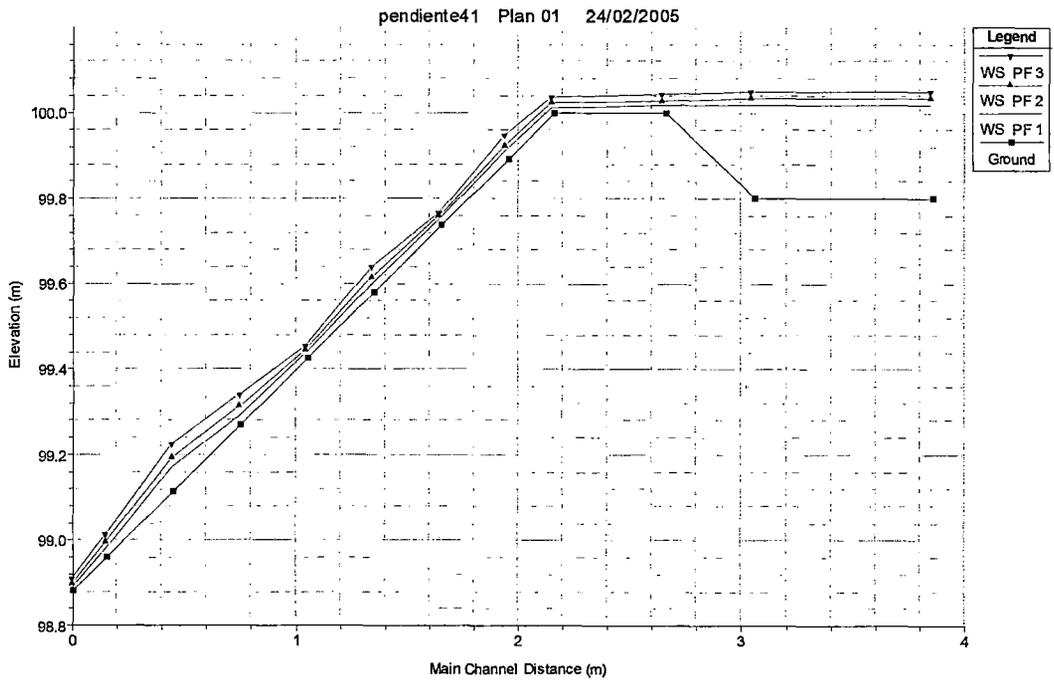


Figura D-6. Perfiles de flujo para las pruebas 4-3,4-4 y 4-5.

CUADRO D-7 Resultados para la prueba 4-6.

HEC-RAS Plan: Plan 01 River: 41 Reach: 41							
Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Hydr Depth (m)	Vel Chnl (m/s)
0.051	99.8007	100.07	99.84	100.07	0.000016	0.2661	0.0993
0.051	99.8007	100.07		100.07	0.000016	0.266	0.0993
0.051	99.9988	100.05		100.07	0.0022	0.056	0.4721
0.051	99.9988	100.04		100.06	0.735017	0.0458	0.5771
0.051	99.8921	99.95		99.96	0.386714	0.0557	0.4741
0.051	99.7367	99.78		99.8	0.801249	0.0446	0.5926
0.051	99.5812	99.64		99.65	0.344726	0.0577	0.4577
0.051	99.4258	99.47	99.47	99.49	1.107681	0.0404	0.6541
0.051	99.2703	99.35	99.31	99.36	0.106217	0.083	0.3184
0.051	99.1149	99.25	99.25	99.28	1.022194	0.0659	0.816
0.051	98.9594	99.01	99	99.03	0.411494	0.0547	0.4833
0.051	98.8802	98.93	98.93	98.94	0.738941	0.0457	0.5781

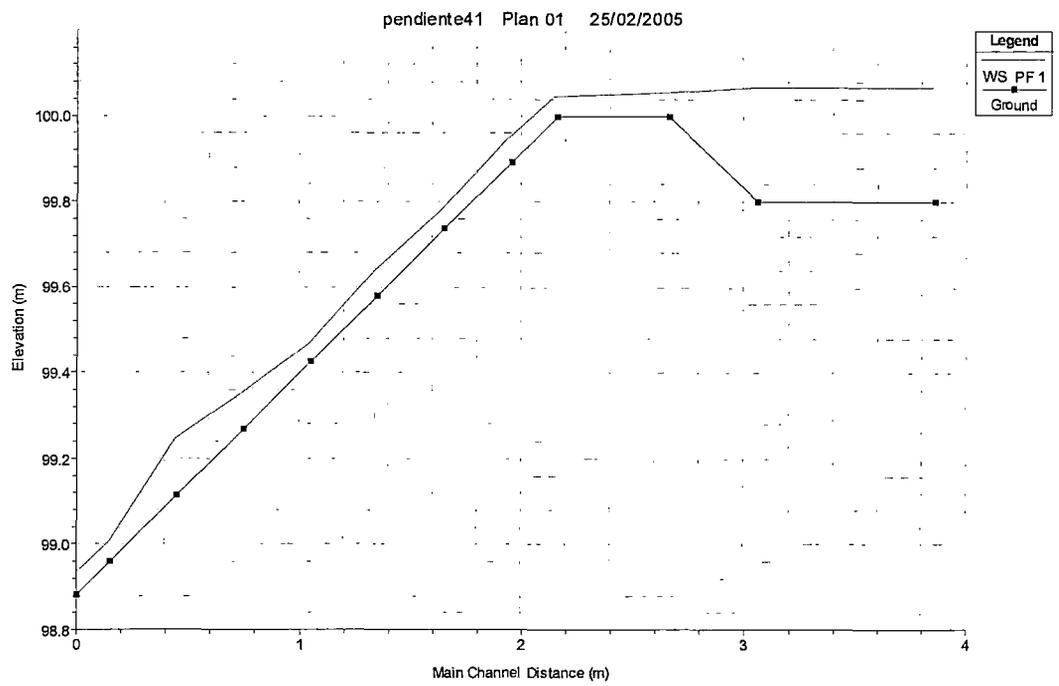


Figura D-7. Perfiles de flujo para la prueba 4-6.

ANEXO E

PANEL FOTOGRAFICO



FOTO E-1. Fase de construcción: Construcción de la poza disipadora.

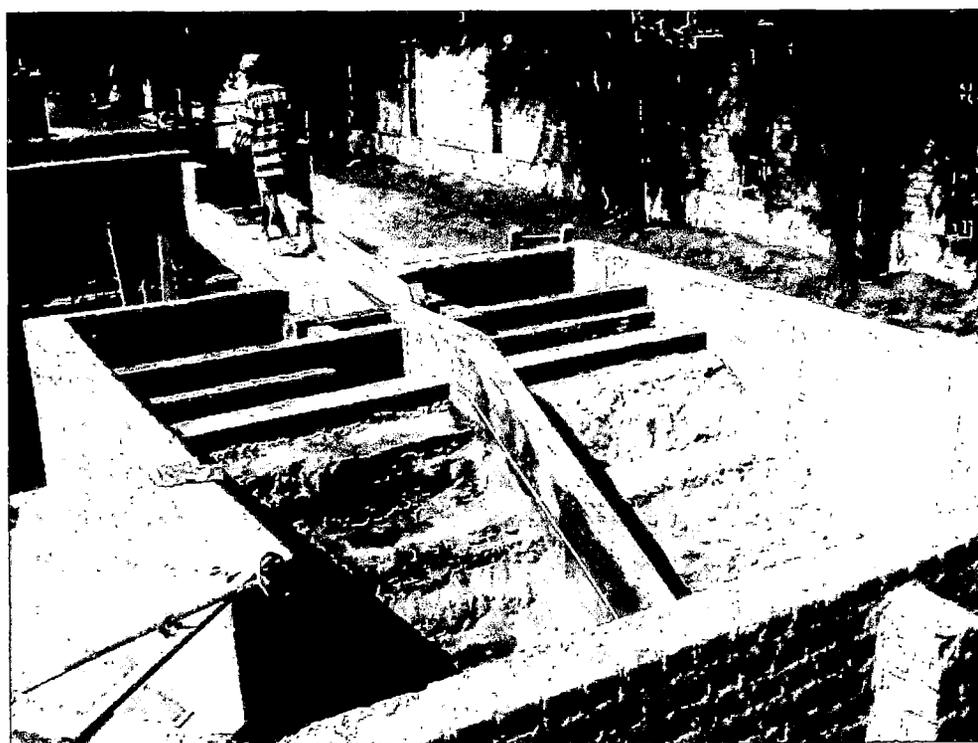


FOTO E-2. Fase de construcción: Término de los trabajos de albañilería.



FOTO E-3. Vista de los taludes nivelados con tierra orgánica. En un principio se pensó que era mejor regar el talud con geotextil, esta idea no tuvo éxito.

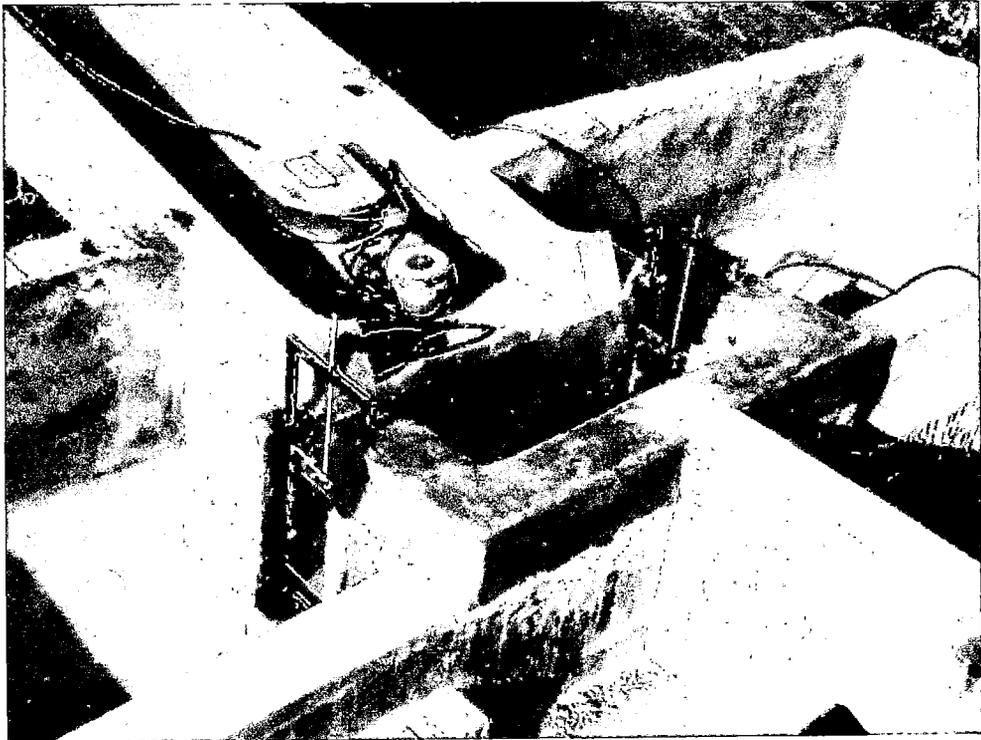


FOTO E-4. Fase de construcción: Instalación de las compuertas.



FOTO E-5. Fase de construcción: Construcción de los muros desarenadores y colocación de retenedores de sedimentos en el canal de retorno. Los retenedores fueron descartados.

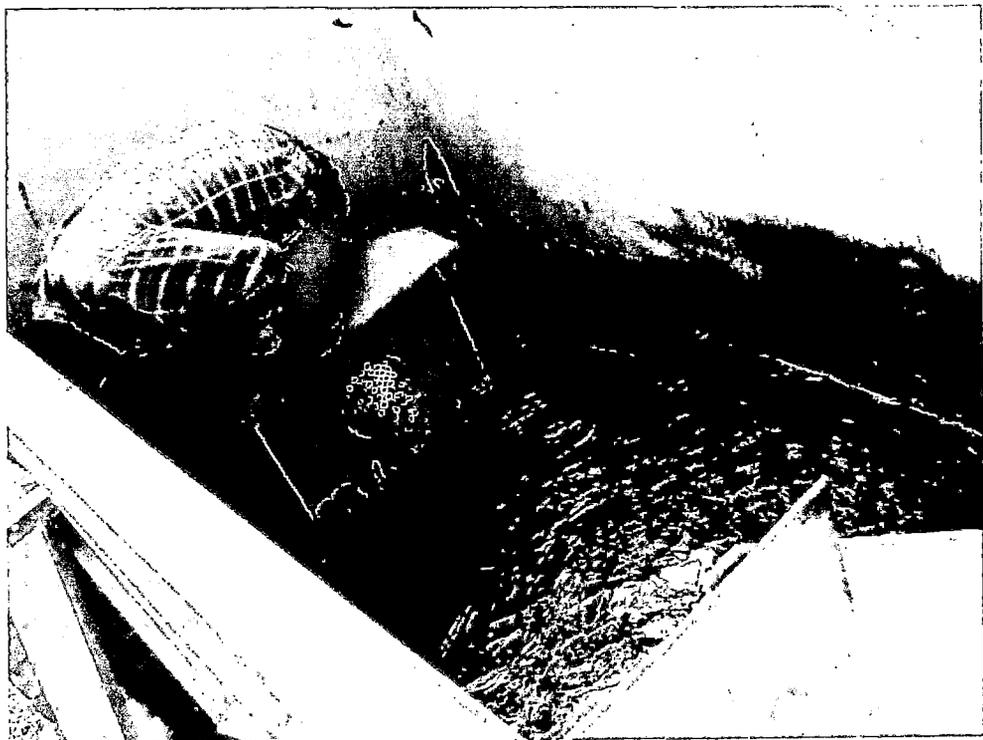


FOTO E-6. Fase de mantenimiento: vaciado de breca en el vertedero, el mismo trabajo se realizó en la poza disipadora.

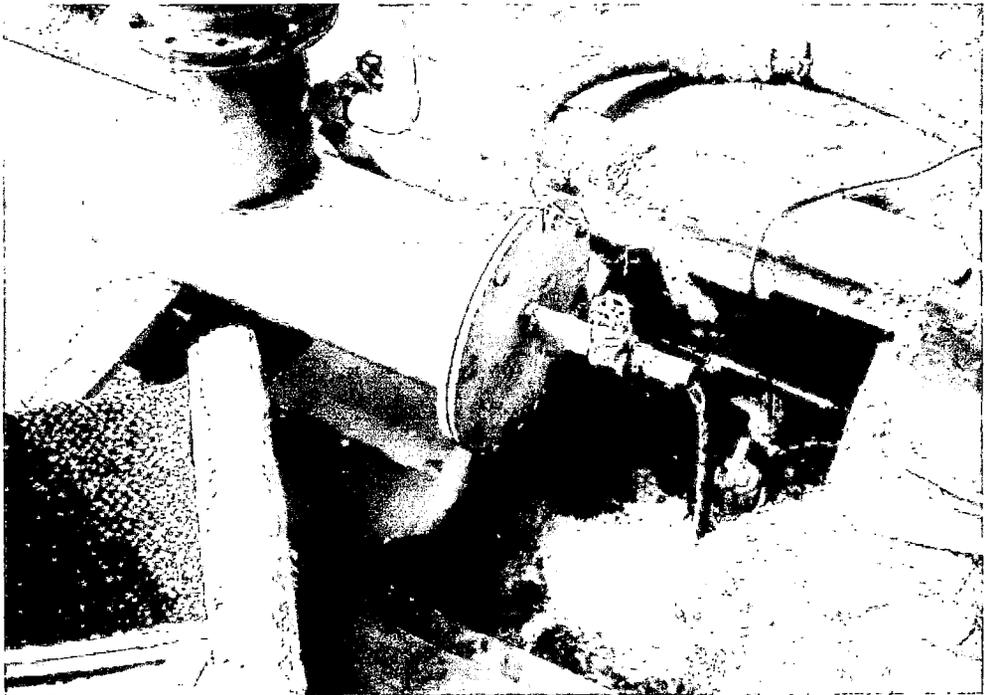


FOTO E-7. Fase de calibración: Funcionamiento de la bomba para caudales menores a 7l/s.

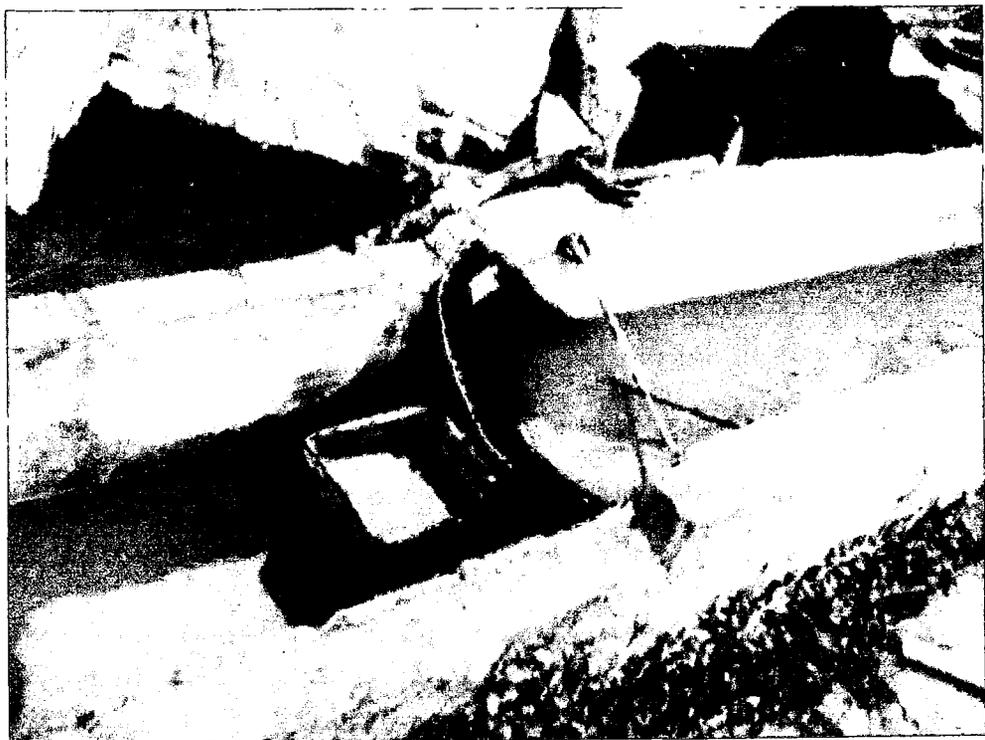


FOTO E-8. Fase de calibración: Funcionamiento de los nuevos retenedores. Estos consistieron en geotextiles clavados a las paredes, este sistema si funcionó.

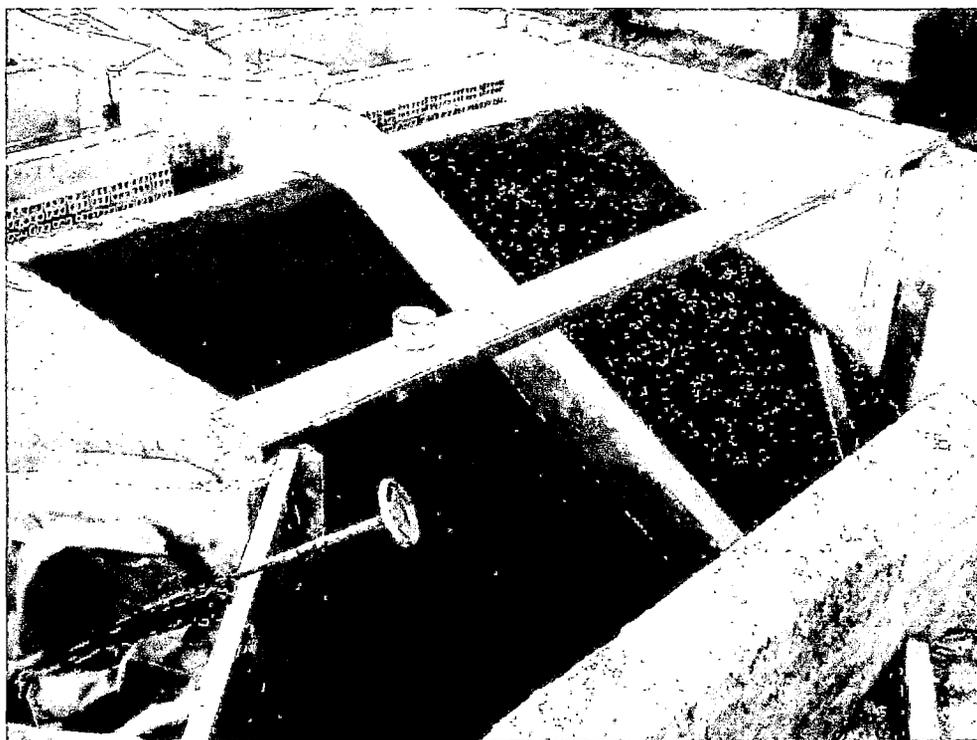


FOTO E-9. Fase de pruebas: Antes de la prueba 1-1.



FOTO E-10. Fase de pruebas: Luego de la prueba 1-1, $Q = 1\text{l/s}$.

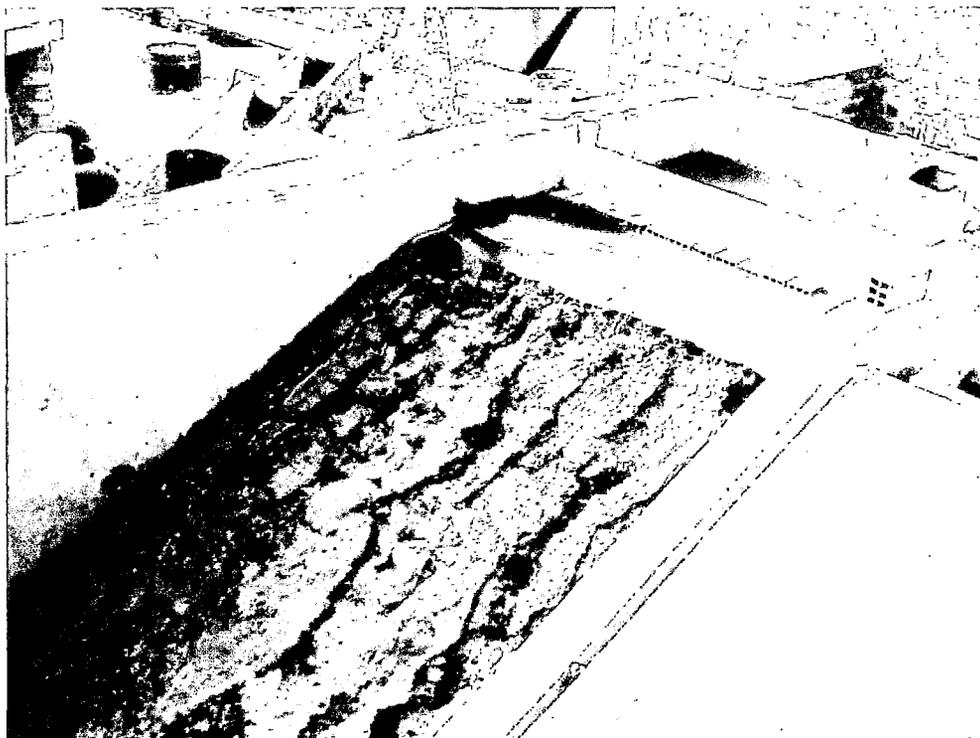


FOTO E-11. Fase de pruebas: Luego de la prueba 1-2. $Q = 2\text{l/s}$.



FOTO E-12. Fase de pruebas: Luego de la prueba 1-4. $Q = 6\text{l/s}$.



FOTO E-13. Fase de pruebas: Durante la prueba 2-1. $Q = 2\text{l/s}$.

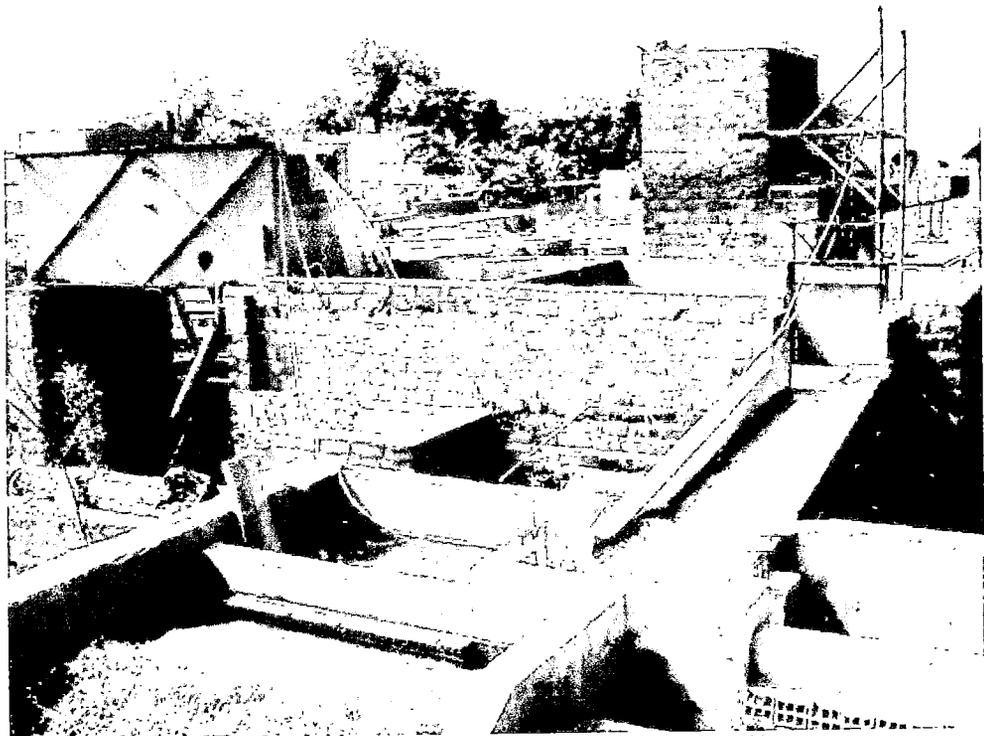


FOTO E-14. Fase de pruebas: Durante la prueba 2-2, $Q = 4\text{l/s}$.

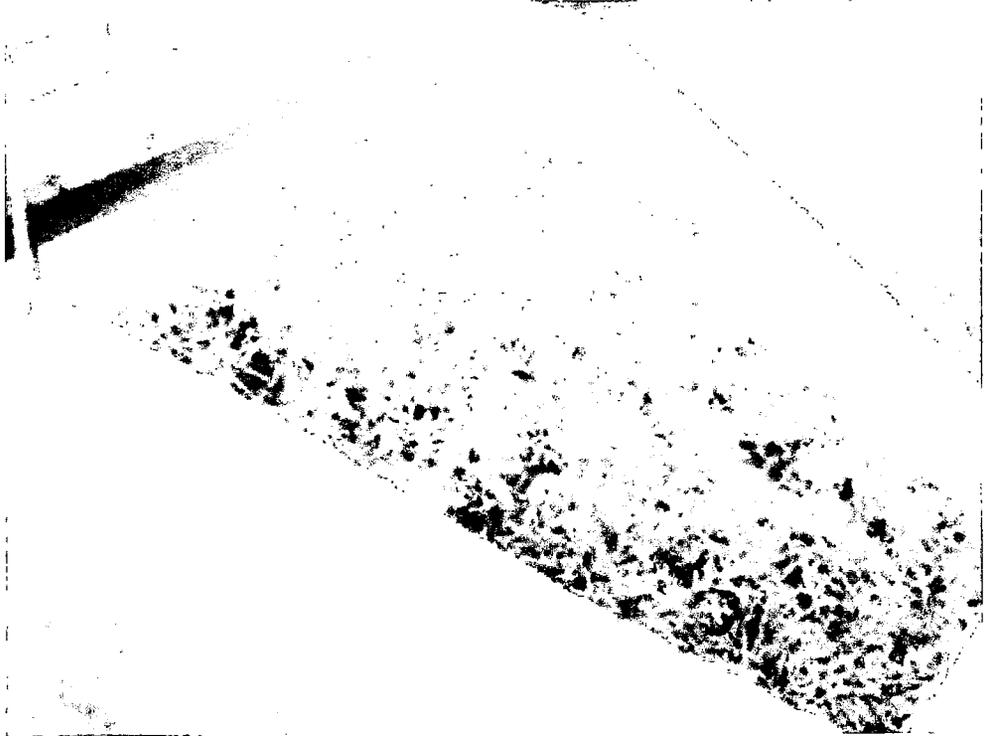


FOTO E-15. Fase de pruebas: Durante la prueba 2-3, $Q = 6\text{l/s}$.



FOTO E-16. Fase de pruebas: Durante la prueba 2-4, $Q = 12\text{l/s}$.



FOTO E-17. Fase de pruebas: Durante la prueba 2-6, $Q = 40\text{l/s}$.

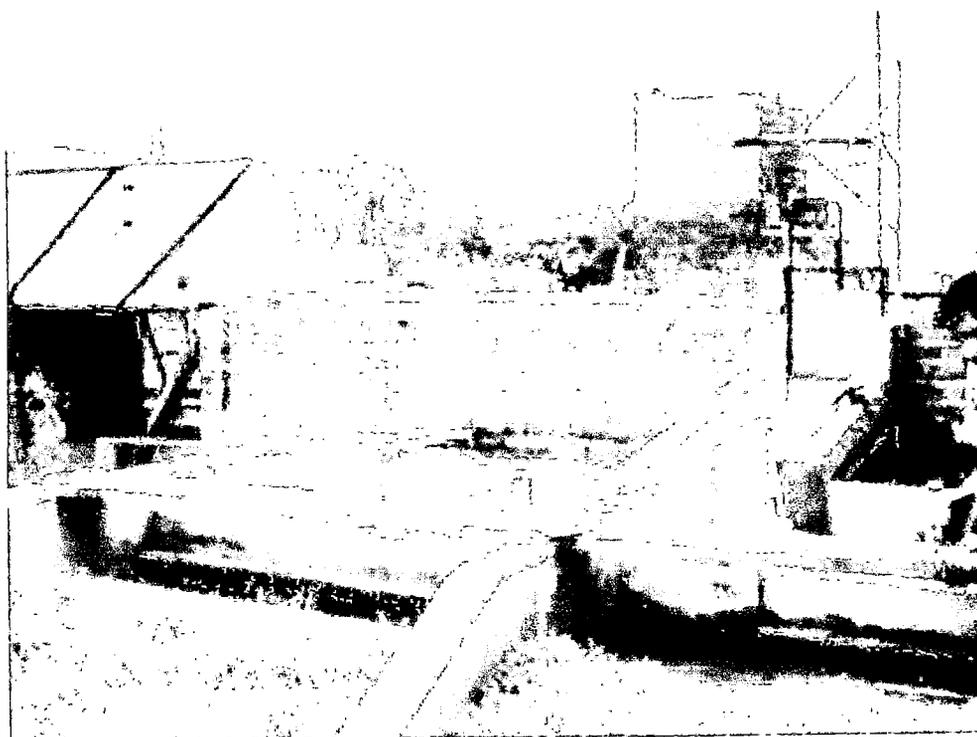


FOTO E-18. Fase de pruebas: Durante la prueba 3-1, $Q = 2.5\text{l/s}$.

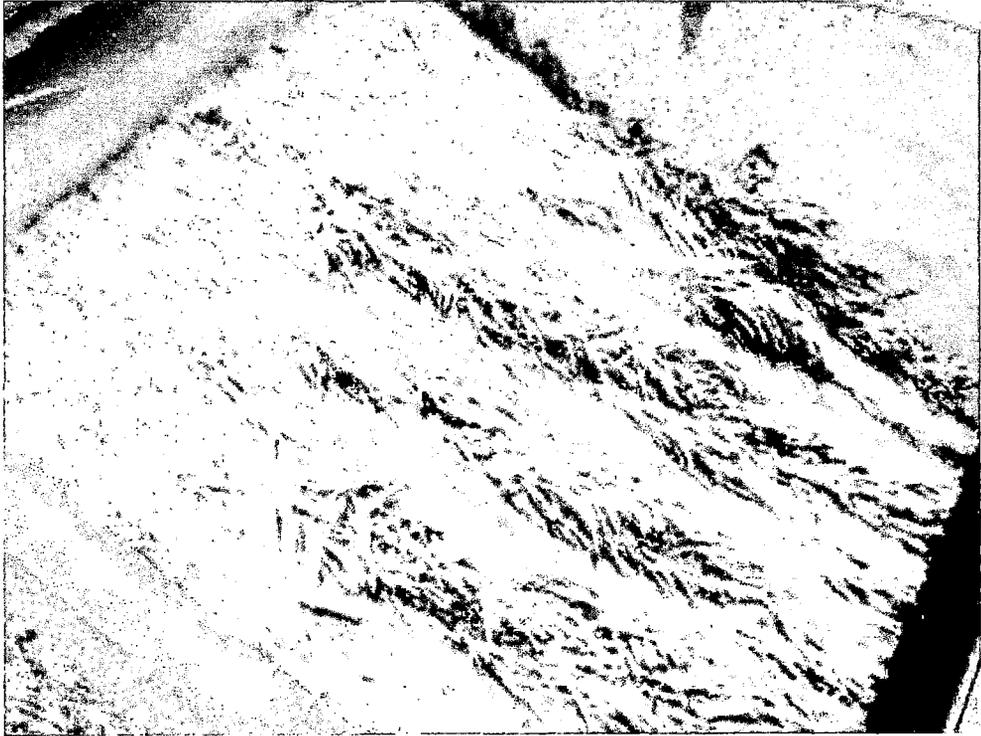


FOTO E-19. Fase de pruebas: Durante la prueba 3-4, $Q = 15\text{l/s}$.

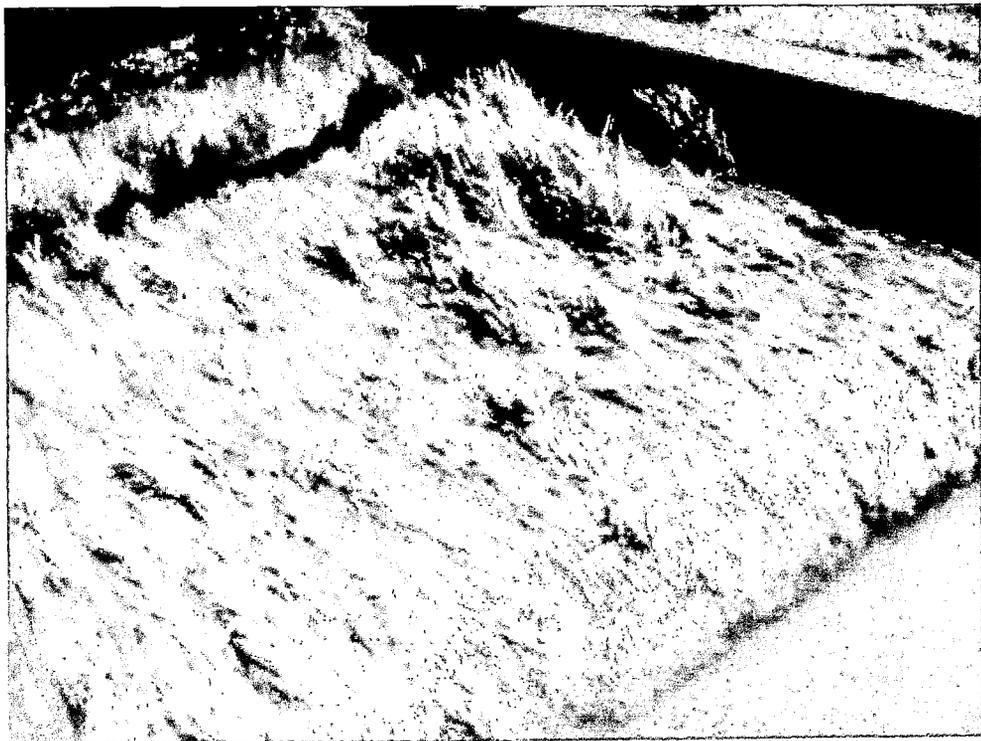


FOTO E-20. Fase de pruebas: Durante la prueba 3-5, $Q = 30\text{l/s}$.

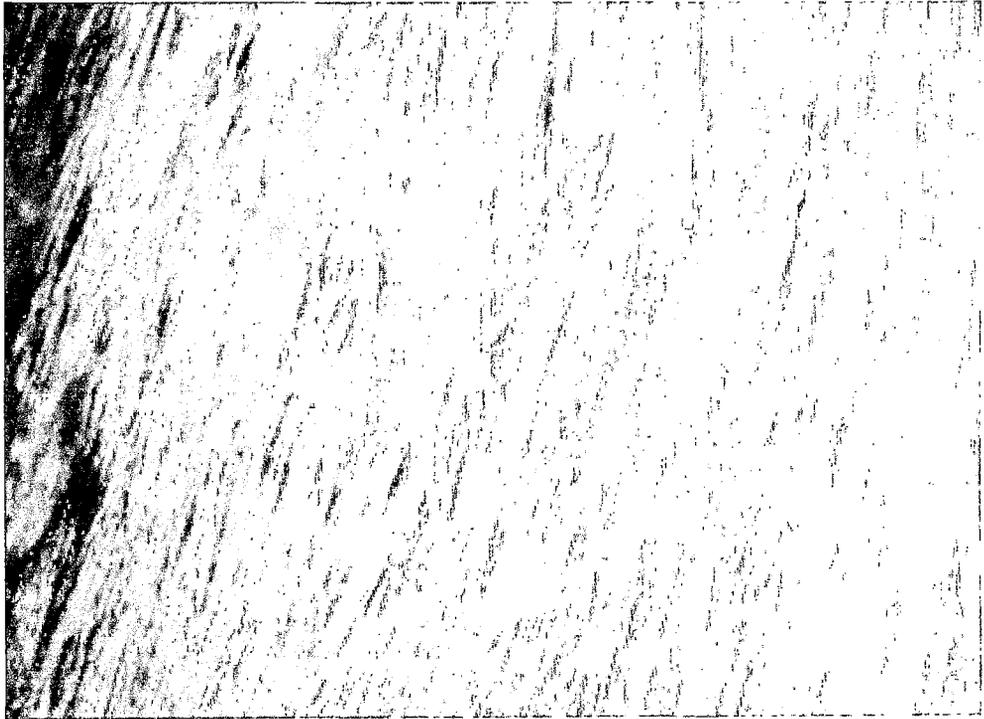


FOTO E-21. Fase de pruebas: Durante la prueba 3-6, $Q = 50\text{l/s}$, detalle del efecto del agua sobre el pasto.



FOTO E-22. Fase de pruebas: Durante la prueba 4-1, $Q = 2\text{l/s}$.



FOTO E-23. Fase de pruebas: Durante la prueba 4-2, $Q = 4\text{l/s}$.



FOTO E-24. Fase de pruebas: Durante la prueba 4-3, $Q = 6\text{l/s}$.



FOTO E-25. Fase de pruebas: Durante la prueba 4-6, $Q = 50\text{l/s}$.

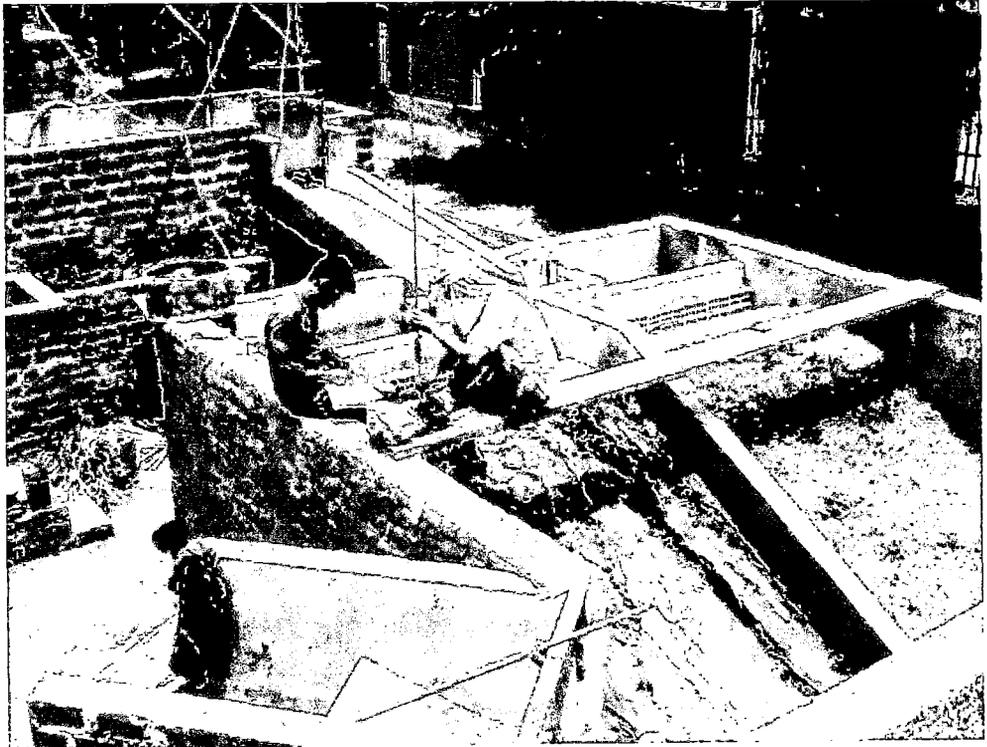


FOTO E-26. Fase de pruebas. Control topográfico luego de las pruebas.

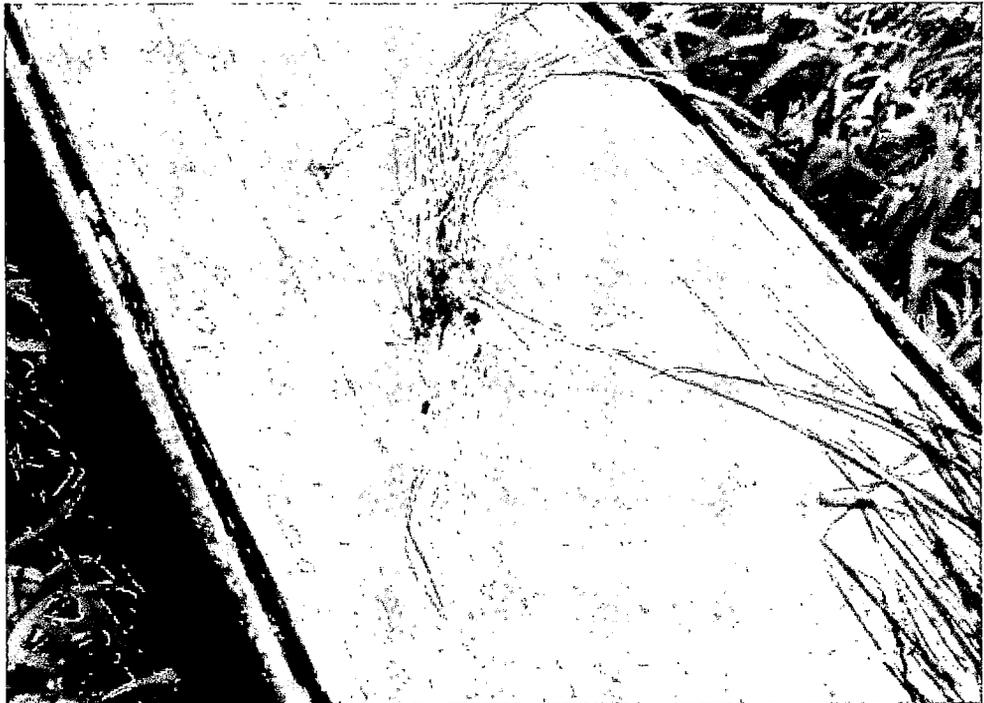


FOTO E-27. Detalle de la Tanzania (*Panicum Maximum*). Luego de ser despojada por el agua en la prueba 2-6. (Pasto sin refuerzo, $Q = 40$ l/s)



FOTO E-28. Pérdidas en la fase II. Parte del pasto arrancado en la Fase II.



FOTO E-29. Instalación de Geoweb®. Talud nivelado para su colocación.



FOTO E-30. Instalación de Geoweb®: Durante la colocación de tierra en las geoceldas.



FOTO E-31. Instalación del MacMat™. Fue necesario tamizar la tierra para mejorar la interacción geomanto suelo.

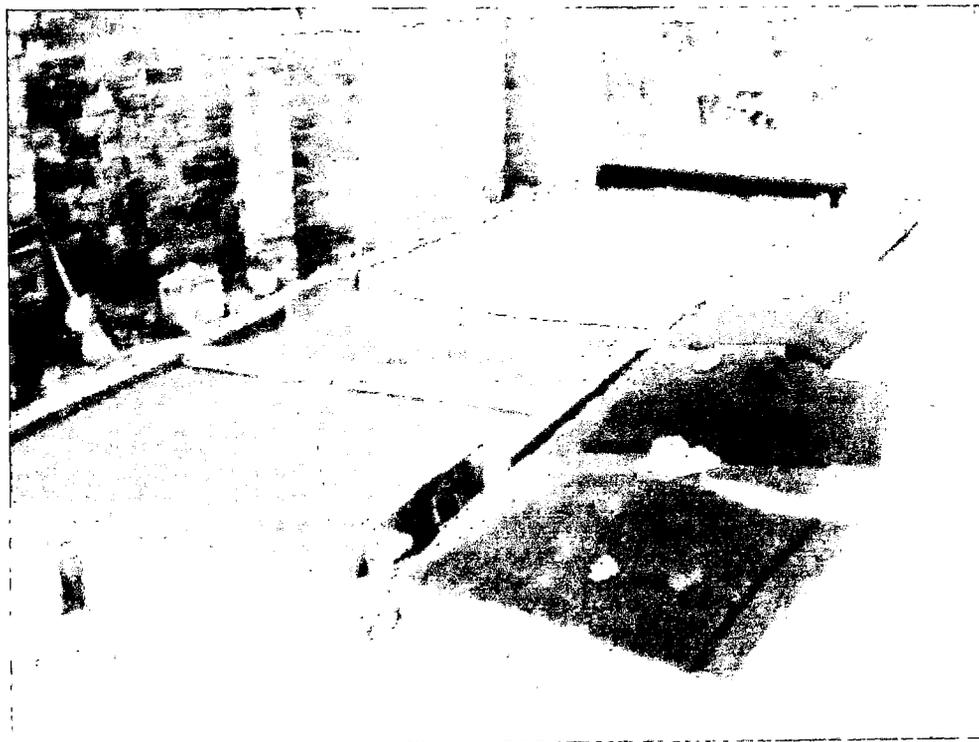


FOTO E-32. Instalación del MacMat®. Para mejorar el confinamiento, se cubrió un espesor de 1cm de tierra cernida debajo del MacMat™.

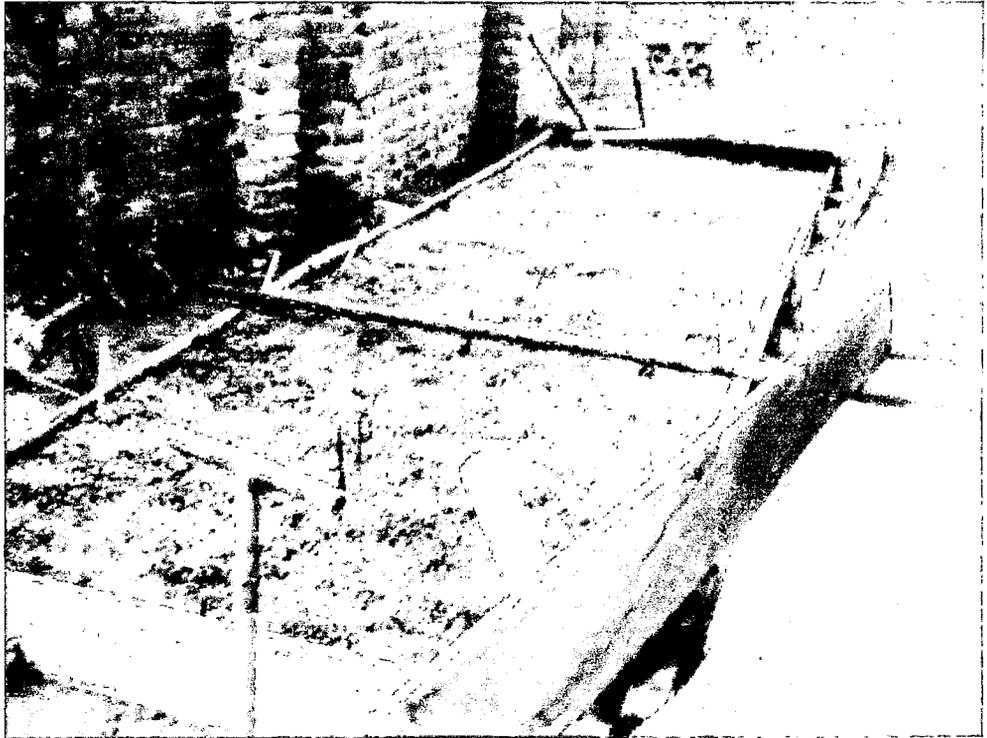


FOTO E-33. Instalación del MacMat™. Resultados luego de 10 días de sembrado, cuando la vegetación se estableció, se cubrió el talud con bloques de ésta área.



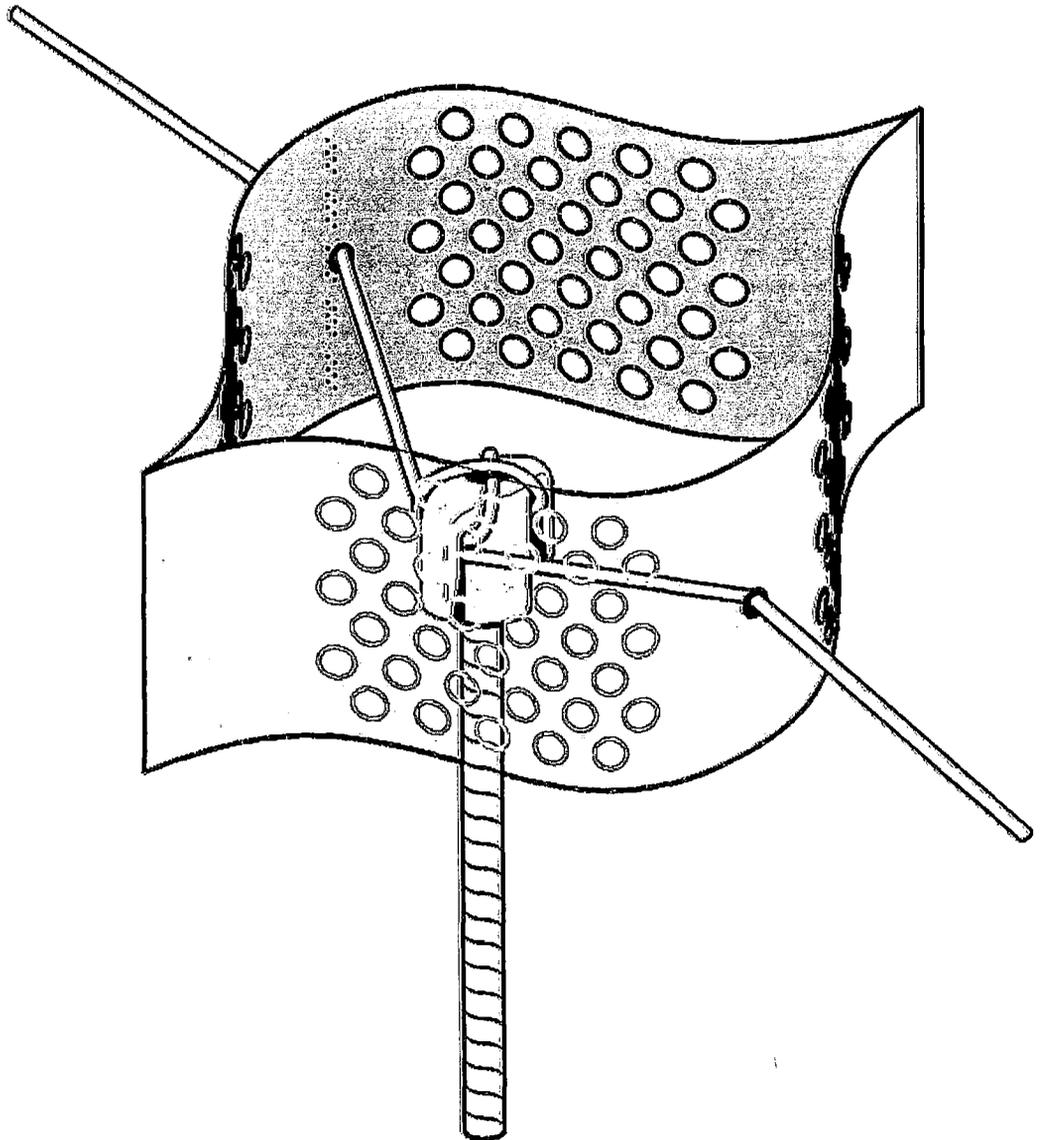
FOTO E-34. Vista de la estructura luego de 60 días desde la siembra. Se observa el mayor crecimiento en el talud de la derecha, el cual está con Geoweb®, a pesar que es unos días más joven.

ANEXO F

INFORMACIÓN ADICIONAL



**SISTEMA GEOWEB® DE CONFINAMIENTO CELULAR
ESPECIFICACIONES PARA MATERIALES DE LA SERIE-V**





Resumen de Especificaciones para el Comportamiento y el Material de los Sistemas Geoweb de la Serie V

	Propiedad	Valor		Método de Prueba		
Material de Base	Composición del Material	Polímero - Polietileno de 0.935 – 0.965 g/cm ³ (58.4 - 60.2 lb/pie ³) de densidad		ASTM D 1505		
	Color	Negro, de Negro de Carbón	Marrón, Verde, Otro Color Sin contenido de metal pesado	N/A		
	Estabilizador	Contenido de Negro de Carbón 1.5% - 2% en peso	Estabilizador bloqueador de luz en base a aminas (HALS) 1.0% en peso del portador	N/A		
	ESCR Mínimo	3000 hr		ASTM D 1693		
Propiedades de fajas	Espesor de Lámina	1.27 mm -5% +10% (50 mil -5% +10%)		ASTM D 5199		
	Tratamiento de Superficie	Capacidad: Las fajas de polietileno estarán texturizadas y perforadas en forma tal que el ángulo de fricción máximo entre la superficie del plástico perforado y una arena silíceo #40 con 100% de densidad relativa no sea menor del 85% del ángulo de fricción máximo de la arena silíceo aislada, ensayado con el método de corte directo bajo norma ASTM D 5321. Las perforaciones restarán 16% ± 1% del área de paredes de las celdas.	Material: Las fajas de polietileno estarán texturizadas y perforadas por huecos en hileras horizontales de 10 mm (0.391 pulg) de diámetro. Dentro de cada hilera, las distancia entre perforaciones será de 19 mm (0.75 pulg) de centro a centro. Las hileras horizontales estarán escalonadas y separadas de 12 mm (0.50 pulg) con relación al centro de las perforaciones. El centro de las perforaciones de las hileras extremas estará a 12 mm (0.50 pulg) de los bordes de la faja y a 25 mm (1.0 pulg) de los puntos de soldadura de las celdas.			
Propiedades de Celdas y Uniones	Detalles de Celdas	Profundidad de Celda	Dimensiones Referenciales ±10%		Densidad	Área Referencial ±1%
			Longitud	Ancho	por m ² (yd ²)	
	GW20V	75 mm (3 pulg)	224 mm (8.8 pulg)	259 mm (10.2 pulg)	34.6 (28.9)	289 cm ² (44.8 pulg ²)
	GW30V	100 mm (4 pulg)	287 mm (11.3 pulg)	320 mm (12.6 pulg)	21.7 (18.2)	460 cm ² (71.3 pulg ²)
	GW40V	150 mm (6 pulg)	475 mm (18.7 pulg)	508 mm (20.0 pulg)	8.3 (6.9)	1206 cm ² (187.0 pulg ²)
	Resistencia a Corto Plazo de las Uniones al Desgaste	Profundidad de Celda		Resistencia Promedio Certificada de las Uniones entre Celdas		
		75 mm (3 pulg)		1060 N (240 lbp)		
		100 mm (4 pulg)		1420 N (320 lbp)		
		150 mm (6 pulg)		2130 N (480 lbp)		
	200 mm (8 pulg)		2840 N (640 lbp)			
Ensayo de Resistencia a la Carga de las Uniones	La unión de una muestra de 102 mm (4.0 pulg) de ancho soportará una carga de 72.5 kg (160 lb) durante un mínimo de 7 días en un ambiente a temperatura controlada que varíe por ciclos de 1 hora de la temperatura ambiente de la habitación hasta 54°C (130°F). La temperatura ambiente en la habitación se registrará por la norma ASTM E41.					
Ensayo Modificado de Resistencia a la Carga de las Uniones	La unión de una muestra de 102 mm (4.0 pulg) de ancho soportará una carga de 72.5 kg (160 lb) durante un mínimo de 30 días en la temperatura ambiente de la habitación. La temperatura ambiente en la habitación se registrará por la norma ASTM E41.					
Propiedades de la Sección	Dimensiones de la Sección	Ancho de Sección	Rango de Longitudes de Sección (Longitud en Celdas: 18, 21, 25, 29, 34)			
		Variable	Mínimo	Máximo		
	GW20V	2.3 m (7.7 pie) a 2.8 m (9.2 pie)	3.7 m (12.0 pie)		8.3 m (27.3 pie)	
	GW30V		4.7 m (15.4 pie)		10.7 m (35.1 pie)	
GW40V	7.7 m (25.4 pie)		17.8 m (58.2 pie)			



EL CLIP ATRA® - GENERALIDADES

El Clip ATRA®

El Clip ATRA®, ilustrado en la Figura 1, es un dispositivo moldeado en polietileno de alta resistencia, desarrollado por el grupo Geosystems de la Presto Products Company. Se utiliza como clavija de retención o como tapa en el extremo de una Estaca ATRA®, con la que forma el sistema de Anclaje ATRA®. El Clip ATRA® representa un ahorro en tiempo y material en el proceso de instalación del sistema Geoweb de Presto.

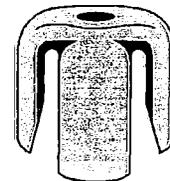


Figura 1 El Clip ATRA®

NOTA: ATRA® es una marca registrada de Presto Products Company. El Clip ATRA® está patentado.

El Sistema de Anclaje ATRA®

El Clip ATRA® se coloca fácilmente sobre el extremo de la Estaca ATRA® para conformar el Anclaje ATRA®. La Estaca ATRA® puede estar constituida por una varilla de 12-13 mm (½ pulg) de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) y revestida con arena, o por una varilla de fierro #4 cortada a la longitud requerida por el proyecto. La estaca ATRA® GFRP puede adquirirse de Presto separadamente o con el Clip ATRA® ya colocado para formar el Anclaje ATRA® GFRP. Los Anclajes ATRA® pueden utilizarse en varias formas para fijar rápidamente las secciones de Geoweb en su sitio, tal como lo muestran las ilustraciones de la Figura 2 a la Figura 4. La utilización de este tipo de anclaje puede traducirse en ahorros significativos. Para mayores detalles, contacte su Distribuidor autorizado de Geosystems de Presto.

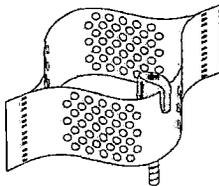


Figura 2

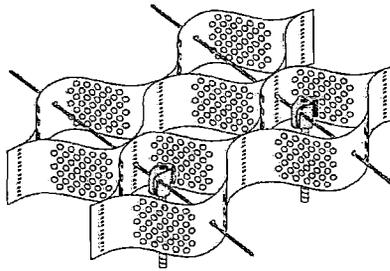


Figura 3

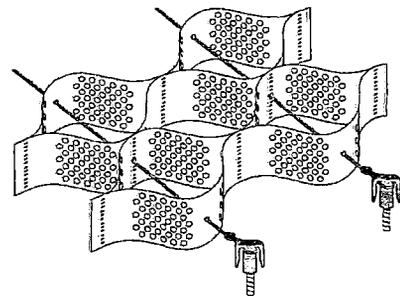


Figura 4

El Clip ATRA® como Clavija de Retención

El Clip ATRA® en su aplicación como clavija de retención, como lo muestra Figura 5, se instala fácilmente sobre los tensores que mantienen en su sitio a las secciones de Geoweb en taludes de pendiente fuerte o sobre materiales en los que no penetran las estacas, tales como suelos duros, rocas y geomembranas. El uso del Clip ATRA® como clavija de retención puede traducirse en ahorros significativos.

Contacte su Distribuidor autorizado de Geosistemas de Presto para mayores detalles.

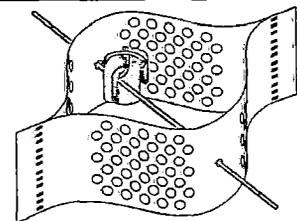


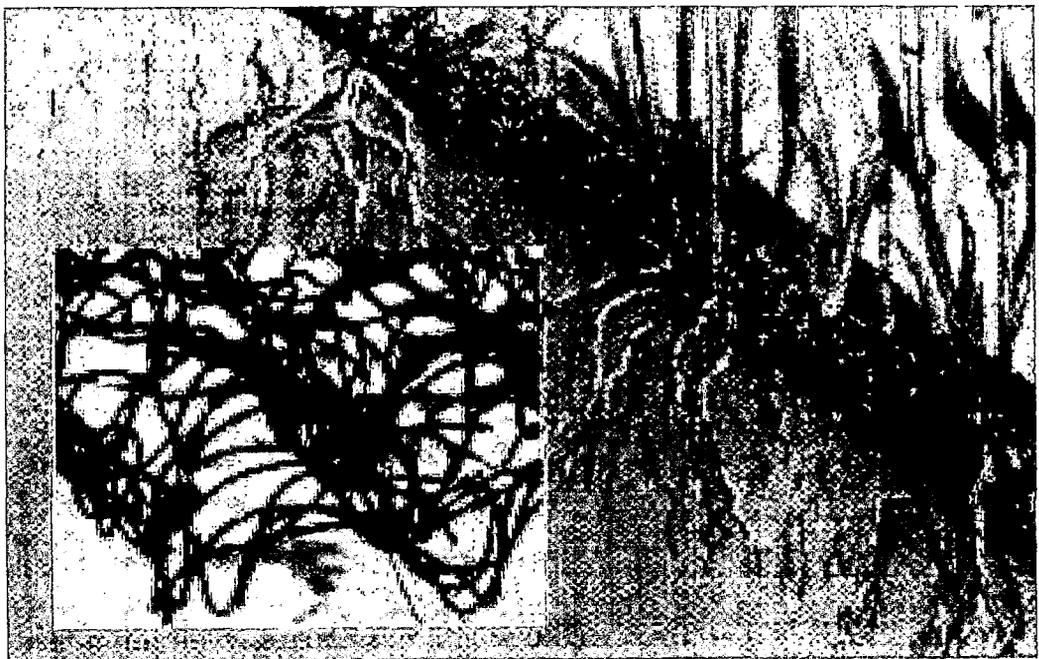
Figura 5



MACCAFERRI

SOLUZIONI PER L'AMBIENTE

Geomanta MacMat™





3.3 Geomats (MacMat™)

3.3.1 Definition

MacMat™ is a three-dimensional geomat consisting of entangled polypropylene monofilaments that are heat bonded at the contact points to provide a dimensionally stable matrix for soil erosion protection from wind, rainfall, run-off or flooding. It is a permanent erosion control product composed of UV stabilised, non-degradable synthetic fibres.

3.3.2 Purpose

MacMat™ provides permanent erosion protection on upland slopes, stream banks, wetland boundaries, and shorelines. The mats provide a stable medium to encourage natural colonisation and support healthy plant growth.

Initially the geomat blanket works to shield the soil slope from the effects of wind and rainfall, preventing the soil from washing out before the vegetation has a chance to become established. Then, as the vegetation matures, the roots anchor the mat to the soil to provide superior soil reinforcement strength, capable of handling steeper embankment slopes and higher run-off flow velocities.



PHOTO 3.3.1: VEGETATED MACMAT™

3.3.3 Specifications

MacMat™ specifications are listed in Table 3.3.1.

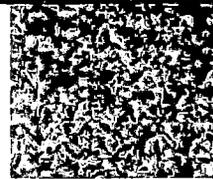
TABLE 3.3.1: MACMAT™ SPECIFICATIONS

MACMAT™	
Unit weight (g/m ²)	650
Thickness (mm)	10
Tensile strength (kN/m)	>1.6
Void space	90%
Supply Size (m)	Rolls 2x25 (32 kg)
Polymer Type	Polypropylene
Density (g/m ³)	900
Melting Point (°C)	150
Colour	Black
UV Resistance	Stabilised



Especificaciones del MacMat™ (Traducción)

MACMAT™



Propiedades	Unidad	Características
Densidad	g/m ²	650
Espesor	mm	10
Resistencia a la tensión	kN/m	>1.6
Cantidad de vacíos	%	90
Tamaño comercial	m	Rollos de 2x25 (32 Kg)
Tipo de polímero		Polipropileno
Punto de fusión	°C	150
Color		Negro
Resistencia a los rayos UV		Estable

Figura 4.1. Diagrama de flujo de la metodología.

Tabla 4.1. Descripción de los tipos de suelo y sus propiedades físicas.

Descripción de las propiedades físicas	Propiedades físicas	Medios de cultivo
<p>Suelo tipo 1: Suelo de tipo arenoso con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 2: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 3: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 4: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 5: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p>	<p>Medio 1</p> <p>Medio 2</p> <p>Medio 3</p> <p>Medio 4</p> <p>Medio 5</p>	<p>Medio 1</p> <p>Medio 2</p> <p>Medio 3</p> <p>Medio 4</p> <p>Medio 5</p>
<p>Suelo tipo 6: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 7: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 8: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 9: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 10: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p>	<p>Medio 6</p> <p>Medio 7</p> <p>Medio 8</p> <p>Medio 9</p> <p>Medio 10</p>	<p>Medio 6</p> <p>Medio 7</p> <p>Medio 8</p> <p>Medio 9</p> <p>Medio 10</p>
<p>Suelo tipo 11: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 12: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 13: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 14: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 15: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p>	<p>Medio 11</p> <p>Medio 12</p> <p>Medio 13</p> <p>Medio 14</p> <p>Medio 15</p>	<p>Medio 11</p> <p>Medio 12</p> <p>Medio 13</p> <p>Medio 14</p> <p>Medio 15</p>
<p>Suelo tipo 16: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 17: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 18: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 19: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p> <p>Suelo tipo 20: Suelo de tipo franco con poca materia orgánica, poca capacidad de retención de agua y poca capacidad de retención de nutrientes.</p>	<p>Medio 16</p> <p>Medio 17</p> <p>Medio 18</p> <p>Medio 19</p> <p>Medio 20</p>	<p>Medio 16</p> <p>Medio 17</p> <p>Medio 18</p> <p>Medio 19</p> <p>Medio 20</p>

Condiciones de vegetación y flujo comparables con:	Grado del efecto en β	Rango de valores modificantes
<p>Temporada de poca vegetación, sauces o árboles de tipo silvestre de entre 5 y 10 años, mezclados con algunas hierbas y matorrales de poco follaje, donde el radio hidráulico es mayor que 2 pies (0,6m).</p>	Alto	0,025—0,050
<p>Temporada de crecimiento de matorrales de sauces de alrededor de 1 año, mezclados con algunas hierbas con mucho follaje, a lo largo de los taludes del canal, con poca vegetación en el lecho del mismo, en donde el radio hidráulico es mayor que 3 pies (0,9m).</p>		
<p>Pastos densos en donde el promedio de la profundidad del flujo es menor que la mitad de la altura de la vegetación.</p>		
<p>Temporada de crecimiento de matorrales de sauces de alrededor de 1 año, mezclados con hierbas de mucho follaje, a lo largo del lecho del canal cualquier valor de radio hidráulico arriba de 10 a 15 pies (3-4,6m).</p>	Muy alto	0,050—0,100
<p>Temporada de crecimiento de sauces mezclados con hierbas y matorrales, todo con follaje muy denso cualquier valor de radio hidráulico arriba de 10 a 15 pies (3-4,6m).</p>		

El presente informe describe el uso de la bioingeniería de suelos para el control de erosión hídrica en taludes.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la efectividad de las técnicas de bioingeniería de suelos para el control de erosión hídrica en taludes.

El estudio se realizó en un talud de un terreno con pendiente de 30°.

Se utilizaron técnicas de bioingeniería de suelos como el uso de plantas y estructuras de bioingeniería para el control de erosión hídrica.

Los resultados del estudio muestran que las técnicas de bioingeniería de suelos son efectivas para el control de erosión hídrica en taludes.

Se concluye que el uso de la bioingeniería de suelos es una técnica efectiva para el control de erosión hídrica en taludes.

El presente informe describe el uso de la bioingeniería de suelos para el control de erosión hídrica en taludes.

El objetivo principal de este estudio es evaluar la efectividad de las técnicas de bioingeniería de suelos para el control de erosión hídrica en taludes.

El estudio se realizó en un talud de un terreno con pendiente de 30°.

Se utilizaron técnicas de bioingeniería de suelos como el uso de plantas y estructuras de bioingeniería para el control de erosión hídrica.

Los resultados del estudio muestran que las técnicas de bioingeniería de suelos son efectivas para el control de erosión hídrica en taludes.

Se concluye que el uso de la bioingeniería de suelos es una técnica efectiva para el control de erosión hídrica en taludes.

El presente informe describe el uso de la bioingeniería de suelos para el control de erosión hídrica en taludes.

El presente documento describe el uso de la bioingeniería de suelos para el control de erosión hídrica en taludes. Se detallan los tipos de estructuras, los materiales utilizados y los procedimientos de construcción. El objetivo es proporcionar información técnica para la implementación de estas técnicas en proyectos de conservación de suelos.

Se describen los tipos de estructuras de bioingeniería de suelos, como las estructuras de tipo "cabeza de caballo" y las estructuras de tipo "cabeza de vaca". Se detallan los materiales utilizados, como el paja, el estiércol y los ramos de árboles. Se describen los procedimientos de construcción, como la preparación del terreno, la colocación de los materiales y el mantenimiento de las estructuras.

Se describen los tipos de estructuras de bioingeniería de suelos, como las estructuras de tipo "cabeza de caballo" y las estructuras de tipo "cabeza de vaca". Se detallan los materiales utilizados, como el paja, el estiércol y los ramos de árboles. Se describen los procedimientos de construcción, como la preparación del terreno, la colocación de los materiales y el mantenimiento de las estructuras.

Se describen los tipos de estructuras de bioingeniería de suelos, como las estructuras de tipo "cabeza de caballo" y las estructuras de tipo "cabeza de vaca". Se detallan los materiales utilizados, como el paja, el estiércol y los ramos de árboles. Se describen los procedimientos de construcción, como la preparación del terreno, la colocación de los materiales y el mantenimiento de las estructuras.

Se describen los tipos de estructuras de bioingeniería de suelos, como las estructuras de tipo "cabeza de caballo" y las estructuras de tipo "cabeza de vaca". Se detallan los materiales utilizados, como el paja, el estiércol y los ramos de árboles. Se describen los procedimientos de construcción, como la preparación del terreno, la colocación de los materiales y el mantenimiento de las estructuras.

Superficie del Canal	Tierra	n_0	0.020
	Roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Irregularidad	Suave	n_1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variación de la Sección	Constante	n_2	0.000
	Quasi-constante		0.005
	Escalonada		0.010 - 0.015
Efecto de la Obstrucción	Despreciable	n_3	0.000
	Menor		0.010 - 0.015
	Apreciable		0.020 - 0.030
	Severo		0.040 - 0.060
Vegetación	Bajo	n_4	0.005 - 0.010
	Medio		0.010 - 0.025
	Alto		0.025 - 0.050
	Muy alto		0.050 - 0.1
Intensidad de Meandros	Menor	n_5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.200

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot n_5$$

TABLA DE COWAN PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DE DIVERSOS FACTORES SOBRE EL COEFICIENTE n

Área de drenaje: 64 000 m² (188 ac²)
 Fecha de avenida: Feb. 14, 1950
 Gasto pico: 1450 ft³/s (41 9 m³/s)
 Coeficiente de rugosidad estimado: $n = 0.070$

Descripción del canal: lecho de arena fina y limo. Bordes irregulares con totos de 2 a 6 m (5 a 20 cm) de alto es sobre los bordes anchos y particularmente en la parte baja del lecho (ver foto). Secciónes de extensión 1, 2, 5, 6, 7 se utilizan para determinar el coeficiente de rugosidad. Puente apoyado de la construcción en la sección 5.

Sección	Área, ft ² (m ²)	Ancho superficial, ft (m)	Profundidad media, ft (m)	Radio hidráulico, ft (m)	Velocidad media, ft/s (m/s)	Distancia entre secciones, ft (m)	Corriente crítica, ft (m)
1	288 (82.5)	115 (35.0)	7.7 (2.3)	7.16 (2.16)	1.67 (0.502)	—	—
2	520 (77.1)	122 (37.2)	6.8 (2.1)	6.45 (1.95)	1.38 (0.422)	30 (27)	3.05 (0.93)
3	591 (84.9)	112 (34)	11.4 (3.47)	8.22 (2.51)	2.50 (0.752)	35 (23)	3.10 (0.931)
4	857 (77.8)	115 (35.4)	7.2 (2.2)	6.86 (2.07)	1.77 (0.540)	45 (14)	3.02 (0.927)
5	616 (76.0)	94 (29)	8.7 (2.7)	6.05 (2.40)	1.51 (0.552)	70 (24)	3.05 (0.93)
6	791 (72.5)	107 (32.6)	7.4 (2.3)	7.16 (2.13)	1.87 (0.570)	150 (47.5)	3.10 (0.93)
7	854 (79.3)	115 (35.1)	7.4 (2.3)	7.00 (2.13)	1.73 (0.527)	147 (44.8)	3.07 (0.921)

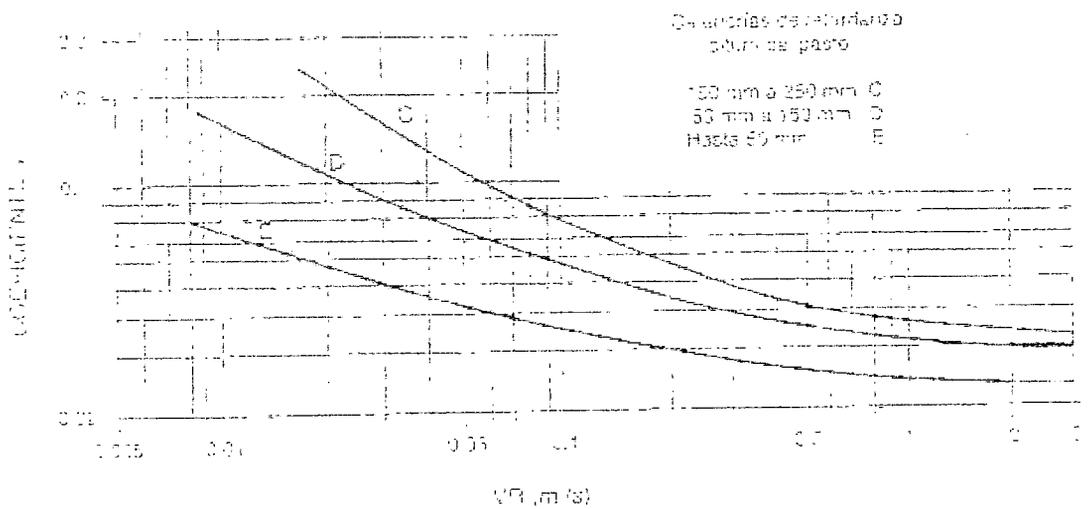


FIGURA 8.3 Efecto de la altura del pasto y de la velocidad sobre la rugosidad n (Doolittle y otros, 1937).

TABLA 8.4 Cálculo del coeficiente de Manning n para diferentes tipos de vegetación (Temple, 1983)

Tipo de Vegetación (mm)	Índice de retardanza C_r	n de Manning
Pasto muy alto ($h > 300$)	10.0	0.09 a 0.20
Pasto alto (h de 200 a 300)	7.6	0.07 a 0.15
Pasto medio (h de 150 a 200)	5.6	0.05 a 0.06
Pasto bajo (h de 50 a 150)	3.2	0.02 a 0.05
Pasto muy corto ($h < 50$)	1.5	0.02 a 0.04