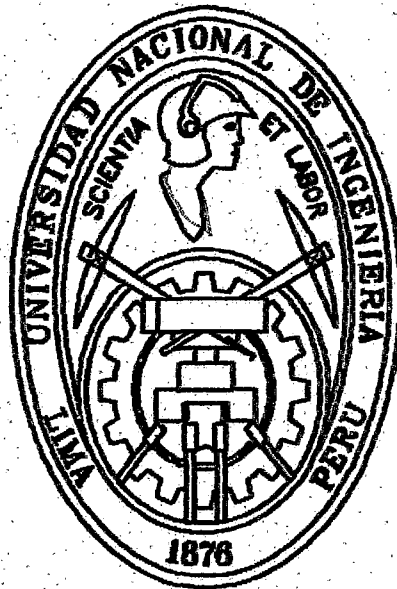


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE BIOINGENIERÍA PARA
CONTROL DE EROSIÓN HÍDRICA EN TALUDES CON LA
GRAMÍNEA KIKUYO
(PENNISETUM CLANDESTINUM)**

TESIS

**Para optar el título profesional de:
INGENIERO CIVIL**

DASHIELL DETTMAR ARIAS MAMANI

LIMA-PERÚ

Digitalizado por:

2006

Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse

RESUMEN

Arias Mamani, D. D. (2006), *Análisis de Técnicas de Bioingeniería para Control de Erosión Hídrica en Taludes con la Gramínea Kikuyo*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

La presente tesis de investigación se ocupa del uso de la Bioingeniería, para el control de la erosión hídrica en taludes mediante pasto y pasto reforzado con otro material ya sea un geosintético o un geotextil, su aplicación puede ser dada en la superficie de terraplenes aguas abajo, en los cuales el riesgo de desborde durante eventos de inundación es extremo, tales como: Presas de tierra, terraplenes de almacenamiento de inundación, terraplenes de inundación a lo largo de ríos, terraplenes de carretera en planicies de inundación y en taludes de las presas de cierre de las minas; también en canales de demasías, que llevan flujos ocasionales de alta velocidad tales como: Aliviaderos auxiliares en presas, aliviaderos de estanques de almacenamiento de inundación, canales de alivio de inundación y canales de desviación.

Para este propósito esta tesis consistió, en una parte de investigación bibliográfica y otra de investigación experimental en laboratorio, en la investigación bibliográfica se muestra el procedimiento y principios, para la planificación y diseño de coberturas de pasto y pasto reforzado con geosintéticos y/o geotextiles; también se entro al detalle en aspectos botánicos, hidráulicos y geotécnicos en el diseño de coberturas de pasto, para el control de la erosión hídrica.

En la investigación experimental se describen los materiales, procedimientos y resultados de los ensayos realizados en el laboratorio en un modelo físico, estos ensayos se llevaron acabo para evaluar el uso de coberturas de pasto y coberturas de pasto reforzadas con geosintético, en taludes sometidos a erosión de flujo superficial (escorrentía superficial) producto de la lluvias. La especie de pasto utilizada fue el pasto Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*), que es una especie ampliamente difundida en la sierra del Perú y zonas subtropicales de

Venezuela y Colombia hasta aproximadamente los 3800 m.s.n.m.; el geosintético utilizado fue Geoweb clase V y el tipo de suelo utilizado fue una arcilla limo arenosa de baja plasticidad.

Las pruebas fueron llevadas a cabo en 2 taludes con similar topografía, tipo de suelo, el primero con cobertura de pasto Kikuyo y el otro pasto Kikuyo reforzado con Geoweb, las condiciones a las cuales fueron sometidos los taludes revestidos estuvieron sujetas a la variación de caudales y tiempos de escorrentía, habiendo obtenidos parámetros de erosión, hidráulicos, geotécnicos y botánicos, los cuales fueron usados para evaluar cada una de las coberturas.

Finalmente se muestra el grado de efectividad de cada cobertura, bajo las condiciones antes mencionadas, en donde se observó que la cobertura de pasto Kikuyo falló después de 540 minutos de prueba; mientras que la cobertura de pasto Kikuyo reforzado con Geoweb no falló hasta la finalización de las pruebas, que fue después de 600 minutos, también se hizo un comparación con los resultados obtenidos en la investigación de De la Cruz (2005), de todo esto se recomienda el uso de geosintéticos y/o geotextiles, los cuales realzan la resistencia a la erosión y reducen el riesgo de falla de la cobertura de pasto debido a una pobre cobertura localizada, además que ayudan al buen desarrollo de las plantas.

CONTENIDO

	Pág.
CAPÍTULO 1.-INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	15
1.1 PROBLEMÁTICA Y ANTECEDENTES	16
1.1.1 Problemática	16
1.1.2 Antecedentes	16
1.1.3 Necesidad	17
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 CONTENIDO DE LA TESIS	18
CAPÍTULO 2.-REVISIÓN DE LITERATURA	20
2.1 CONSIDERACIONES HIDRÁULICAS	21
2.1.1 Conceptos en Flujo de Canales Abiertos	21
Tipos de Flujo.	21
Resistencia al Flujo.	21
2.1.2 Influencia del Pasto en la Rugosidad Hidráulica	23
2.1.3 Efecto del Refuerzo en la Rugosidad Hidráulica	25
2.1.4 Rugosidad Hidráulica en Vegetación para Pendientes Menores a 1/10	25
2.1.5 Rugosidad Hidráulica para Pendientes Mayores que 1/10	33
2.1.6 Esfuerzo Cortante Actuante	35
Esfuerzos de corte en canales reforzados y revestidos con pasto.	36
2.1.7 Número de Froude	38
Flujo Supercrítico	39
Turbulencia	40
2.1.8 Acción de las Fuerzas Hidrodinámicas en el Canal	41
2.1.9 Tipos de Erosión	42
Erosión Hídrica	42

	Pág.
Factores Erosivos	47
Escorrentía Superficial	56
2.1.10 Modelos Matemáticos para la Predicción de la Erosión Hídrica	58
2.2 CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS	62
2.2.1 General	62
2.3 CONSIDERACIONES BOTÁNICAS	67
2.3.1 Efectos Negativos de la Vegetación	67
La Vegetación y la Erosión	67
2.3.2 Efectos del Tiempo del Flujo	68
2.3.3 Propiedades de las Plantas	69
Parámetros a tener en Cuenta en el Diseño	69
2.3.4 Las Raíces	71
Estructura de las raíces	72
Relación de Área de Raíces	73
Extensión lateral	73
Profundidad De Las Raíces	73
Resistencia De Las Raíces	73
Tasas de crecimiento de las raíces	74
2.3.5 Caracterización para Control de Erosión	75
Seleccionar correctamente la especie vegetal	75
2.3.6 Diseño de los Componentes Vegetativos	76
Análisis Del Sitio	76
Selección de las especies vegetales	78
Vegetación Nativa	78
Diseño del Tipo de Especie Vegetal	80
2.3.7 Razones Técnicas para la Selección de Pasto como Cobertura	
Superficial.	85
Ventajas	85
Desventajas	86
Selección de Especies	86
Pasto Kikuyo	88

	Pág.
2.4 COMPOSICIÓN Y APLICACIÓN DE CANALES REFORZADOS CON PASTO	91
2.4.1 Canales Reforzados con Pasto	91
Erosión de la Superficie de Pasto.	93
2.4.2 Concepto de Reforzamiento	94
Tipos y Elementos Constituyentes del Pasto Reforzado	94
El Refuerzo de Geotextil y Geosintéticos	98
Recomendaciones	99
2.4.3. Aplicaciones de Canales Reforzados con Pasto	100
CAPÍTULO 3.-DESARROLLO TÉCNICO Y EXPOSICIÓN DE HIPÓTESIS	102
3.1 GENERAL	103
3.2 PLAN DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	103
3.3 METODOLOGÍA	108
3.3.1 Modelos Matemáticos	110
CAPÍTULO 4.-CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ANÁLISIS Y DE PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS	116
4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO O ÁREA DE TRABAJO	117
4.1.1 Ubicación y Descripción del modelo	117
4.1.2 Instalaciones auxiliares	118
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL MODELO	121
4.2.1 Caracterización geométrica y topográfica	121
4.2.2 Caracterización Geotécnica	121
4.2.3 Caracterización hidrológica	122
4.2.4 Caracterización Botánica	123
4.3 MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS Y EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS	127
4.3.1 Ingreso y medición de caudales	127
4.3.2 Mediciones de pérdida de suelos y tirantes de flujo	128
4.3.3 Mediciones de velocidad	130

	Pág.
4.4 PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS Y MATRIZ DE PRUEBAS	131
4.4.1 Fases de ejecución y toma de datos de pruebas	131
4.4.2 Matriz de Pruebas	131
4.4.3 Descripción General de la Ejecución de las pruebas	134
CAPITULO 5.-ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE DATOS	138
5.1 MEDICIONES HIDRÁULICAS, GEOTÉCNICAS, BOTÁNICAS Y DE EROSIÓN DEL SUELO.	139
5.1.1 Generalidades	139
5.1.2 Mediciones Hidráulicas	139
5.1.3 Mediciones topográficas o erosión del suelo	146
5.1.4 Mediciones botánicas	148
5.1.5 Mediciones geotécnicas	152
5.2 SÍNTESIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.	153
5.3 DISCUSIÓN Y CONTRASTE DE RESULTADOS OBTENIDOS EN CAMPO Y AJUSTES.	159
5.3.1 Relación entre tiempo y la profundidad de erosión, caudal unitario, esfuerzo efectivo, esfuerzo total, número de Manning y velocidad promedio.	159
Discusión de Resultados de la Fase I (Cobertura de Pasto Kikuyo con Geoweb).	162
Discusión de resultados de las Fase II (Cobertura de pasto Kikuyo)	172
Análisis y Discusión de las Fases I y II.	175
5.3.2 Análisis Y discusión del comportamiento de los pastos Kikuyo y Tanzania de acuerdo a la técnica de bioingeniería.	180
Altura de crecimiento	182
Densidad del pasto Kikuyo	183
Comportamiento de las raíces del pasto Kikuyo	184
Falla de la cobertura en la fase II	185
Efecto del tiempo de prueba	185

	Pág.
5.3.3 Relación entre la técnica de bioingeniería, caudal y el tiempo de Prueba.	186
5.3.4 Predicción de la profundidad de erosión.	191
CAPITULO 6.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	195
6.1 CONCLUSIONES	196
6.2 RECOMENDACIONES	201
ANEXO A Visualización de las mediciones de las velocidades.	203
ANEXO B Descripción visual del modelo.	207
ANEXO C Especificaciones del geosintético Geoweb.	211
ANEXO D Uso de agromantos y biomantos con cespedones de Kikuyo.	213
ANEXO E Resultados de ensayos de laboratorio al suelo utilizado en esta investigación.	220
ANEXO F Tirante del flujo de agua hallados en laboratorio, los cálculos de número de Manning teórico y de laboratorio, así como del cálculo de los factores C_{ft} y n_f	222
ANEXO G Tiempo en que recorre el talud, el trazador visual, para el cálculo de las velocidades del flujo	235
ANEXO H Profundidad de erosión para cada punto de la cuadrícula perteneciente al talud	241
ANEXO I Láminas de la estructura hidráulica de medición	260
BIBLIOGRAFÍA	263

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1 Efectos de los esfuerzos del flujo de agua sobre una cobertura de pasto.

FIGURA 2-2 Numero de Manning ,n , versus Radio hidraulico , R , para vegetación de tipo A; todo en unidades inglesas.

FIGURA 2-3 Numero de Manning n, versus Radio hidraulico , R , para vegetación de tipo B; todo en unidades inglesas. .

FIGURA 2-4 Numero de Manning n, versus Radio hidraulico , R , para vegetación de tipo C; todo en unidades inglesas.

FIGURA 2-5 Numero de Manning n, versus Radio hidráulico, R, para vegetación de tipo D; todo en unidades inglesas

FIGURA 2-6 Numero de Manning n, versus Radio hidráulico, R, para vegetación de tipo E; todo en unidades inglesas.

FIGURA 2-7 Coeficientes de Manning recomendados para pendientes con pasto que tengan inclinación mayor a 1/10.

FIGURA 2-8 Fuerzas de corte en un típico canal reforzado con pasto.

FIGURA 2-9 Desarrollo de un flujo totalmente aireado.

FIGURA 2-10 Fuerzas hidrodinámicas en una canal revestido.

FIGURA 2-11 Factores que afectan la erosión hídrica.

FIGURA 2-12 Representación esquemática de los diferentes tipos de erosión hídrica.

FIGURA 2-13 Diagrama triangular para la determinación de la textura con indicación de la erosionabilidad.

FIGURA 2-14 Influencia del ángulo de inclinación de un talud sobre la erosión y la revegetación.

FIGURA 2-15 Condiciones de humedad del subsuelo.

FIGURA 2-16 Condiciones de humedad del subsuelo.

FIGURA 2-17 Tipos de falla geotécnica.

FIGURA 2-18 Formas generales de las raíces de la vegetación.

FIGURA 2-19 Materiales de cobertura de suelo para control de erosión.

FIGURA 2-20 Mecanismos de erosión para obras hidráulicas revestidas con pasto.

FIGURA 2-21 Principales características del Pasto.

FIGURA 2-22 Secciones de 2 sistemas protegidos por pasto para la protección de canales. (a) Compuesto biotécnico. (b) Bloques de concreto

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

FIGURA 4-1 Tipos de cespedones o tepes que se utilizan como técnica de establecimiento del pasto.

FIGURA 4-2 En la cual se observa la cuadrícula sobre la cual se hicieron las mediciones de profundidad de erosión y nivel de la superficie del flujo de agua. En el sentido longitudinal se observan las marcas desde la letras A hasta M, y en el sentido transversal se tienen divisiones desde el numero 0 hasta el 16.

FIGURA 4-3 Se observa el instante preciso en el que el agua llega a la poza de decantación, instante en el que se empieza a contabilizar el tiempo de duración de la prueba.

FIGURA 5-1 Profundidad de erosión VS Tiempo de duración de las pruebas

FIGURA 5-2 Profundidad de erosión VS Tiempo de duración de las pruebas.

FIGURA 5-3 Tasa de erosión no acumulada para cada prueba de la Fase I.

FIGURA 5-4 Variabilidad del número de Manning de la cobertura de pasto, ante la adición de refuerzo, en este caso Geoweb.

FIGURA 5-5 Número de Manning de laboratorio contrastado con el "n" de Manning según Temple y Gray.

FIGURA 5-6 Número de Manning dado por las ecuaciones de Temple, 1987; el cual se utilizo para realizar los cálculos hidráulicos.

FIGURA 5-7. Tasa de erosión no acumulada para cada prueba de la Fase II.

FIGURA 5-8 Esfuerzo efectivo para la Fase I y para el sector del área de falla en la Fase II .

FIGURA 5-9 Se observa la acción del flujo sobre una porción de terreno expuesta de forma frontal al flujo, condicionándolo a ser volteado.

FIGURA 5-10 la altura de crecimiento del pasto Kikuyo y Tanzania vs. Tiempo en días.

FIGURA 5-11 Gráfica de la erosión experimental Vs la erosión calculada para la fase I.

FIGURA 5-12 Gráfica de la erosión experimental Vs la erosión calculada para la fase II.

LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1 Parámetros de Rugosidad Relativa para vegetación.

TABLA 2-2 Clasificación de las coberturas vegetales según el grado de retardanza.

TABLA 2-3 Susceptibilidad a la erosión hídrica de diferentes tipos de suelos.

TABLA 2-4 Erosión relativa de acuerdo a la vegetación.

TABLA 2-5 Esfuerzo de corte permisible para diversas coberturas seleccionadas

TABLA 2-6 Cantidad de agua disponible típica para diferentes suelos.

TABLA 2-7 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de especie vegetal.

TABLA 2-8: Especies de Pastos Utilizados según la región.

TABLA 2-9 Características de algunos pastos utilizados para el control de la erosión.

TABLA 2-10 Características de algunos pastos utilizados para el control de la erosión.

TABLA 4-1 Caudales utilizados en las pruebas.

TABLA 4-2 Matriz de pruebas para fase I.

TABLA 4-3 Matriz de pruebas para fase II.

TABLA 5-1 Lecturas del limnómetro con las que se determino los caudales y caudales unitarios de cada prueba.

TABLA 5-2 Tirantes obtenidos en campo para la Fase I, que es la perteneciente a la cobertura de Pasto con Geoweb.

TABLA 5-3 Tirantes obtenidos en campo para la Fase I, que es la perteneciente a la cobertura de Pasto con Geoweb.

TABLA 5-4 Tirantes obtenidos en campo para la Fase II, que es la Fase con cobertura de Pasto.

TABLA 5-5 Tirantes obtenidos en campo para la Fase II, que es la Fase con cobertura de Pasto.

TABLA 5-6 Velocidades del flujo Escorrential en tres sectores del talud: Sector central, izquierdo y derecho.

TABLA 5-7 Erosión promedio por prueba y erosión acumulada a través del tiempo para un mismo caudal.

TABLA 5-8 Datos del pasto al momento de realizarse las pruebas tales como densidad de tallos por unidad de área y la altura promedio del pasto Kikuyo.

TABLA 5-9 Crecimiento del pasto o altura de este a través del Tiempo para 6 diferentes sectores de los taludes.

TABLA 5-10 Tasa de crecimiento de la raíz del Pasto Kikuyo.

TABLA 5-11 Propiedades físicas del suelo.

TABLA 5-12 Tirantes y velocidades para el canal revestido con Geoweb y pasto Kikuyo correspondiente a la Fase I.

TABLA 5-13 Tirantes y velocidades para el canal revestido con pasto Kikuyo correspondiente a la Fase II.

TABLA 5-14 Erosión promedio por prueba y erosión acumulada (Profundidad de erosión desde la primera prueba) para cada Fase.

TABLA 5-15 Crecimiento del pasto Kikuyo o altura de este a través del Tiempo.

TABLA 5-16 Tasa de crecimiento en profundidad de la raíz del pasto Kikuyo.

TABLA 5-17 Numero de Manning (n_l) para las coberturas de la Fase I y II, calculado en laboratorio (con fórmula de Manning) y número de Manning teórico (n_i) calculado con las ecuaciones de Temple (1987).

TABLA 5-18 Esfuerzo cortante total y efectivo para la cobertura de la Fase I.

TABLA 5-19 Esfuerzo cortante total y efectivo para la cobertura de la Fase II.

TABLA 5-20 Altura y Densidad del pasto Kikuyo en Juliaca (Lugar desde el cual fue traído el pasto) y Lima.

TABLA 5-21 Densidad de los pastos Kikuyo y Tanzania con Geoweb y sin éste.

TABLA 5-22 Tasa de crecimiento en profundidad de la raíz del pasto Kikuyo.

TABLA 5-23 Medición de la profundidad de erosión por prueba para la cobertura de pasto Kikuyo y Tanzania.

TABLA 5-24 Medición cualitativa de erosión por prueba para cada técnica de bioingeniería.

TABLA 5-25 Medición cualitativa de erosión por prueba para cada técnica de bioingeniería.

TABLA 5-26 Medición cualitativa de erosión por prueba para cada técnica de bioingeniería.

TABLA 5-27 Valores de la constante "K" de erosionabilidad del suelo y el factor "a" de la cobertura vegetal.

TABLA 5-28 Profundidades de erosión calculadas con las ecuaciones de Temple y hallada en el laboratorio, tanto para la fase I y II.

TABLA 5-29 Resumen de resultados según la bondad de ajuste.

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 4-1 Se observa el área completa del modelo e instalaciones auxiliares, las cuales se ubican en el Laboratorio Nacional de Hidráulica. 12

FOTOGRAFÍA 4-2 Se observan las bombas que impulsan el agua al tanque elevado y posteriormente al modelo físico. 12

FOTOGRAFÍA 4-3 Se tiene el Tanque elevado desde donde sale el flujo de agua hacia el modelo

FOTOGRAFÍA 4-4 Se observa la tubería de alimentación que interconecta el tanque elevado con el modelo físico

FOTOGRAFÍA 4-5 Tanque metálico el cual es utilizado para regular el caudal requerido para cada prueba, en este se encuentra el limnómetro y las válvulas para regular el caudal así como el vertedero de 90°

FOTOGRAFÍA 4-6 Pasto Kikuyo al costado del modelo, la foto fue tomada 4 días después de la siembra

FOTOGRAFÍA 4-7 Traslado del pasto Kikuyo al talud izquierdo, el cual se realizó utilizando cespedones.

FOTOGRAFÍA 4-8 Sembrado del pasto Kikuyo en el talud derecho en el cual se utilizó Geoweb para protegerlo, la técnica de sembrado del pasto fue mediante esquejes de pasto Kikuyo.

FOTOGRAFÍA 4-9 Se observa el pasto Kikuyo en su ambiente natural (Puno) desde donde fue traído para motivo de esta tesis.

FOTOGRAFÍA 4-10 Se observa La plataforma-puente que se utilizó para hacer mediciones hidráulicas y topográficas.

FOTOGRAFÍA 4-11 Se Observa el dispositivo corredizo que se deslizaba a lo largo de la plataforma-puente, este dispositivo contaba con una regla graduada para realizar diversas mediciones

FOTOGRAFÍA 4-12 Medición de la topografía del talud.

FOTOGRAFÍA 5-1 Se observan algunas de las botellas que sirvieron para determinar la tasa de enraizamiento.

FOTOGRAFÍA 5-2 Se observa como se desarrollaron las raíces en el fondo de las botellas.

FOTOGRAFÍA 5-3 Se observa que para los caudales de 5 y 10 l/s/m el pasto Kikuyo permanece erguido.

FOTOGRAFÍA 5-4 Para caudales mayores a 10 l/s/m se muestra como el Pasto Kikuyo empieza a doblarse, modificando así su comportamiento hidráulico.

FOTOGRAFÍA 5-5 Para el caudal de 70l /s/m se muestra como el pasto Kikuyo se dobla, modificando así su comportamiento hidráulico.

FOTOGRAFIA 5-6 Se observa el talud sometido a la prueba II-13, con caudal unitario = 25l/s/m, nótese que el Pasto ya se dobló totalmente y ofrece poca resistencia al flujo.

FOTOGRAFÍA 5-7 Se observa la FALLA del Talud para la prueba II-17, nótese la porción de cespedón volteada.

FOTOGRAFÍA 5-8 Toma cercana del flujo para la prueba II-17, en donde se nota la marcada turbulencia del flujo.

FOTOGRAFÍA 5-9 Toma del pasto Kikuyo en las afueras de la ciudad de Juliaca (pasto Kikuyo de 1 a 2.5 cm de altura).

FOTOGRAFÍA 5-10 Pasto Kikuyo establecido en el modelo, nótese el cambio en tamaño y densidad (pasto Kikuyo de 20-25 cm de altura).

FOTOGRAFÍA 5-11 Se observa el desarrollo de las raíces del pasto Kikuyo a través de los orificios de las geoceldas.

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este capítulo se describe la necesidad de la realización de esta tesis, la problemática y se dan las razones que motivaron esta investigación, finalmente se plantearan los objetivos generales y específicos de esta tesis, así como se colocara una breve descripción del contenido de esta.

1.1 PROBLEMÁTICA Y ANTECEDENTES

1.1.1 Problemática

Se sabe que la erosión hídrica es la responsable la pérdida de horizonte fértil de vastas áreas cultivables y de la formación de grandes erosiones y como consecuencia el régimen hidráulico de los ríos es alterado, comprometiendo todo el ecosistema de las cuencas hidrográficas; en las áreas urbanas, la erosión pone en riesgo las laderas de los cerros, las zonas ribereñas y compromete los sistemas viales y de drenaje; estas cuestiones, que son apenas mencionadas en épocas de crecientes y deslizamientos, consumen grandes cantidades de los presupuestos en refacción y mantenimiento de estructuras y lo más grave, muchas veces provocan la pérdida de vidas humanas . El transporte y el turismo son también sectores muy perjudicados por la erosión que interrumpe carreteras, destruye playas, embanca puertos, marinas, etc.

1.1.2 Antecedentes

Se han realizado investigaciones de laboratorio sobre todo en canales con vegetación con especies foráneas y en combinación con biotécnicas diversas; las cuales fueron realizadas por la USDA, Soil Conservation Service, 1947; Cox and Palmer, 1948 ; Ree and Palmer , 1949; Temple et al . , 1982, 1983, 1986, 1987; Birchall y Pinyan, 1986; Construction Industry research and Information Association ,1987. Investigaciones para calculo de coeficientes de descarga para aliviaderos vegetados han sido realizadas por Temple, 1988.

Asimismo se han hecho investigaciones para determinar la erodibilidad de canales con cobertura vegetal y sin esta, realizadas por G. J. Hanson , 1990 , 1991 ;y se ha analizado la mecánica del flujo a través de terraplenes por Chen and Anderson, 1986; Powledge ,1985; Miller, 1985; Ko. H. Y. , Dunn , 1984.

En Sudamérica se han realizado investigaciones para determinar la erosión bajo diferentes tipos de coberturas en los andes venezolanos hechas por Luz Amelia Sánchez, Michele Ataroff y Roberto López, 2002; y en Perú se ha realizado una investigación con la tesis: "Uso de la Bioingeniería de Suelos para el Control de Erosión Hídrica en Taludes" realizada por Luis Alberto De La Cruz en el Laboratorio Nacional de Hidráulica, 2005.

1.1.3 Necesidad

Es por eso que debido a las investigaciones realizadas con anterioridad se vio la imperiosa necesidad de realizar investigaciones con una especie adaptada al clima de los Andes peruanos, eligiéndose el pasto KIKUYO (*Pennisetum Clandestinum*), que es un pasto de origen africano ampliamente difundido en los Andes sudamericanos, el cual cuenta con propiedades y características importantes, las cuales la hacen una especie importante para el control de erosión hídrica, además que se propaga el uso de especies propias de la región adaptadas a las condiciones locales.

1.2 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Determinar la importancia de la revegetación de taludes para el control de la erosión hídrica.
- Realizar un análisis comparativo de diversas técnicas para el control de erosión hídrica, utilizando: Geoceldas con Kikuyo, y solo Kikuyo; todo esto en un modelo físico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar flujos hidráulicos críticos para velocidades y tiempos de escorrentía dados.
- Determinar la erodibilidad de un terreno protegido con kikuyo, y geoceldas para diferentes caudales y tiempos de escorrentía superficial.
- Determinar el rendimiento del Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*) en diferentes etapas de su crecimiento, para control de la erosión hídrica.
- Determinar la técnica de sembrado o colocación óptima del Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*) para un mejor desempeño en el control de erosión hídrica.
- Análisis de compatibilidad entre La geocelda con las componentes de vegetación.
- Medición cualitativa entre la cobertura de geoceldas y la cobertura con solo Kikuyo.

1.3 CONTENIDO DE LA TESIS

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este capítulo se describe la necesidad de la realización de esta tesis, la problemática y se dan las razones que motivaron esta investigación, finalmente se plantearan los objetivos generales y específicos de esta tesis, así como se colocara una breve descripción del contenido de esta.

CAPÍTULO 2.-REVISION DE LITERATURA

En este capítulo se muestra todas las consideraciones teóricas que se deben dar para el diseño de un canal o terraplén de tierra, reforzado con pasto para evitar la erosión hídrica y posibles consecuencias de ésta, también se dan

aplicaciones del uso del pasto y pasto reforzado como material de protección contra la erosión hídrica.

CAPÍTULO 3.- DESARROLLO TÉCNICO Y EXPOSICIÓN DE HIPÓTESIS

En este capítulo se determina la hipótesis y características del modelo, se dan los parámetros del cuál dependen los resultados de esta investigación, y se enuncian las ecuaciones matemáticas para su posterior contraste en el Capítulo 5.

CAPÍTULO 4.- CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ANÁLISIS Y DE PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS

En este capítulo se describe la fase experimental de la tesis, que en resumen consta de la fase de mejoramiento de estructuras y existentes, fase de mantenimiento y limpieza, fase de Instalación de coberturas vegetales y geosintéticas y la fase de Pruebas, así como también se mencionan los equipos y materiales utilizados, cabe resaltar que la fase de prueba duró del 16 de agosto al 28 de octubre del 2005.

CAPÍTULO 5.-ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE DATOS

En este capítulo se muestran las mediciones realizadas en campo después de realizar un primer procesamiento de datos, para la captación de datos se siguió el procedimiento descrito en el Capítulo 4. En la parte final se muestran los resultados luego de procesarlos según el Desarrollo Técnico, haciendo un análisis comparativo de las diferentes fases y analizando independientemente cada fase.

CAPÍTULO 6.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta parte de la tesis se realiza un resumen de los resultados de esta investigación y de los aspectos asimilados durante y después de realizar la tesis. En la parte final se explican los posibles aspectos que se podrían mejorar o implementar en esta investigación con la finalidad de ampliarla.

CAPÍTULO 2.-REVISIÓN DE LITERATURA

En el presente capítulo se muestra todas las consideraciones teóricas que se deben dar para el diseño de un canal o terraplén de tierra, reforzado con pasto o geosintéticos, para evitar la erosión hídrica y posibles consecuencias de ésta, también se dan aplicaciones del uso del pasto y pasto reforzado como material de protección contra la erosión hídrica.

2.1 CONSIDERACIONES HIDRÁULICAS

2.1.1 Conceptos en Flujo de Canales Abiertos

Tipos de Flujo:

El flujo en canales abiertos, puede ser clasificado de acuerdo a tres condiciones generales:

- 1.-Flujo uniforme.
- 2.-Flujo permanente y no permanente.
- 3.-Flujo subcrítico y supercrítico.

En flujos uniformes la altura y descarga, permanecen constantes a lo largo del canal. En flujo permanente, su descarga no cambia a través del tiempo. Los flujos más naturales son no permanentes y son descritos por Hidrogramas.

Que el flujo variará gradualmente puede ser asumido en la mayoría de los casos y por ende puede ser descrito como flujo permanente y/o flujo uniforme para periodos cortos de tiempo.

El flujo subcrítico difiere del supercrítico por un número adimensional llamado "número de Froude" (Fr), el cual es definido como el cociente de las fuerzas inerciales y de gravitación en el sistema. El flujo subcrítico ($Fr < 1$) es caracterizado como tranquilo y profundo, además con velocidad de flujo lento. El flujo supercrítico ($Fr > 1$) es caracterizado como rápido y poco profundo, además de tener una velocidad elevada. Para propósito de cálculo, se asume condiciones de flujo uniforme; donde la pendiente de energía es aproximadamente igual a la pendiente del canal. (Chow, V. T. ,1959)

Resistencia al Flujo

La profundidad de un flujo uniforme en una canal, depende de la rugosidad de cada revestimiento. Para propósitos prácticos se puede utilizar la ecuación de Manning, la cual proporciona una estimación confiable de condiciones de flujo

uniforme. Con una profundidad de flujo dada, d ; la velocidad media según el Sistema Internacional puede ser formulada así:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$$

Donde:

V = Velocidad media en la sección transversal (m/s).

n = coeficiente de rugosidad de Manning.

R = Radio hidráulico, (m); que es el cociente entre el área de la sección transversal (A) y el perímetro mejorado (P).

S_f = Pendiente de la línea de energía que es igual a la pendiente del canal por condiciones de flujo uniforme. (m/m)

La descarga en el canal es dada por la ecuación de continuidad:

$$Q = V.A$$

Donde A = área de flujo en el canal. (m^2)

Para canales anchos se tiene lo siguiente:

$$q = \frac{d^{5/3} S_f^{1/2}}{n}$$

Donde:

q = Es descarga por unidad de ancho del canal ($m^3/s/m$)

d = profundidad o tirante de flujo (m)

Un canal puede ser considerado hidráulicamente ancho, cuando la velocidad en el centro del canal, no es afectada por la fricción en los costados. En flujo supercrítico, se puede requerir un ancho de canal, por encima de 10 veces la profundidad del flujo y para flujo subcrítico se considera "canal ancho", si el ancho de este es 5 veces la profundidad del canal. Es importante enfatizar que la ecuación de Manning es derivada semi-empíricamente y simplemente suministra

una relación aproximada para la resistencia hidráulica. (Hewlett, H. W. M. Booman, L. A. y Bramley, M. E., 1987)

2.1.2 Influencia del Pasto en la Rugosidad Hidráulica

La rugosidad hidráulica de una superficie con pasto depende de las características físicas del este, tales como: Altura, rigidez, densidad y su interacción con el flujo.

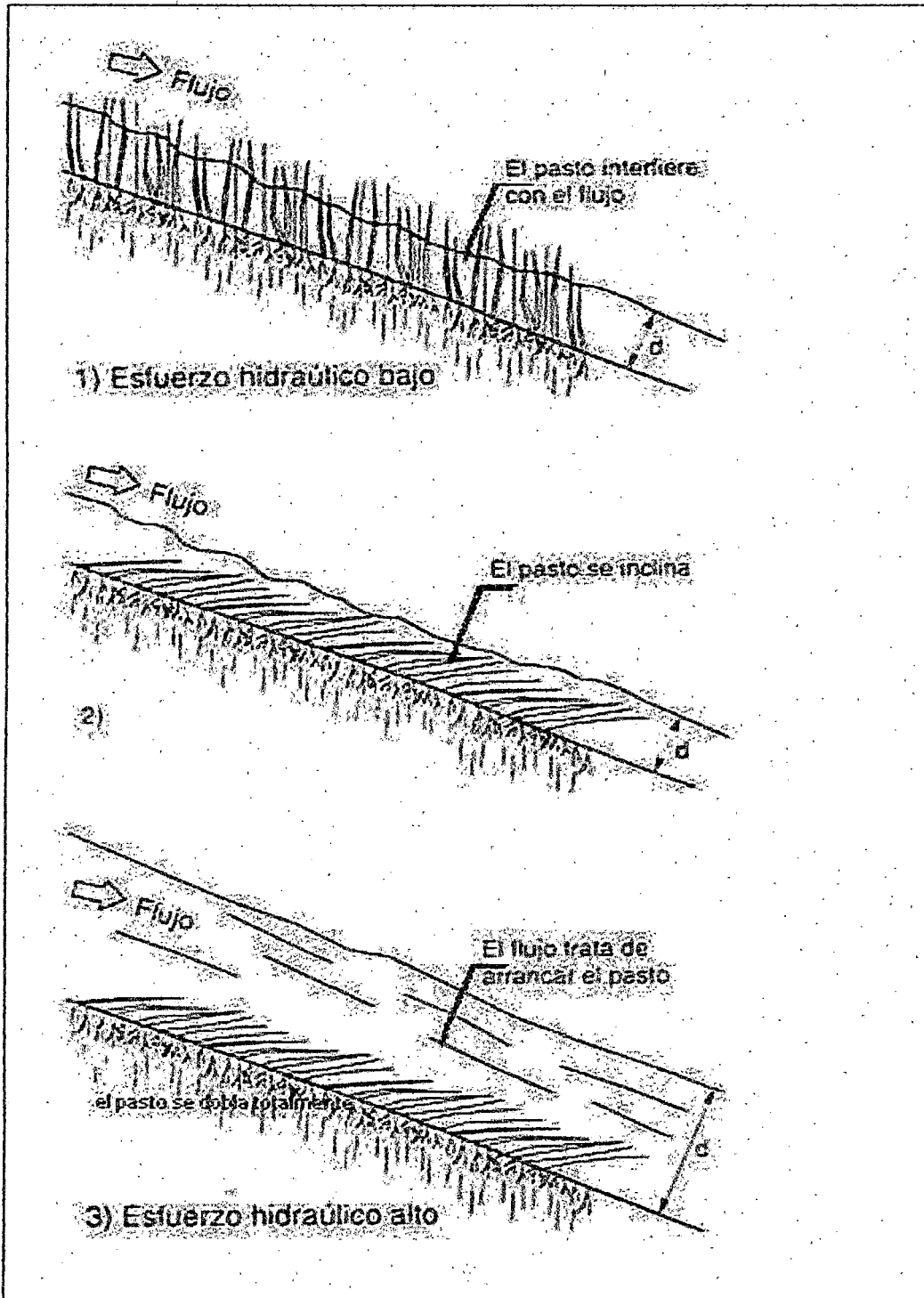
Esta interacción puede ser dividida en 3 regímenes básicos, acordes a la carga hidráulica (Ver FIGURA 2-1):

1.-La profundidad del flujo es significativamente menor que la altura de la vegetación, la cual no es deflectada; además la velocidad en la superficie del suelo es baja, debido al efecto de interferencia de la vegetación.

2.-El efecto combinado del incremento de la velocidad y profundidad del flujo, origina que la vegetación se deflece y oscile en el flujo.

3.-La velocidad es suficientemente alta para doblar la vegetación, lo cual producirá una superficie relativamente alisada debido a la vegetación aplanada producto del flujo. La altura efectiva de la vegetación es entonces considerablemente menor que su altura natural. Este es un régimen que se encuentra generalmente en canales con pendientes pronunciadas u otras aplicaciones con velocidades elevadas de flujo.

FIGURA 2-1 Efectos de los esfuerzos del flujo de agua sobre una cobertura de pasto. (Adaptado de Gray, D. y Sotir, R., 1996)



2.1.3 Efecto del Refuerzo en la Rugosidad Hidráulica

Existe insuficiente justificación para garantizar diferentes valores de rugosidad hidráulica, para diferentes sistemas de pasto reforzado y revestimientos de solo pasto.

En pasto reforzado con geotextiles, geosintéticos o concreto, en donde el pasto es lo suficientemente grande para cubrir el refuerzo, la superficie presentada al flujo, es la misma que para revestimiento de pasto sin refuerzo.

En canales de pasto con geotextiles, geosintéticos o concreto, en los cuales, el pasto es insuficientemente largo o denso para cubrir el concreto, geotextil o geosintético, se presentarán diferentes texturas en la superficie y niveles de lecho; en teoría, esto podría afectar la rugosidad hidráulica, en especial en las irregularidades presentadas; pero en la práctica, los ensayos de campo han demostrado que no hay una consistente variación entre el revestimiento con solo pasto y el revestimiento de pasto reforzado. (Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E., 1987)

2.1.4 Rugosidad Hidráulica en Vegetación para Pendientes Menores que 1/10

Kouwen en 1980, desarrolló una ecuación para "n" a partir de la ley universal - velocidad - distribución, dando como resultado la ecuación.

$$n = \frac{R^{1/6}}{C + 19.97 \log(R^{1.4} S^{0.4})}$$

Donde: Las unidades a usar, son del sistema Ingles.

R = Radio hidráulico.

S = Pendiente de la línea de energía.

C = $19.97 \log(44.8 h^{0.6} MEI^{-0.4})$, depende de la clase de vegetación y "h" Y "MEI" son coeficientes de retardanza que se muestran en las TABLAS 2-1, 2-2 Y FIGURAS 2-2, 2-3, 2-4, 2-5 y 2-6.

TABLA 2-1 Parámetros de rugosidad relativa para vegetación

Tipo de Retardanza	Altura		Rigidez	
	Promedio, h		MEI	
	(ft)	(cm)	(lb*ft ²)	(Newton*m ²)
A	3	91	725	300
B	2	61	50	20
C	0.66	20	1.2	0.5
D	0.33	10	0.12	0.05
E	0.13	4	0.012	0.005

Fuente: Adaptado de Kouwen, N., Unry T. E. y Hill, H. M., (1980).

TABLA 2-2 Clasificación de las coberturas vegetales según el grado de retardanza.

Tipo de Retardanza	Cobertura	Condición
A	Pasto Llorón (<i>Erogrósis Curvula</i>).....	Postura excelente, altura promedio 76 cm.
	Angletón o Gordo (<i>Bathriochloa ischaemum</i>).....	Postura excelente, altura promedio 91cm
B	Kudzu(<i>Pueraria Lobata</i>)	Crecimiento muy denso , sin cortar
	Pasto Bermuda.....	Postura buena, altura promedio 30cm
	Mezcla de pastos nativos (<i>Schizachyrium scoparium</i> , <i>Andropogon Bathriochloa</i> , Mosquito (<i>Boutelova Gracilis</i>), y otros largos y cortos pastos del medio este.....	Postura buena, inalterado.
	Pasto Llorón (<i>Erogrósis Curvula</i>).....	Postura buena, altura promedio 61 cm.
	Lespedeza sericea (<i>Lespedeza Cuneata</i>).....	Postura buena, no leñoso, altura promedio 48 cm.
	Alfalfa.....	Postura buena, sin corte, altura promedio 28 cm.
	Pasto Llorón (<i>Erogrósis Curvula</i>).....	Postura buena, altura promedio 33 cm.
	Kudzu.....	Crecimiento denso, sin corte.
	Mosquito (<i>Boutelova Gracilis</i>).....	Buena postura, si corte, altura promedio 28 cm.
	C	Gramma.....
Pasto Bermuda.....		Postura buena, inalterado, altura promedio 15cm
Lespedeza común (<i>Lespedeza Capitata</i>).....		Postura buena, sin corte, altura promedio 28cm
Mezcla de pasto-legumbre-verano(pasto de huerta, <i>Agrotisalba</i> , <i>Ryegrass</i> italiano y lespedeza común(<i>Lespedeza Capitata</i>)		Postura buena , sin corte altura de 15 a 20 cm.
Pasto ciempiés.....		Cobertura muy densa, altura promedio 15cm.
Pasto azul Kentucky.....		Postura buena, altura promedio 15 a 30 cm.
D	Pasto Bermuda.....	Postura buena, corte a 6 cm.
	Lespedeza común (<i>Lespedeza Capitata</i>).....	Postura excelente, sin corte ,altura promedio 11cm.
	Pasto Búfalo.....	Postura buena , sin corte, altura de 8 a 15 cm.
	Mezcla de Pasto-legumbre-primavera otoño (pasto de huerta, <i>agrotisalba</i> , <i>ryegrass</i> italiano, y lespedeza común).....	Postura buena, sin corte , altura de 10 a 13 cm.
	Lespedeza sericea (<i>Lespedeza cuneata</i>).....	Después del corte a 5 cm. Postura muy buena antes del corte.
E	Pasto Bermuda.....	Postura buena , corte a 4 cm.
	Pasto Bermuda.....	Rastrojo quemado.

Fuente: Adaptado de Chen, Y. H. y Cotton G. K., (1988) (Nota :La clasificación de las coberturas han sido probadas mediante experimentos en canales, las coberturas estuvieron verdes y generalmente uniformes) .

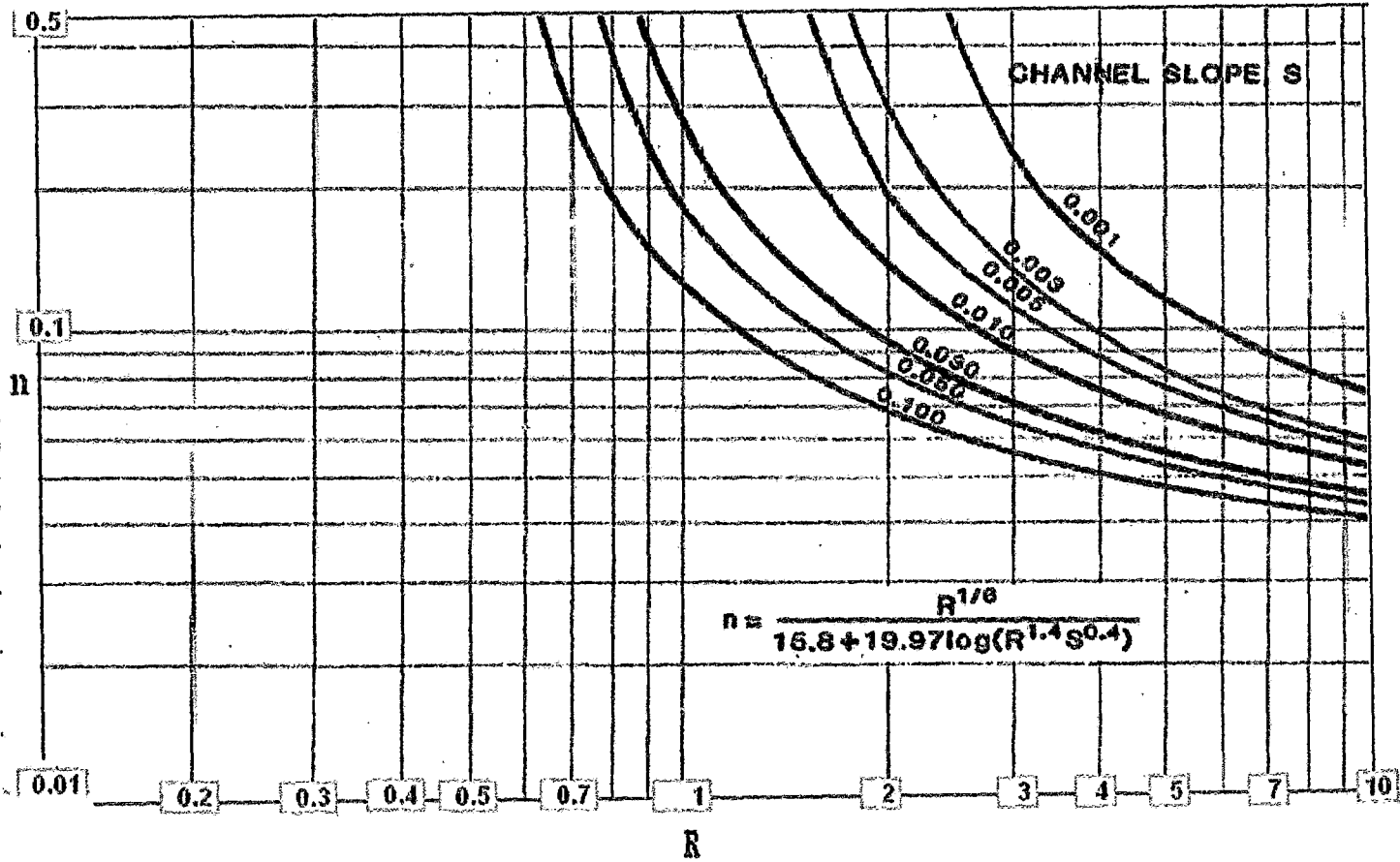


FIGURA 2-2 Número de maning , n ,versus Radio hidraulico , R , para vegetacion de tipo A; todo en unidades inglesas
 Fuente: Adaptado de Chen, Y. H. y Cotton, G. K., (1988).

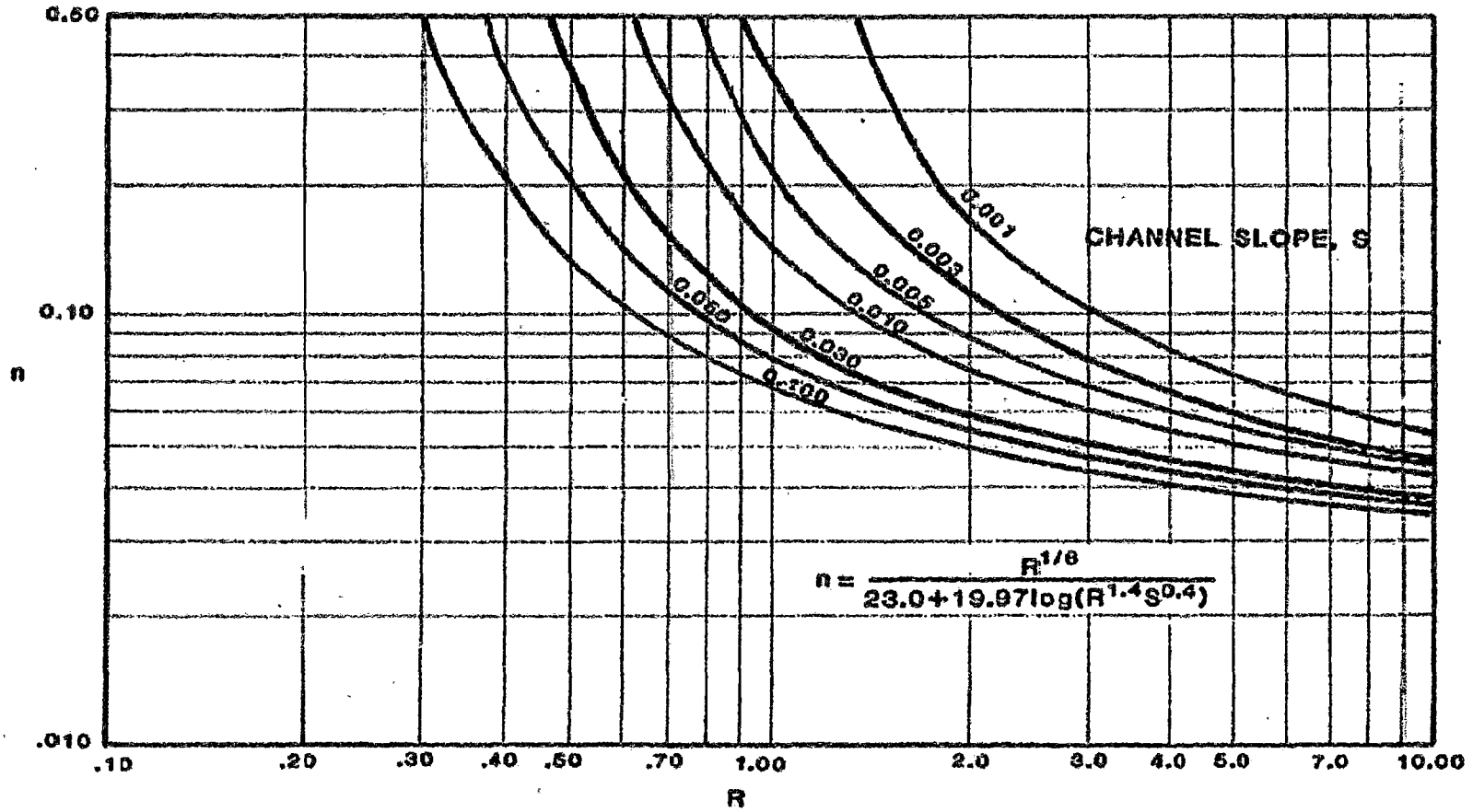


FIGURA 2-3 Número de maning n, versus Radio hidraulico , R , para vegetacion de tipo B; todo en unidades inglesas .
 Fuente: Adaptado de Chen, Y. H. y Cotton, G. K., (1988).

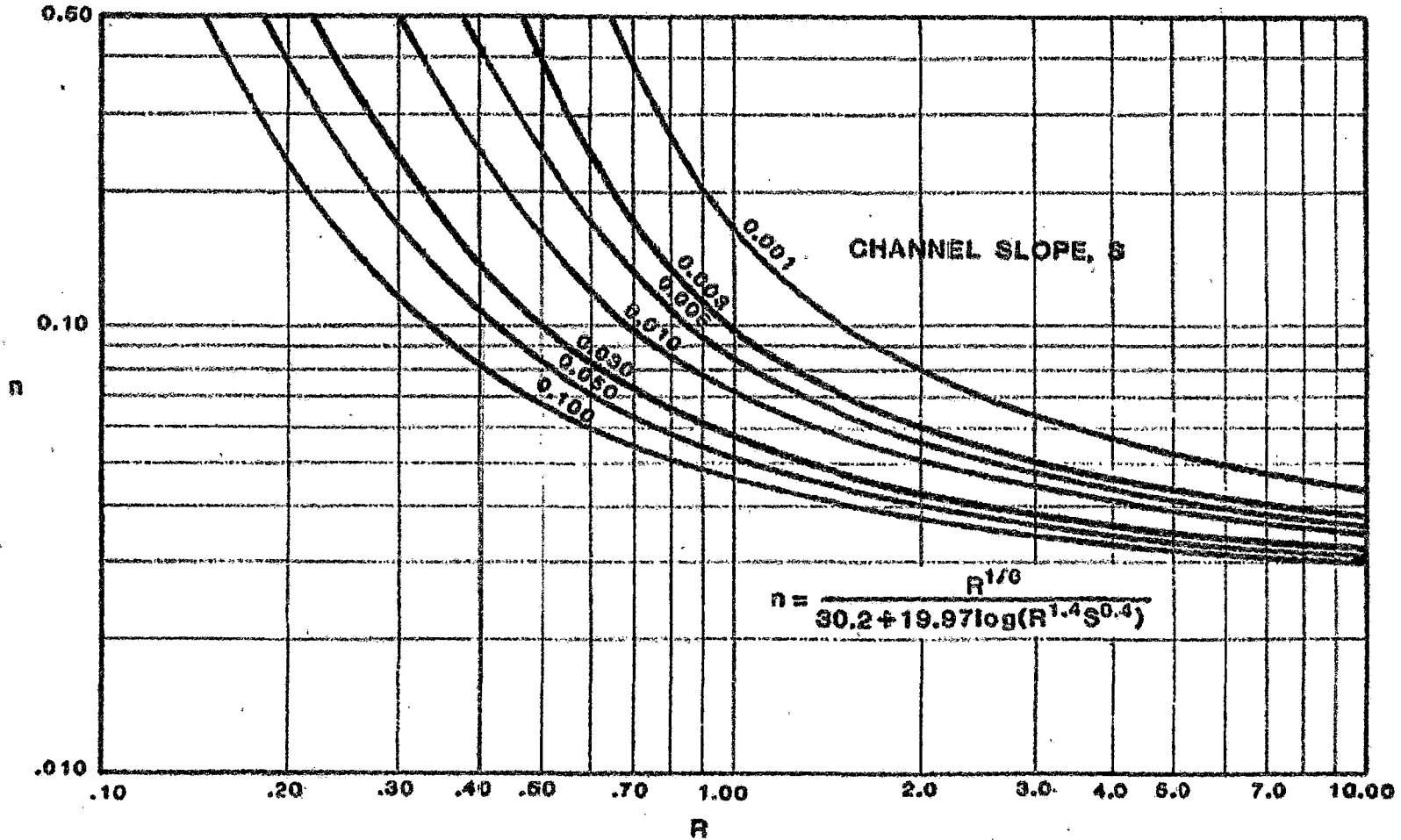


FIGURA 2-4 Número de maning n, versus Radio hidráulico , R , para vegetacion de tipo C; todo en unidades inglesas
 Fuente: Adaptado de Chen, Y. H. y Cotton, G. K., (1988).

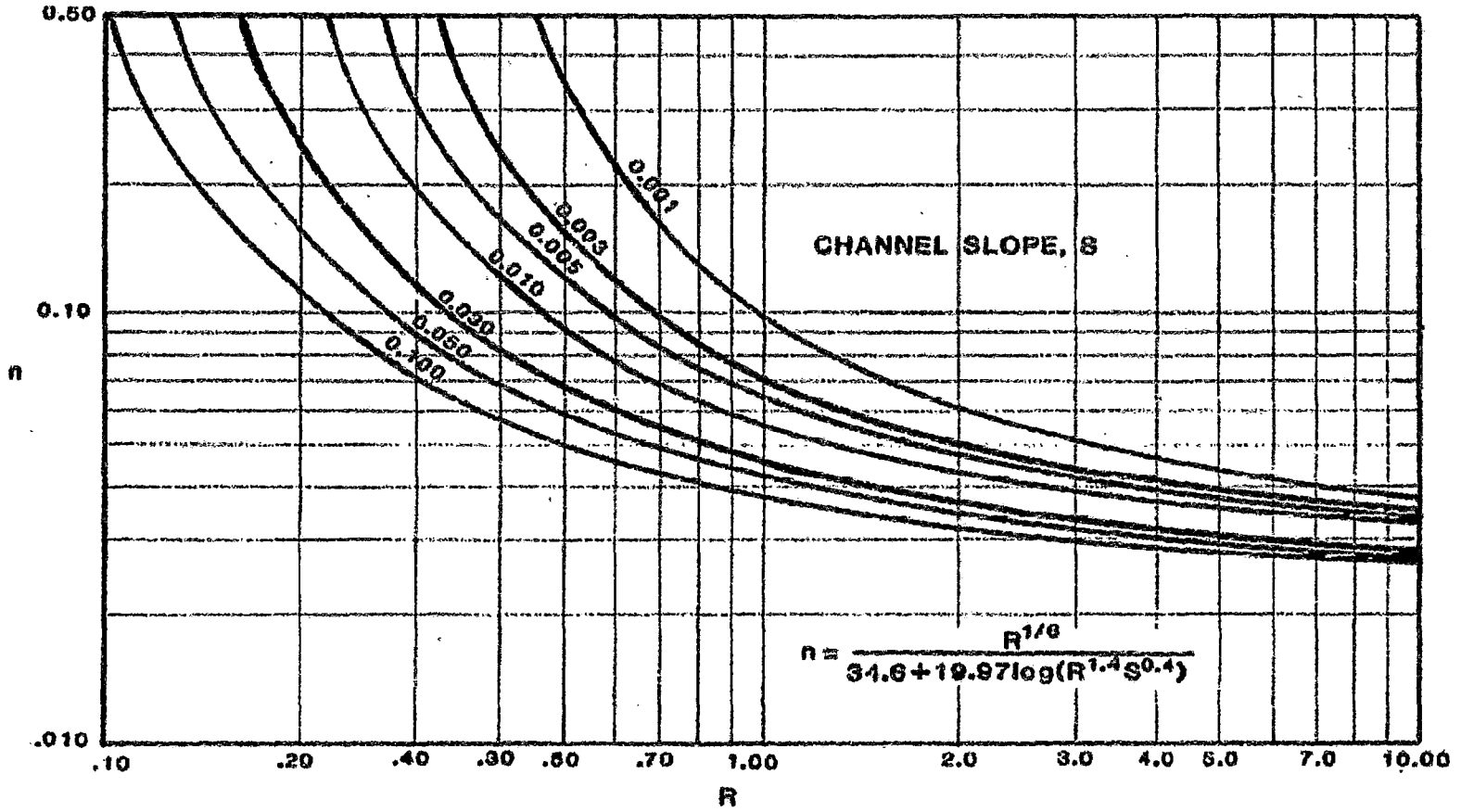


FIGURA 2-5 Número de maning n, versus Radio hidraulico , R , para vegetacion de tipo D; todo en unidades inglesas
 Fuente: Adaptado de Chen, Y. H. y Cotton, G. K., (1988).

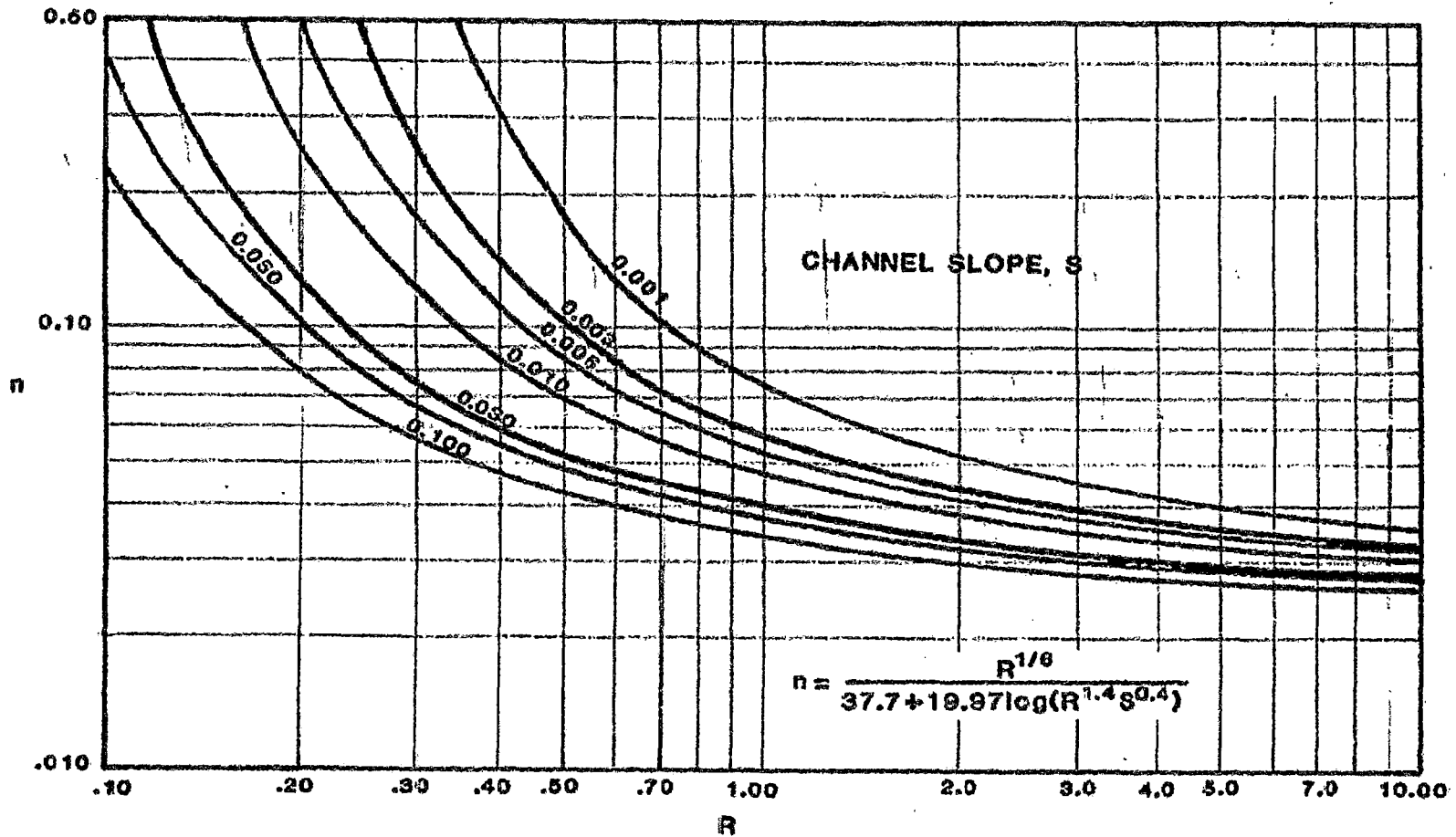


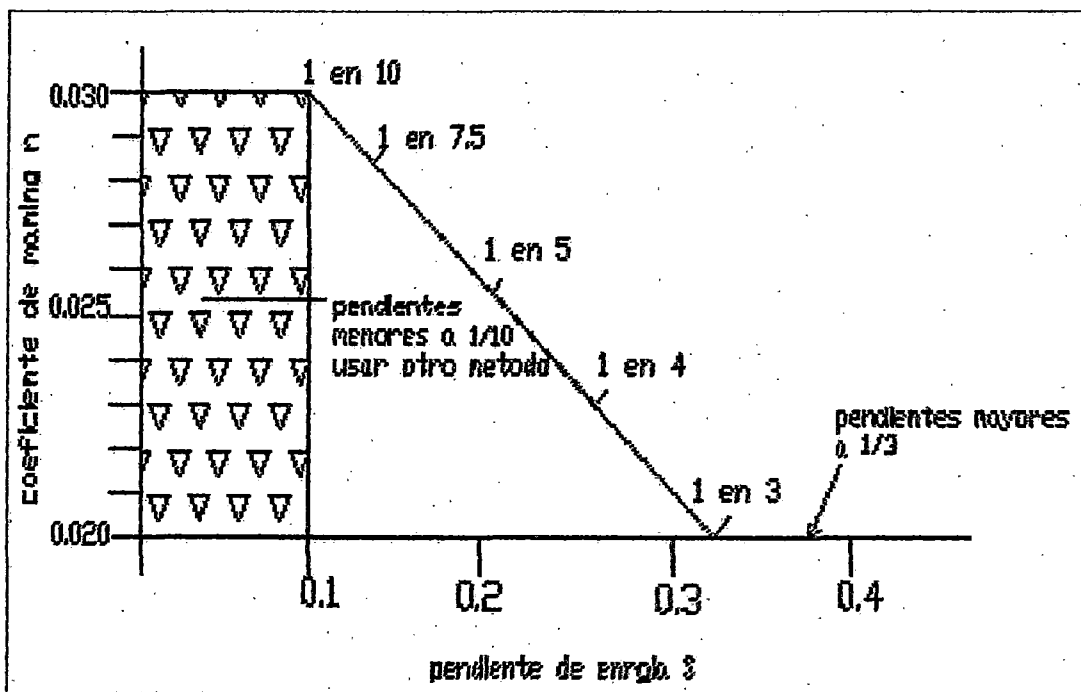
FIGURA 2-6 Número de maning n , versus Radio hidráulico, R , para vegetación de tipo E; todo en unidades inglesas
 Fuente: Adaptado de Chen, Y. H. y Cotton, G. K., (1988).

2.1.5 Rugosidad Hidráulica para Pendientes Mayores que 1/10.

Con pendientes pronunciadas, el pasto tiende a doblarse debido al flujo a través de un rango normal de descargas de diseño.

Bajo estas condiciones al coeficiente de Manning aparenta ser independiente de la carga hidráulica y de la longitud del pasto; y varía sólo con la pendiente del canal. Basándonos en los ensayos de campo del CIRIA en el Reporte 116 (1987); el valor recomendado del coeficiente de Manning es 0.030 para pendientes de 1:10, y valores de 0.02 para pendientes mayores de 1:3; estos valores se pueden observar más detalladamente en el FIGURA 2-7.

FIGURA 2-7 Coeficientes de Manning recomendados para pendientes con pasto que tengan inclinación mayor a 1/10 (Adaptado de Gray, D, y Sotir, ,1996).



Existe otro modelo matemático que toma más factores que afectan al número "n" tales como: La densidad, altura del pasto y el caudal por ancho unitario; siendo este modelo dado por Temple, 1987.

$$n = \begin{cases} 1. - \exp\left[C_1 \left[0.0831 \ln^2(C_1) - 0.637 \ln(C_1) + 1.346\right] - 4.16\right] \\ \quad \text{para } \frac{q}{cu} < 0.0025 C_1^{2.5} \\ 2. - \exp\left[C_1 \left[0.0133 \ln^2\left(\frac{q}{cu}\right) - 0.0954 \ln\left(\frac{q}{cu}\right) + 0.297\right] - 4.16\right] \\ \quad \text{para: } 0.0025 C_1^{2.5} < \frac{q}{cu} < 36 \\ 3. - \exp\left[0.126 C_1 - 4.16\right] \\ \quad \text{para: } 36 < \frac{q}{cu} \end{cases}$$

C_1 es estimado de: $C_1 = 2.5 (h \sqrt{M})^{1/3}$

Donde:

q = La descarga unitaria en volumen por tiempo unitario y por ancho unitario

n = Coeficiente de Manning

s = Pendiente de energía

C_1 = La curva de retardanza

h = La longitud representativa del tallo del vegetal (m)

M = El promedio de tallos por unidad de área (#de tallos/m²)

cu = una constante que depende del sistema de unidades ($cu = 1 \text{ ft}^2/\text{s} = 0.093 \text{ m}^2/\text{s}$)

Las unidades de cada variable pueden darse en el sistema internacional o el ingles, excepto para el cálculo del C_1 , en la que todas sus variables se encuentran en el sistema internacional.

2.1.6 Esfuerzo Cortante Actuante

Se sabe que el esfuerzo cortante promedio esta dado por la ecuación (Chen y Cotton, 1988):

$$\tau = \gamma_w * R * S$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante o esfuerzo de tracción (N/m^2)

γ_w = Peso específico del agua $\left(9810 \frac{N}{m^3} \right)$

R = Radio Hidráulico (m)

S = Pendiente promedio del talud (m/m).

El máximo esfuerzo cortante τ para un canal recto, ocurre en la parte central de la cama de éste y esta dado por la siguiente ecuación:

$$\tau = \gamma_w * d * S$$

Donde:

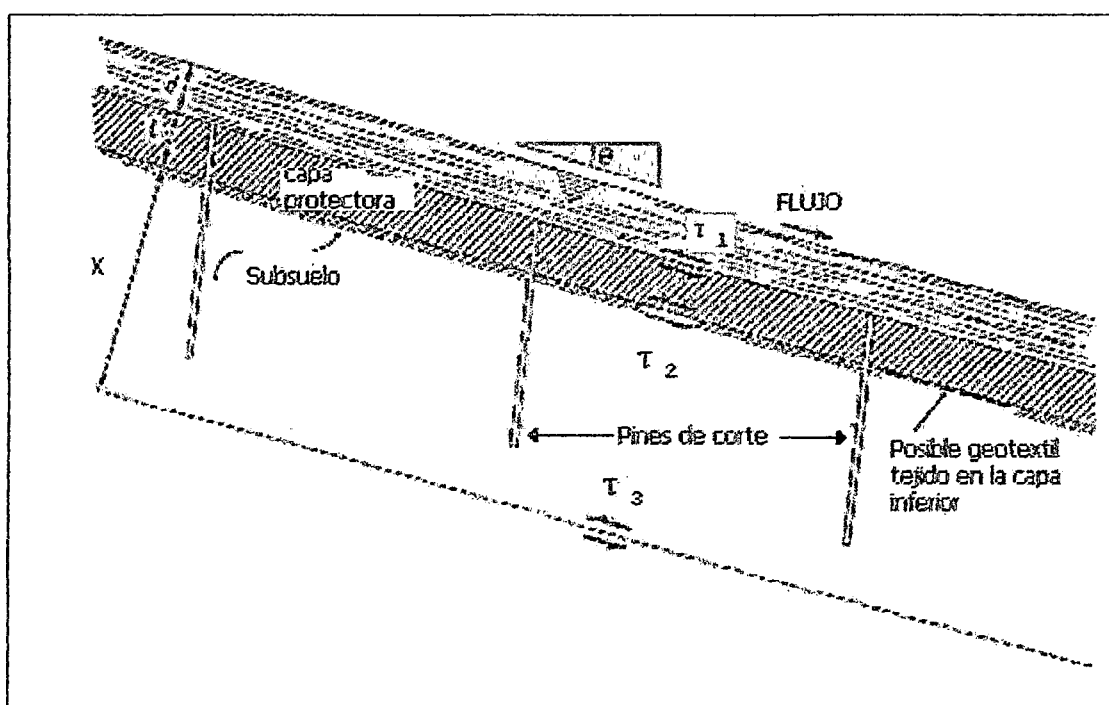
τ = esfuerzo cortante (N/m^2)

d = Tirante del flujo (m)

Esfuerzos de corte en canales reforzados y revestidos con pasto.

Considerar una sección típica de un canal reforzado con pasto y otra capa protectora (Geotextil, concreto, etc.) con una pendiente pronunciada sujeto a un alto flujo de velocidad. (Ver FIGURA 2-8)

FIGURA 2-8 Fuerzas de corte en un típico canal reforzado con pasto (Adaptado de Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E. ,1987).



Se asume que condiciones de flujo uniforme han sido alcanzadas en un canal ancho y las fluctuaciones de presión en los bordes debido a la turbulencia, son obviadas.

- Esfuerzo de corte en la interfase, agua / capa protectora (superficie de fuerza de arrastre)

$$\tau_1 = \gamma_w * d * \text{sen } \theta.$$

- Esfuerzo de corte en la interfase capa protectora / subsuelo

$$\tau_2 = (\gamma_w * d + \gamma_a * t) * \text{sen } \theta.$$

Donde:

γ_w y γ_a son respectivamente pesos específicos del agua y de la capa protectora.

- Presión normal a la interfase capa protectora / subsuelo debido al peso sumergido de la capa protectora es:

$$P = t (\gamma_a - \gamma_w) * \cos \theta.$$

- El esfuerzo de corte restrictivo para resistir el movimiento de la capa protectora con respecto al subsuelo (este en la interfase capa protectora subsuelo) es :

$$\tau_0 + \tau_m + \mu * P$$

Donde:

τ_0 es la resistencia de corte suministra por las raíces del pasto.

τ_m es la restricción mecánica de corte suministrada por pines .

μ es el coeficiente de fricción entre la capa protectora y el subsuelo o la capa inferior del geotextil tejido si este es suministrado; un valor típico para μ en el último caso esta entre 0.45 y 0.5 (Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E. ,1987).

- Para evitar algún movimiento de la capa protectora con respecto al suelo se debe cumplir :

$$\tau_0 + \tau_m + \mu * t * (\gamma_a - \gamma_w) * \cos \theta > (\gamma_w * d + \gamma_a * t) * \sin \theta$$

- El esfuerzo de corte a cualquier profundidad " x " en el subsuelo debajo de la formación (Conjunto resistente conformado por el suelo , raíces del pasto y otros aditamentos mecánicos), asumiendo que el subsuelo esta completamente saturado a esa profundidad, es :

$$\tau_3 = (\gamma_w * d + \gamma_a * t + \gamma_s * x) * \sin \theta$$

Donde:

γ_s es el peso específico del subsuelo saturado.

Para que ningún movimiento pueda ocurrir a lo largo de un plano de falla poco profundo, τ_3 debe ser excedida por las fuerzas de restricción, las cuales dependen de la densidad y resistencia del subsuelo es decir de los parámetros C' y ϕ' del suelo.

2.1.7 Número de Froude

Las condiciones de flujo son supercríticas, críticas o subcríticas dependiendo si el número de Froude es más grande, igual o menor que la unidad respectivamente, así tenemos (Chow, V. T. ,1959):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{g^* D^* \cos \theta}{\alpha}}}$$

Donde:

V = Velocidad promedio del flujo (m/s)

D = Profundidad media que es igual al área de la sección transversal al flujo entre el ancho superficial (surface width)

g = La aceleración debido a la gravedad (m/s^2)

θ = ángulo del lecho del talud

α = Factor de corrección de energía cinética; $\alpha = 1.05$ para flujos Turbulentos.

Para pendientes poco pronunciadas en canales anchos y bajas velocidades ($S < 1:10$ y $V < 3m/s$) el número de Froude es aproximadamente.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g^* d}} \quad \text{donde } d = \text{profundidad de flujo.}$$

Flujo Supercrítico

Para una pendiente y descarga dada, si las condiciones de flujo uniforme son supercríticas, entonces el talud es llamado hidráulicamente pronunciado. Considerado el rango de intensidad de descarga usualmente encontrado en el diseño de canales con pasto, cualquier canal con pendiente mayor a 1:50 es probablemente hidráulicamente pronunciado (Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E. ,1987).

Los siguientes aspectos del flujo supercrítico deben ser notados:

1. Al menos que ocurra un salto hidráulico y el flujo llegue a ser subcrítico, el flujo es controlado por condiciones aguas arriba y no por condiciones aguas abajo.
2. La energía producto de la velocidad es más grande en relación con aquella originada por la profundidad del flujo. En pendientes de terraplenes pronunciados el número de Froude podría ser más alto que 8 y la energía específica del flujo está principalmente contenida en la velocidad en oposición a la profundidad del flujo. Lo que podría producir presiones elevadas y consecuentemente elevaría nuestra preocupación por las fuerzas de arrastre y levantamiento en canales protegidos con pasto.
3. Con números de Froude en el rango de 1 a 1.75, la superficie del agua podría estar sujeta a olas estáticas las cuales pueden incrementar el requerimiento por el borde libre.
4. Con todos los flujos supercríticos, los cambios en las secciones de los canales deberían ser evitadas en la mayor cantidad de casos posibles.

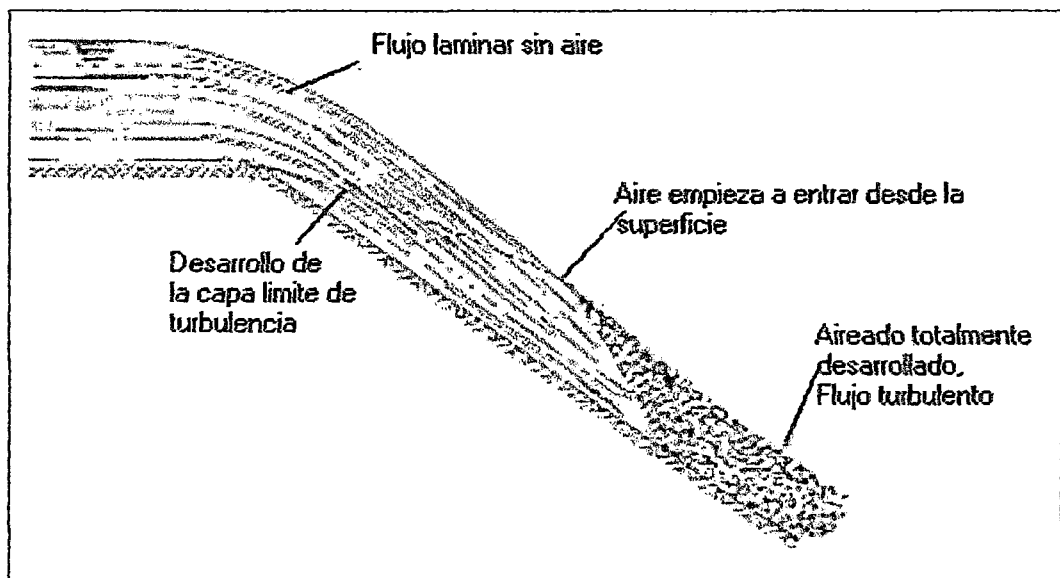
Turbulencia

En la cima del canal, donde el flujo se acelera desde las condiciones relativamente estáticas aguas arriba de la cresta, la condición del flujo a través el fluido será laminar (la cual es una característica de flujos de fluidos viscosos). Esta condición es inherentemente inconstante, por lo que generalmente se desarrollaran condiciones de flujo turbulento aguas abajo (Ver FIGURA 2-9).

El grado de turbulencia de cualquier punto puede ser considerado como una medida de las desviaciones instantáneas, en las velocidades de las partículas del fluido.

Las fluctuaciones de la turbulencia de la velocidad ocurren en las 3 dimensiones, dando un incremento de las fluctuaciones de presiones en el flujo. Además se sabe que las condiciones de turbulencia incrementan el volumen específico del agua, debido al aire atrapado; resultando en un incremento de la profundidad del flujo, que por lo general aumenta en 40% o más con respecto al tirante que se produce cuando el tirante es no aireado, esto bajo condiciones de flujo altamente turbulento. (Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E., 1987).

FIGURA 2-9 Desarrollo de un flujo totalmente aireado (Adaptado de Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E., 1987).



2.1.8 Acción de las Fuerzas Hidrodinámicas en el Canal

Las fuerzas generadas por el flujo en la superficie del canal revestido con pasto o en la capa protectora de un canal reforzado con alguna biotécnica, son las que se muestran a continuación (FIGURA 2-10):

1. **Fuerza de arrastre:** Es la fuerza de corte, que actúa en la dirección del flujo en el perímetro del canal. En condiciones de flujo uniforme, el esfuerzo de corte promedio actuante en el perímetro puede ser calculado como se muestra en el ítem. 2.1.6. Se debe tener en cuenta que si la superficie es relativamente lisa o llana, el arrastre es debido a la fricción superficial, en cambio si existe una obstrucción aislada (tal como una parte de geotextil, suelo, colchoneta de raíz o bloques de concreto) que es expuesta al flujo, la superficie de arrastre local puede incrementarse sustancialmente debido a la presión de arrastre.

2. **Fuerza de empuje:** Es una fuerza que actúa perpendicular a la dirección del flujo. Las fuerzas de empuje pueden ser generadas por patrones locales de flujo en canales abierto o por falta de balance entre presiones en cualquier lado de la capa protectora.

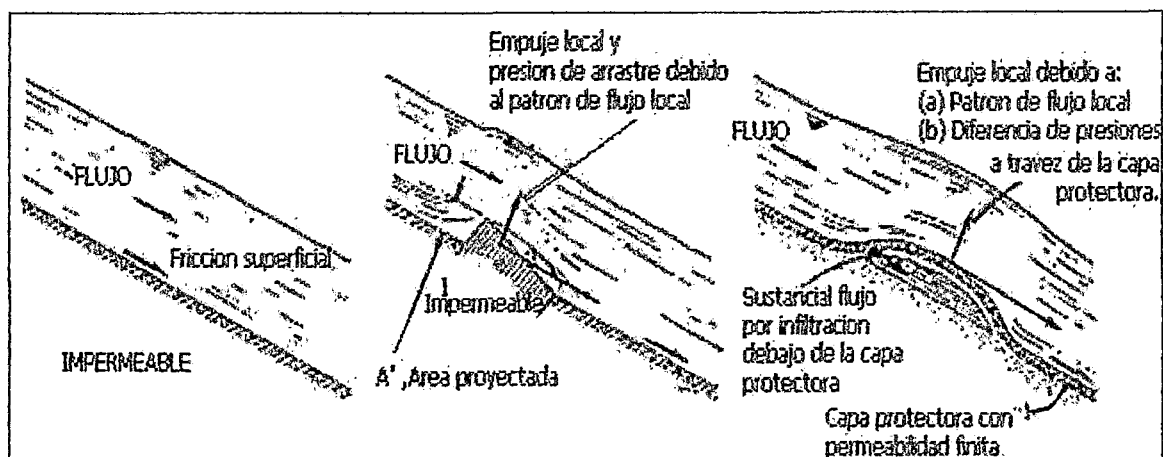
En flujo turbulento la diferencia de presión es inestable y su magnitud es afectada por:

- (a) El grado de turbulencia en el flujo

- (b) La permeabilidad del subsuelo o alternativamente la presencia de un vacío entre la capa protectora y el suelo en el cual la infiltración puede ocurrir.

De lo cual se puede decir, que el empuje y arrastre localizados pueden variar sustancialmente de las principales fuerzas actuantes encima de una amplia área.

FIGURA 2-10 Fuerzas hidrodinámicas en una canal revestido (Adaptado de Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E., 1987).



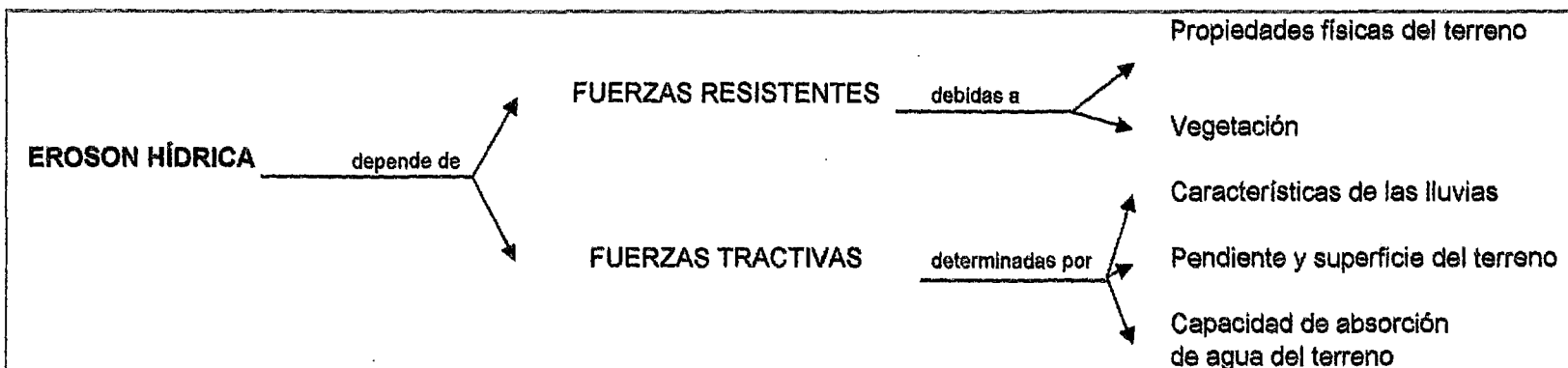
2.1.9 Tipos de Erosión

Al nivel global de la superficie terrestre, los diferentes tipos de erosión pueden agruparse en seis categorías: Erosión hídrica, erosión eólica, erosión fluvial, erosión marina y litoral, erosión glacial y erosión kárstica.

A la escala reducida de un talud y zonas aledañas, los únicos que revisten importancia son: La erosión eólica y sobre todo la erosión hídrica, producida por las gotas de lluvia que impactan sobre el terreno disgregando partículas que son arrastradas por las aguas de escorrentía, cuya proporción en el ciclo hidrológico es mayor, ya que la compactación a que se ven sometidos los materiales para la construcción de terraplenes, capas de rodadura, diques y escombreras, o por el paso de la maquinaria empleada, origina que se formen costras impermeables que hacen que disminuya la infiltración de agua en el subsuelo. (Kirkley, M. J. y Morgan, R. P. C., 1984). En la presente sección nos limitaremos solamente a dar conceptos relacionados a la erosión hídrica por ser objeto de esta tesis.

Erosión Hídrica

Es aquella en la que los procesos de disgregación, denudación y transporte de la roca o suelo, son efectuados por el agua. La erosión hídrica tiene lugar por arroyada superficial, ya sea difusa o concentrada, viéndose afectada por una serie de factores que se han resumido y esquematizado en la Figura 2-11.

FIGURA 2-11 Factores que afectan la erosión hídrica (Del Val, J. ,1989.)

De FIGURA 2-11 se observa que la erosión hídrica depende de fuerzas resistentes y tractivas, las fuerzas resistentes son aquellos factores que resisten la erosión hídrica de un suelo, estos factores son la cohesión y granulometría del suelo así como la vegetación; las fuerzas tractivas son aquellos factores que ante su presencia o accionar, la erosión hídrica se incrementa con la consiguiente pérdida de material del suelo, estos factores son: La pendiente y superficie del terreno, las lluvias y la capacidad de absorción de agua del terreno, cuyo efecto favorable a la erosión se manifiesta cuando la absorción del terreno es baja con el consiguiente discurrimiento de mayor volumen de agua.

En lo referente a su forma de manifestarse se diferencian cuatro modalidades o tipos erosivos:

1.-Erosión laminar o en manto

Consiste en una remoción de delgadas capas de suelo producida por el agua que discurre por terrenos uniformes y de poca pendiente, provocando la pérdida de la porción de suelo con mayor contenido en materia orgánica, lo que conduce a un empobrecimiento en elementos nutrientes y a un descenso de la capacidad de almacenamiento de agua.(Howell et al , 1979)

La erosión laminar es poco perceptible en las primeras fases, ya que apenas se modifica la superficie del suelo; pero con el tiempo se produce una concentración importante de gravas y guijarros en esa superficie, las raíces de los arbustos y otras plantas menores quedan al descubierto y se produce acumulación de suelo en el tramo final de los terrenos en pendiente.

En la erosión laminar actúan dos procesos: El desprendimiento y arranque de partículas del suelo por efecto del impacto directo de las gotas de lluvia, ocasionando su desplazamiento por salpicadura y el transporte por una delgada lámina de agua denominada flujo laminar.(Gray D. y Sotir R.,1996)

2.-Erosión por arroyada anastomosada o trenzada

La lámina de agua no suele discurrir a mucha distancia, ya que lo más común es que se concentre en las pequeñas depresiones e irregularidades del terreno, formando pequeños hilillos de corriente no jerarquizado y de trayectoria cambiante.

Los efectos de este tipo de erosión sobre la superficie del terreno son similares a los producidos por el flujo laminar.

3.-Erosión en regueros o surcos

Los hilillos de corriente de trayectoria cambiante se van concentrando a favor de las líneas de máxima pendiente del terreno apareciendo concentraciones de flujo y aumentos de la velocidad del agua con el consiguiente incremento de la potencia erosiva, llegándose a abrir pequeñas incisiones longitudinales, de hasta 30 cm. de profundidad, con sección en forma de U o de V denominados regueros o surcos.

Este tipo de erosión se ve favorecido por la caída de aguaceros intensos y por la existencia de una erosión laminar, o por arroyada difusa previa. Durante este tipo de erosión se da las mayores pérdidas de suelo debido a la lluvia (Schwab et al., 1981).

4.-Erosión en cárcavas o barrancos

Si las pequeñas incisiones por las que circula el agua en el terreno no se eliminan (por meteorización o por laboreo), éstas irán progresando en el sentido de aguas arriba, captando desprendimientos de materiales de mayor tamaño debido a su falta de cohesión por exceso de humedad, llegando a producir profundas incisiones, de más de 30 cm hasta varios metros de profundidad, con secciones en forma de U, de V, o una combinación de ambas (López, C. J., 1999).

Las cárcavas se producen en terrenos que previamente han sufrido alguna de

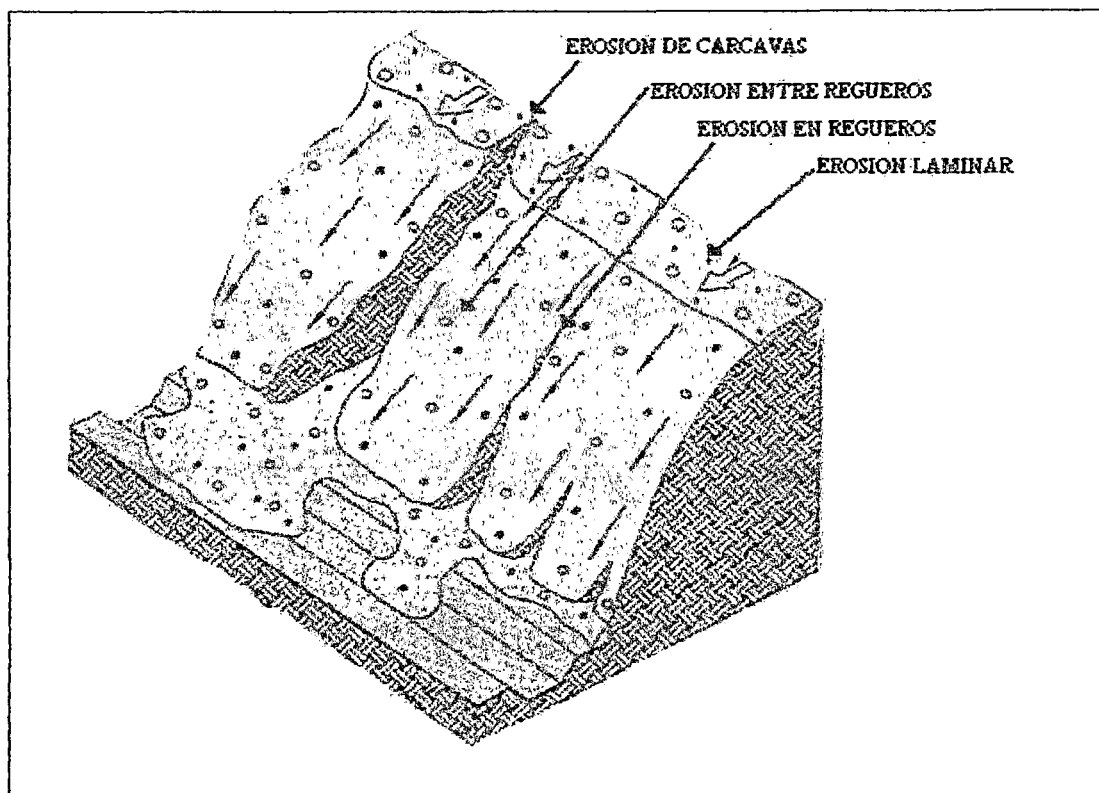
las anteriores modalidades de erosión. Crecen en profundidad y en anchura por erosión de la corriente de agua y de los materiales que ésta arrastra, por la caída de agua en la cabecera de la cárcava, lo que da lugar a una erosión remontante, y por desmoronamiento de las paredes debido a la inestabilidad de la ladera en la que encaja (Gray, D. y Sotir , R.,1996).

La presencia de cárcavas en un terreno indica un estado avanzado de erosión. El daño que producen es muy importante y en ocasiones irreversible. Su estabilización y corrección requiere mover grandes cantidades de tierra, construir pequeñas presas, fijar taludes, frenar la erosión de los terrenos que desaguan en ella y otras acciones que en conjunto pueden llegar a representar un coste económico elevado.

Técnicas fotográficas de exposición prolongada y de alta velocidad han puesto de manifiesto, que la forma idealizada de erosión laminar se verifica raras veces, y casi simultáneamente a la separación y movimiento iniciales de las partículas de suelo, se forman pequeñísimos hilillos microscópicos que cambian de posición rápidamente.

Teniendo en cuenta que los efectos producidos sobre la superficie del terreno por el flujo laminar y por la arroyada difusa del agua son semejantes, las cuatro modalidades de erosión hídrica superficial anteriores se pueden reducir en la práctica a tres: Erosión laminar o entre regueros, indistintamente, (sheet o interrill erosión), erosión en regueros (rill erosión) y erosión en cárcavas (gully erosion) (Gray, D. y Sotir , R.,1996) (Ver FIGURA 2-12).

FIGURA 2-12 Representación esquemática de los diferentes tipos de erosión hídrica.(López, C. J. , Trillo, G . LL. ,1999)



Factores Erosivos

Al nivel general de la superficie terrestre, los factores que en última instancia determinan la erosión son climáticos y geológicos. De ellos se derivan otros factores que pueden ser tectónicos, litológicos, edafológicos, geomorfológicos, e incluso antrópicos, que en conjunto forman un entramado complejo, interdependiente y variable a lo largo del tiempo.

A la escala reducida de un talud, y a corto plazo, los factores que controlan la erosión son el clima con su agresividad o erosividad, la naturaleza del terreno con su mayor o menor erosionabilidad, el relieve topográfico con su pendiente, longitud y forma de la vertiente, y la cobertura vegetal propia o implantada en su superficie (Morgan R. P. C. , Rickson R. J. 1999).

Erosividad de un clima determinado es su capacidad potencial para provocar la erosión. Es función de las características físicas de la lluvia y del viento.

Erosionabilidad es la susceptibilidad o vulnerabilidad de una formación edáfica o rocosa a la erosión. Es función tanto de las características del suelo o roca como del relieve y la vegetación.

La erosividad depende exclusivamente de las propiedades de la lluvia o del viento y es independiente de la erosionabilidad, pero una medida cuantitativa de la misma sólo puede efectuarse cuando tiene lugar la erosión. Del mismo modo, los valores relativos de la erosionabilidad no son influenciados por la lluvia o por el viento, pero sólo pueden medirse cuando la lluvia o el viento los pone de manifiesto con una determinada erosividad. A continuación enunciaremos los principales factores erosivos:

- **Erosividad**

Está comprobado que la erosión hídrica está relacionada con dos tipos de lluvia, la tormenta intensa de corta duración que supera la capacidad de infiltración del terreno, y el aguacero de larga duración y baja intensidad que satura el suelo.

Una vez que el agua llega al suelo no sólo se produce erosión por el impacto de las gotas de lluvia, cuando la intensidad de lluvia supera la capacidad de infiltración del terreno se forma la arroyada superficial y tienen lugar los procesos de erosión laminar o entre regueros, erosión en regueros y erosión en cárcavas (López, C. G. y Trillo, G. LL., 1999).

- **Erosionabilidad**

La Erosionabilidad de un suelo o de una roca es la inversa de la resistencia a la erosión. Un terreno con erosionabilidad elevada sufrirá más erosión que otro con erosionabilidad baja si ambos están expuestos a las mismas condiciones climatológicas.

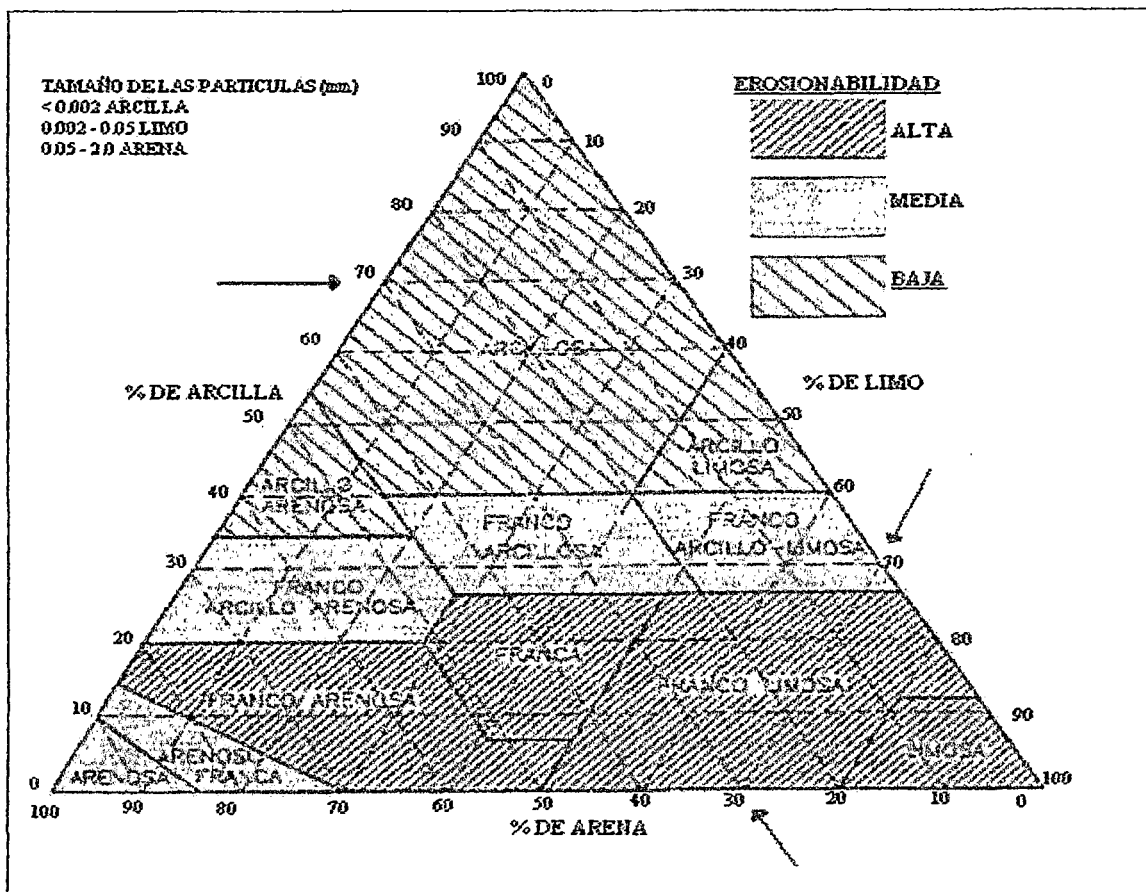
En el caso de materiales pétreos, la erosionabilidad depende del grado de fracturación, del grado de meteorización y de las características mineralógicas y texturales. El tamaño de grano, los poros, las discontinuidades, la microfisuración, los minerales fácilmente alterables y otras propiedades petrográficas influyen en el comportamiento de las rocas ante la acción de lluvia y del viento.

En el caso de formaciones edáficas (suelos), la erosionabilidad de un suelo depende de la textura, la estructura, la resistencia al esfuerzo cortante, la capacidad de infiltración y de los contenidos minerales y orgánicos.

La textura de un suelo es la proporción relativa de los diferentes componentes minerales del suelo: arena (partículas cuyo tamaño está comprendido entre 2 y 0.05 mm), limo (entre 0.05 y 0.002 mm), y fracción fina inferior a 0.002 mm llamada comúnmente arcilla aunque contenga también otros minerales.

La textura es función de la granulometría que se determina mediante análisis mecánicos cuyos resultados se representan gráficamente en una curva granulométrica acumulativa. A partir de los análisis granulométricos se establecen clasificaciones texturales, siendo la más empleada la de la Sociedad Americana de Ciencia del Suelo (U.S.D.A.) que se adjunta en la FIGURA 2-13, en la cual se han delimitado tres campos con erosionabilidad, alta, media y baja.

FIGURA 2-13 Diagrama triangular para la determinación de la textura con indicación de la erosionabilidad (Dirección General de Carreteras, Madrid, 1990)



Los suelos con un alto contenido en arenas finas, medias y gruesas (0.1-2 mm) son poco erosionables debido a su alta permeabilidad; los que tienen un alto porcentaje en arcilla suelen ser bastante coherentes, por lo que resisten mejor la dispersión provocada por el impacto de las gotas de lluvia. Los suelos menos resistentes a la erosión son los limosos y los que contienen un elevado porcentaje de arena muy fina (0.05-0.1 mm).

Al mismo tiempo que la textura debe tenerse en cuenta la presencia de elementos gruesos (gravas, piedras y pedregones; 0.2 - 60 cm). Los suelos pedregosos son menos susceptibles a la erosión que sus equivalentes no pedregosos, dado que las piedras superficiales los protegen del impacto de las

gotas de lluvia, y la escorrentía generada es menor al ser más permeables.

La estructura de un suelo es la agrupación o unión de las partículas individuales mediante cementos tales como arcillas, coloides húmicos, óxidos de hierro o microorganismos para formar unidades de mayor tamaño llamadas agregados.

En general, un suelo no es un material masivo y macizo, sino que es posible identificar unidades de tamaño y forma diferentes, siendo los terrones la forma más conocida de agregados. Aunque un suelo tenga la misma textura puede presentar estructuras diferentes.

La estructura determina la distribución en el espacio de la materia sólida y de los poros, algunos de los cuales están ocupados por agua, mientras que otros, los de mayor diámetro, lo están por aire. Esa distribución condiciona las propiedades físicas del suelo: aireación, retención de agua, etc.

El impacto de las gotas de lluvia puede provocar la rotura de los agregados poco estables. Las partículas finas desprendidas rellenan los poros superficiales del suelo, lo que da lugar a la formación de una capa casi superficial muy dura y compacta, con poros sin comunicación entre sí, lo que dificulta la circulación de agua y aire. En los suelos limosos hay mayor riesgo de que se forme costra superficial.

La resistencia al corte de un suelo es una medida de su cohesión y de la capacidad para resistir las tensiones ejercidas por la gravedad, movimiento de fluidos y cargas mecánicas. Disminuye al aumentar el contenido de humedad del suelo. Cuando un suelo está saturado y por consiguiente su resistencia al corte es mínima, se produce desprendimiento de partículas por mecanismos combinados de compresión y corte provocados por impacto de gotas de lluvia.

Los componentes orgánicos y minerales del suelo son importantes debido a su influencia sobre la estabilidad de los taludes ante las fuerzas erosivas del agua. La materia orgánica fresca está formada por los restos vegetales y animales de toda naturaleza que superponen al suelo mineral o se incorporan a

él, las moléculas complejas que la constituyen soportan, en primera instancia, una descomposición microbiana que libera compuestos simples, en general, solubles. Parte de esos compuestos sufren un proceso de mineralización transformándose en compuestos inorgánicos solubles o gaseosos, por ejemplo CO_2 aunque, sin embargo, algunos de ellos pueden reorganizarse durante la unificación. Otra parte se escapa a la mineralización y sirve para la construcción de nuevas moléculas cada vez más complejas, de naturaleza coloidal y de color oscuro, cuyo conjunto constituye el humus en sentido estricto (proceso de humificación). Estos compuestos húmicos contraen enlaces más o menos fuertes con los componentes minerales, (arcillas y óxidos), y luego se mineralizan a su vez, pero más lentamente que en la materia orgánica fresca (mineralización secundaria).

El papel que desempeña la materia orgánica en la erosionabilidad de un suelo depende de su origen. La fracción de suelo proveniente de restos vegetales y estiércol contribuye a la estabilidad de los agregados del suelo turba que es muy erosionable por el viento y el agua. La turba y los rastrojos no descompuestos protegen, simplemente al suelo actuando como un mulch (material compuesto de desechos vegetales o afines, utilizado para disminuir la erosión del suelo), contribuyendo poco a la estabilidad de los agregados. Los suelos con menos de un 3,5 % de materia orgánica (equivalente aproximadamente a 2 % de carbono orgánico) pueden considerarse erosionables (López, C. G. y Trillo, G. LL., 1999).

Respecto a los componentes minerales, el factor más importante sobre la erosionabilidad es la proporción de sodio intercambiable puede deteriorar rápidamente la estructura de un suelo al humedecerse, con la consiguiente pérdida de resistencia, seguido de la formación de una costra superficial y descenso de la infiltración al rellenar las partículas de arcilla desprendidas el espacio poroso del suelo. El aporte de sodio con los fertilizantes para mantener la cobertura vegetal puede a veces llevar a pequeños aumentos de sodio intercambiable que se traduce en un deterioro muy marcado de la estructura del suelo. El exceso de carbonato cálcico en las fracciones arcillosa Y limosa del suelo, también, conduce a una alta erosionabilidad.

Si no se tienen en cuenta las condiciones edáficas puede establecerse la jerarquía simple de erosionabilidad de suelos ante la erosión hídrica que se incluye en la TABLA 2-3, basada en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Gray, D. y Sotir, R. ,1996).


- **Relieve Topográfico**

El relieve topográfico es el factor geomorfológico que más influye en los procesos erosivos. Dentro del relieve no solamente son importantes la pendiente y longitud del talud, sino también la forma del perfil y la estructura o forma geométrica de las laderas.

Las pérdidas de suelo por erosión hídrica crecen al aumentar la inclinación y la longitud de un talud como consecuencia del incremento de la velocidad y volumen de la escorrentía superficial, y sus efectos se hacen sentir mucho más en las partes inferiores de las laderas, porque a igualdad de precipitación con las partes superiores, soportan el paso del agua que discurre por la ladera.

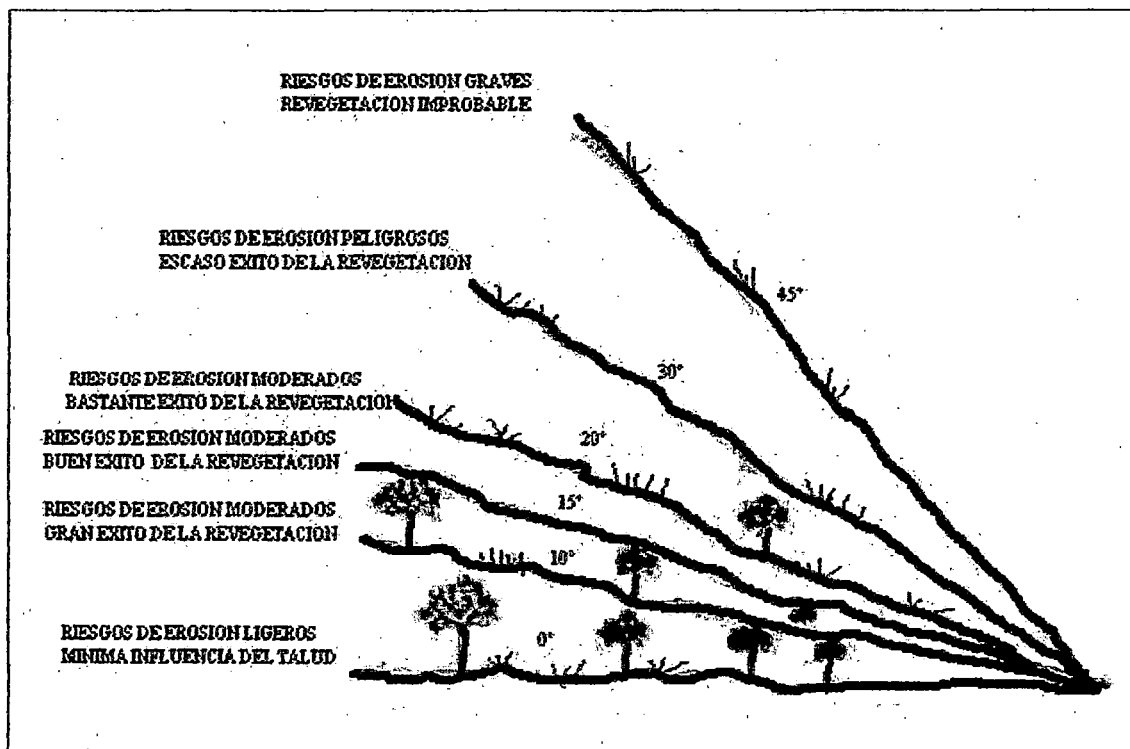
En tierras de labor, donde la protección de la vegetación es nula en determinados periodos, la erosión laminar, por arrastre de los elementos más finos, se inicia con pendientes de tan sólo el 2 o el 3 %, es intensa cuando la pendiente alcanza el 4 ó 5 %, Y la formación de cárcavas y el arrastre total son incontenibles cuando las pendientes alcanzan el 18 ó 20 %. En la FIGURA 2-14 se puede apreciar la influencia del ángulo de inclinación de un talud sobre la erosión y sobre la vegetación en al restauración de escombreras mineras (López, C. G. y Trillo, G. LL., 1999).

TABLA 2-3 Susceptibilidad a la erosión hídrica de diferentes tipos de suelos (Adaptado de Gray, D. y Sotir, R., 1996).

SIMBOLO	DESCRIPCION DEL SUELO	EROSIONABILIDAD
GW	Gravas bien graduadas , mezclas de grava y de arena, con pocos fino o sin finos	<p>Menos erosionables</p> 
GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y de arena, con pocos finos o sin finos.	
SW	Arenas bien graduadas, arenas con gravas, con pocos finos o sin finos.	
GM	Gravas limosas, mezclas de grava-arena-limo.	
CH	Arcillas inorgánicas muy plásticas. Arcillas grasas.	
CL	Arcillas inorgánicas pocos plásticas o de plasticidad mediana, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras	
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas poco plásticas.	
MH	Limos inorgánicos, con mica o arena fina de diatomeas o suelos limosos.	
SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena-arcilla	
SM	Arenas limosas, mezclas de arena-limo	
ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas. Polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, limos arcillosos poco plásticos	<p>Mas erosionables</p>

Fuente: Gray, D. y Sotir, R., (1996).

FIGURA 2-14 Influencia del ángulo de inclinación de un talud sobre la erosión y la revegetación (Adaptado del Departamento de Minerales y Energía, Western Australia, 1996)



• Cobertura vegetal

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre los agentes atmosféricos y el suelo. Sus componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, disminuyendo el efecto erosivo al no actuar directamente sobre el suelo, mientras que las componentes subterráneas, como los sistemas radiculares, contribuyen a aumentar la resistencia mecánica del suelo. Además la mayor cantidad de materia orgánica contribuye al aumento de la estabilidad y porosidad del suelo

Escorrentía Superficial

La intervención de la escorrentía superficial en el proceso de la erosión hídrica se concreta en dos acciones principales: La disgregación de las partículas del suelo y su transporte. El agua de escorrentía actúa arrancando y arrastrando las partículas del suelo que ya han sido desagregadas por salpicadura, y provocando este mismo efecto en el resto de partículas que permanecían inalteradas.

La disgregación de las partículas del suelo es debida, fundamentalmente, a la fricción y choque del agua con los elementos terrosos del suelo. Al fluir, el agua de escorrentía fricciona contra la superficie del suelo, originando una serie de tensiones que, si son superiores a la resistencia que opone el suelo, movilizan las partículas edáficas haciéndolas deslizar o elevándolas sobre la superficie. Estas tensiones también pueden dar lugar a turbulencias en la lámina de agua de escorrentía, originándose torbellinos que ponen en suspensión las partículas más pequeñas.

Las partículas así arrancadas al suelo quedan en suspensión en la lámina de escorrentía, y son transportadas por ésta. Esta carga de partículas sólidas arrastrada por el agua también ocasiona a su vez la disgregación de los materiales del suelo por abrasión.

La capacidad de disgregación y transporte de la escorrentía son función de su volumen, velocidad y turbulencia, así como de la cantidad y naturaleza de los materiales que arrastra.

La vegetación disminuye el poder erosivo de la escorrentía al modificar dos de los factores principales de los cuales éste es función: disminuye la cantidad de agua de escorrentía generada y reduce su velocidad. La pérdida de suelo decrece exponencialmente al incrementarse el grado de cobertura proporcionado por la vegetación. La disminución del volumen de escorrentía es, como ya se ha indicado, el resultado de la combinación de varios factores (Gray, D. y Sotir, R., 1996):

-La interceptación y evaporación de parte de la precipitación recibida, con lo que la cantidad de agua que llega al suelo disminuye. Este efecto de interceptación también provoca una disminución de la intensidad de los aguaceros retarda la cegada del agua al suelo

-La transpiración de las plantas bombea agua a la atmósfera y regula la dosis de humedad del suelo, incrementando con ello su capacidad de almacenamiento.

-La gran capacidad de absorción de agua de las cubiertas húmicas y los restos vegetales retrasa el punto de encharcamiento y por tanto, el momento de comienzo de la circulación del flujo superficial.

-La vegetación mejora la estructura del suelo, incrementando su capacidad de infiltración.

-La mayor rugosidad de las superficies vegetadas disminuye la velocidad de circulación del agua, proporcionando con ello un mayor tiempo de contacto agua-suelo, y favoreciendo de esta forma la infiltración.

-La reducción del volumen de escorrentía por efecto de la vegetación puede llegar a ser muy importante. Por ejemplo, mientras que en zonas urbanas la escorrentía supone hasta un 60 - 70 % del total de precipitación recibida, en cultivos esta cantidad se reduce hasta el 30 - 40 %, Y en terrenos provistos de una cubierta vegetal continua y densa, ya sea de tipo arbóreo o de tipo herbáceo, el volumen de escorrentía tan sólo supone de un 10 a un 20 % de la precipitación recibida (López, C. G. y Trillo, G. LL., 1999).

Además de esta disminución del volumen total de escorrentía, la existencia de una cubierta densa y continua de vegetación retarda el tiempo de generación de ésta, y disminuye la intensidad de la descarga máxima, retrasando, además, su momento de aparición.

Sin embargo, en algunos casos la acción de la vegetación sobre la escorrentía

puede cambiar de signo y ejercer un efecto negativo, al provocar un incremento local de la escorrentía y concentrar las líneas de flujo, debido al aporte de agua de escurrimiento. Este efecto es especialmente marcado en plantas en las que muchas ramas confluyen en el mismo punto del tronco principal.

Respecto al control de la velocidad del flujo de escorrentía superficial, las cubiertas vegetales actúan como un obstáculo físico que se opone al paso del agua al incrementar la rugosidad de la superficie del terreno.. Además se crea un micro topografía que diversifica las líneas de circulación del agua evitando su concentración en trazas definidas, cuyo potencial erosivo es mucho mayor que el de una lámina de agua que cubra de forma homogénea el terreno. Como el nivel de rugosidad depende de la morfología de las plantas y la densidad de la cubierta vegetal, el coeficiente de Manning puede relacionarse con un coeficiente de retardo.

Aunque en la teoría del transporte de sedimentos es común expresar la cantidad de suelo retenido en términos de esfuerzo o tensión cortante, existe un inconveniente práctico en el hecho de que la cohesión del suelo y el esquema de flujo interno tienen un efecto significativo sobre la erosión. Para superficies con vegetación, la tensión cortante crítica, respecto al momento de comienzo de la erosión, se aplica sólo en suelos no cohesivos, y no está bien desarrollada para los suelos cohesivos (Hanson, G. J. ,1990).

2.1.10 Modelos Matemáticos para la Predicción de la Erosión Hídrica

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), que asumió como hipótesis que el suelo erosionaba por capas de espesor d' , estableciendo la siguiente ecuación:

$$q_{bv} = k \tau_0 (\tau_0 - \tau_c) \dots \dots (2-1)$$

Donde:

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

k : Coeficiente de erodibilidad, $m^2/s-Pa^2$

τ_0 : 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.

Ademas:

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

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:

$$q_{bv} = k' (\tau_0 - \tau_c)^m \dots \dots (2-3)$$

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 partículas cuyo diámetro D_s varia de 0.025 a 0.560 mm; siendo D_s el diámetro representativo del suelo; los valores de m oscilan entre 1.5 y 1.8.

Shield (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:

$$q_{bv} = \frac{A_1}{D_s} q^* S (\tau_0 - \tau_c) \dots\dots (2-4)$$

Donde:

A_1 : Constante que debe ser determinada con pruebas

q_{bv} : caudal unitario, m^2/s

S: Pendiente de energía

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

$$q_{bv} = k_T U (\tau_0 - \tau_c) \dots\dots (2-5)$$

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:

$$q_{bv} = 2500 \cdot S^{3/2} (q_0 - q_c) \dots\dots (2-6)$$

$$q_c = 0.26 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)^{5/3} \frac{D_s^{3/2}}{S^{7/16}} \dots\dots (2-7)$$

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 que se determina mediante pruebas de laboratorio.

Temple (1987) usa la siguiente relación en sus investigaciones de erosión en canales de tierra recubiertos de vegetación:

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

donde:

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

k: Coeficiente de erosionabilidad.

a: Exponente de relación de erosión

τ_e : Esfuerzo cortante efectivo, Pa.

Además:

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

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.

nf = Coeficiente global de Manning

Para suelo cohesivos, $n' = 0.0156$, según temple (1980) y Hanson (1990).

Para suelo con pastos, el coeficiente global de Manning " nf " se estima inicialmente igual al número de Manning " n ", según lo escrito en los ítem 2.1.4 y 2.1.5

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:

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

Donde:

ϵ_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 erosionabilidad, $\text{cm}/\text{hr}/\text{Pa}$.

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:

$$\epsilon_r = K (\tau_e) \dots \dots \dots (2-14)$$

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 desnudos de tierra, respectivamente.

2.2 CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS

2.2.1 General

Esta sección presenta información en aquellos aspectos geotécnicos de canales reforzados cubiertos por pasto, los cuales deberían ser considerados por el diseño del ingeniero. El principal aspecto que se requiere considerar es el efecto del movimiento del agua contenido en el subsuelo dentro del terraplén.

La estabilidad de la pendiente en la cual el canal esta siendo construido debería ser verificada en campo, aun cuando esta ya exista y aparente ser estable. El diseño de un terraplén está fuera del ámbito de esta tesis pero puede encontrarse una práctica guía en el boletín 202 del MAFF de Inglaterra.

Cuando el flujo tiene lugar bajo del canal, la infiltración afectará el contenido de humedad del suelo y podría incrementarse la presión del agua en el suelo. Este efecto podría iniciar una reducción de la resistencia del suelo y podría en un evento extremo resultar en un deslizamiento. (MINISTRY OF AGRICULTURA, FISHERIES AND FOOD, Bulletin N° 202,1977).

El agua puede entrar al subsuelo en las siguientes formas: (Ver FIGURAS 2-15 y 2-16)

1. A través de las grietas de la superficie y otras fisuras. Esto podrían ocurrir debido a la contracción del suelo, orificios de las raíces, madrigueras de animales, etc. La infiltración hacia estos vacíos, toma lugar tan pronto el canal entra en operación. Donde existen profundas grietas podría darse un rápido incremento de la saturación del subsuelo adyacente.
2. Por infiltración a través de la capa protectora. La rapidez en la cual esta ocurra dependerá de las características de infiltración de la capa protectora y del subsuelo. La tasa de infiltración varia considerablemente con la textura del suelo (100mm/h para un suelo arcillo arenoso y a menos de 1m m/h para arcillas pesadas).

La profundidad a la cual al frente mojado avanza dependerá del tiempo en el cual el flujo sobre canal ocurre, la humedad inicial del subsuelo, y la cantidad de masa del suelo que contiene agua o vacíos de aire.

FIGURA 2-15 Condiciones de humedad del subsuelo (Adaptado del MINISTRY OF AGRICULTURA, FISHERIES AND FOOD, Boletín N° 202, 1977)

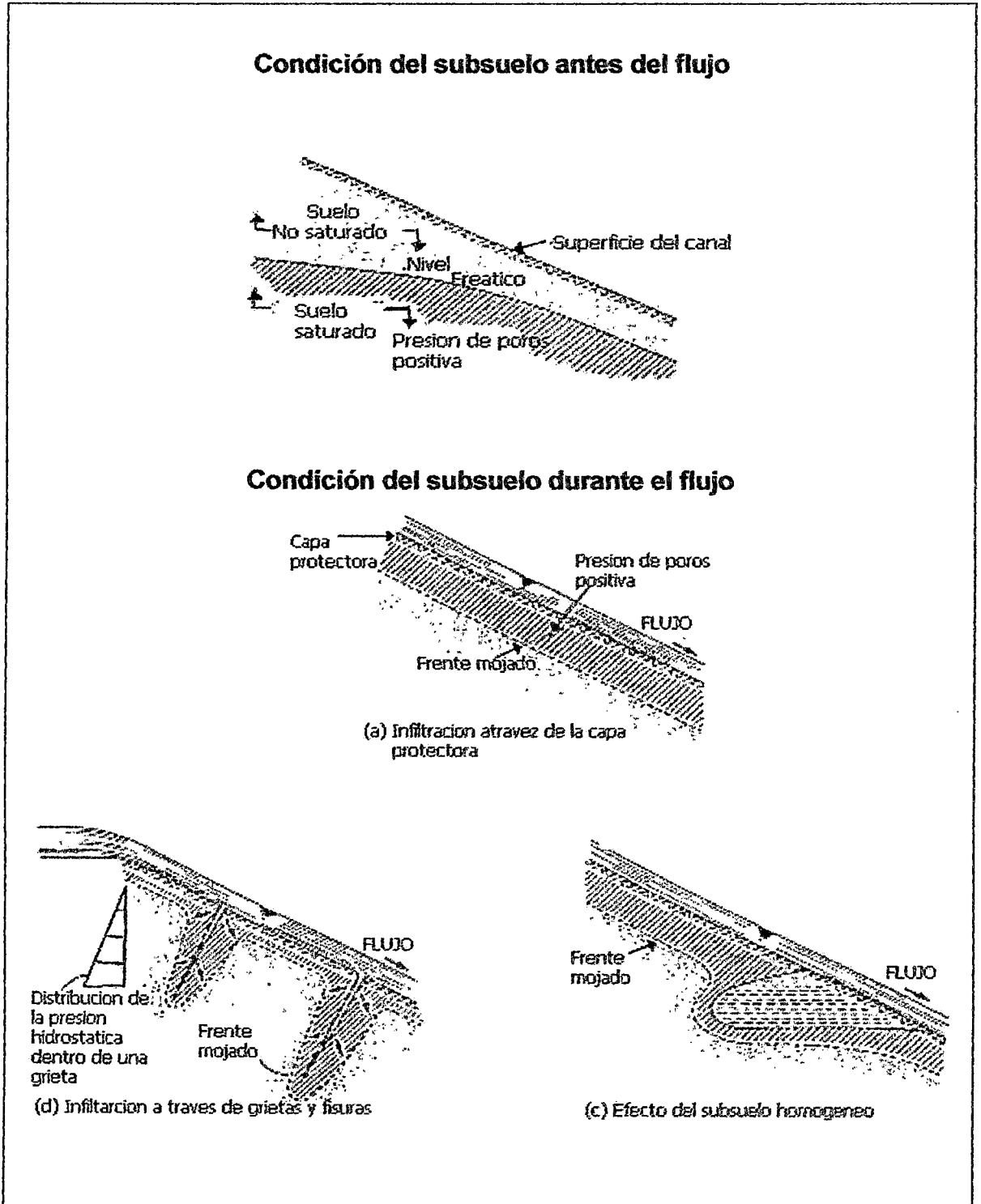
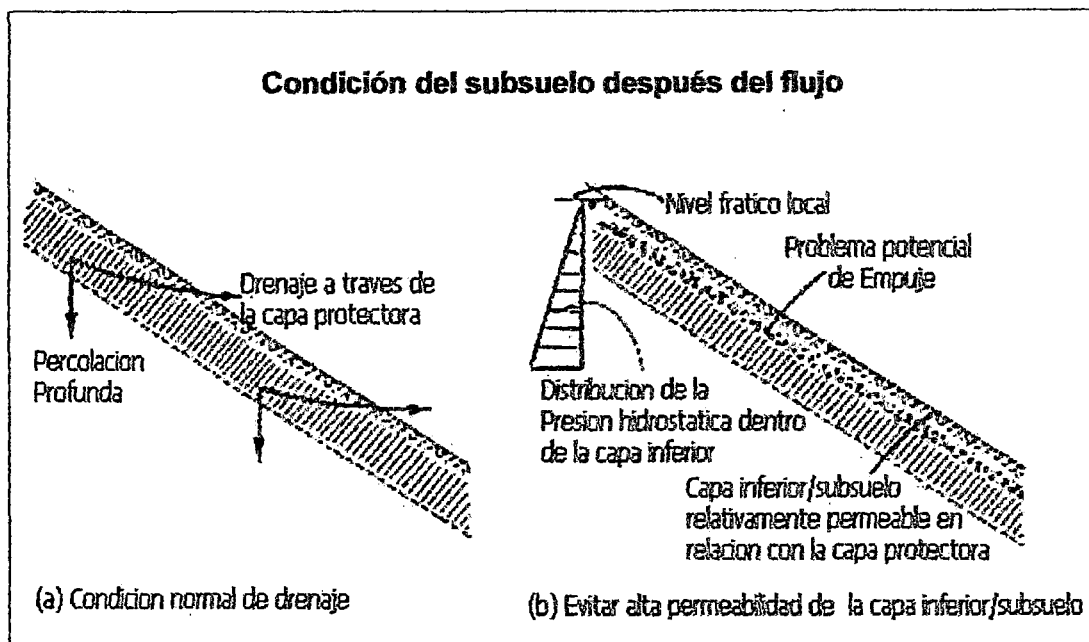


FIGURA 2-16 Condiciones de humedad del subsuelo (Adaptado del MINISTRY OF AGRICULTURA, FISHERIES AND FOOD, Boletín N° 202, 1977).



Los siguientes tipos de deslizamientos podrían ocurrir según Varne (1958):

1.-Una falla profunda dentro de la masa del suelo.-Esta es solo presumible que ocurra en condiciones en que el canal este operando y si el agua ha entrado al subsuelo en un nivel profundo y ha afectado su resistencia. Los tipos de falla podrían ser rotacional y translacional (forma de cuña) como se muestra en la FIGURA 2-17.

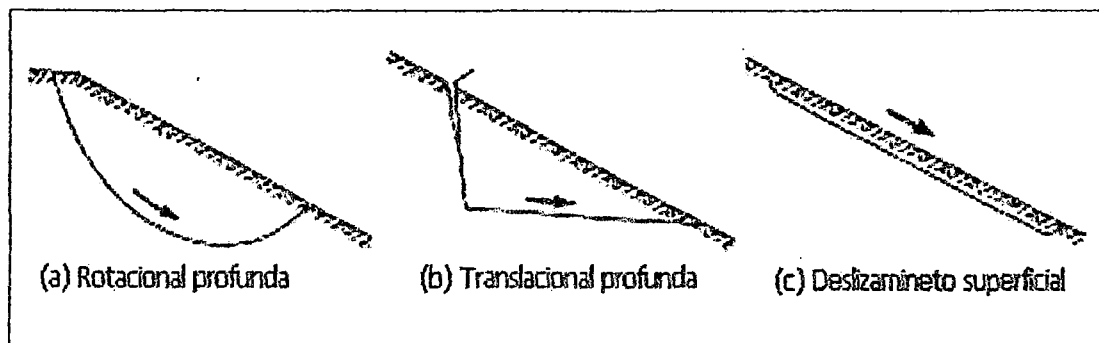
2.-Una superficie de deslizamiento superficial.- Es esencialmente translacional paralela en la superficie. En una situación sin raíces de pasto en el subsuelo esto podría ser un serio problema porque los esfuerzos aplicados en el canal bajo condiciones de flujo podrían exceder las fuerzas de restricción en el suelo y resultar en un deslizamiento superficial. La probabilidad de que un deslizamiento superficial ocurra decrece con la profundidad porque el suelo en grandes profundidades no

será afectado por infiltración y la asociada reducción de la resistencia del subsuelo.

El efecto de las raíces del pasto es la de reforzar e incrementar la resistencia al corte en el subsuelo inmediatamente bajo la capa protectora donde un deslizamiento superficial podría ocurrir. Se sabe por estudios del CIRIA en el reporte 116, (1987); que un buen desarrollo de raíces es aquel que alcanza una profundidad mayor a 20 cm , esto con buena densidad de raíces, lo cual realza la resistencia al corte y ayuda a prevenir deslizamientos superficiales.

Si el canal esta construido con un subsuelo homogéneo, el agua debería penetrar el subsuelo uniformemente y drenarse uniformemente después de que el flujo ocurra. Si el subsuelo es heterogéneo lo cual es muy común en viejas presas de tierra las zonas mas permeables llegara a ser saturadas con una tasa más rápida en comparación a otras zonas. Tales zonas con una elevada presión de poros podrían iniciar la inestabilidad, por lo cual un drenaje localizado podría ser considerado para ayudar a aliviar estas presiones después de que el flujo haya ocurrido en el canal. Los suelos con gran cantidad de material orgánico deberían ser eliminados pues podrían degradarse y causar asentamientos, excesivas infiltraciones o un deslizamiento. (Construction Industry Research and Information Association, Report 116,1987).

FIGURA 2-17 Tipos de falla geotécnica (Adaptado del CIRIA Report 116,1987)



2.3 CONSIDERACIONES BOTÁNICAS

2.3.1 Efectos Negativos de la Vegetación

Algunos efectos de la vegetación pueden generar inestabilidad. Entre estos efectos se pueden mencionar los siguientes:

1. El secado del suelo por especies ávidas de agua puede producir agrietamiento especialmente en suelos expansivos.
2. El peso de los árboles aumenta las fuerzas actuantes para deslizamiento.
3. Las fuerzas del viento producen fuerzas sobre las masas de suelo que podrían activar deslizamientos.
4. Las raíces pueden levantar las estructuras livianas cimentadas sub-superficiales, como canales, revestimientos, etc.
5. La turbulencia producto de la vegetación puede producir erosión.

La Vegetación y la Erosión

Un bosque denso suministra virtualmente una protección completa al suelo contra la erosión (Tabla 2-4). El follaje impide la erosión por la lluvia y demora la escorrentía, disminuyendo las velocidades y caudales. La acumulación de residuos vegetales forma un colchón protector muy eficiente y la cobertura de las raíces evita la formación de cárcavas y profundización de los cauces de las cañadas. La tala de un bosque desestabiliza el equilibrio existente y se puede producir un proceso acelerado de erosión de características catastróficas especialmente en áreas de montaña.

TABLA 2-4 Erosión relativa de acuerdo a la vegetación. (De Styczen y Morgan, 1995).

Vegetación	Erosión Relativa
Bosques densos	1
Pastos altos	1
Pastos bajos	5 – 10
Arbustos (café)	10 – 20
Cultivos limpios (papa -maíz)	100

2.3.2 Efectos del Tiempo del Flujo

Las velocidades admisibles en canales dependen principalmente del estado de la cobertura vegetal y la duración del flujo, para vegetación de pastos comúnmente se asumen las siguientes velocidades aceptables (Suárez, 2004):

- Un metro por segundo para flujos de larga duración.
- Dos metros por segundo para flujos de hasta 10 horas de duración.
- Tres a cuatro metros por segundo, cuando la duración del flujo es menos de una hora.
- Cinco metros por segundo. Cuando la duración del flujo es menos de una hora.

Si la cobertura vegetal es incompleta o desigual, es muy posible que velocidades menores a las indicadas ocasionen fallas a desprendimientos de vegetación. La ocurrencia de varios flujos en un período corto puede originar fallas también. Las plantas no deben permanecer sumergidas por más de doce días para los pastos y de 30 días para las hierbas debido a que estas pueden empezar a descomponerse (Suárez, 2004).

TABLA 2-5 Esfuerzo de corte permisible para diversas coberturas seleccionadas (Adaptado de Chen y Cotton ,1988)

Categoría de Recubrimiento	Tipo de Recubrimiento	Esfuerzo de corte Permissible	
		psf	(N/m ²)
RECPs degradables y temporales	Malla de Yute	0.45	22
	Paja con Malla:		
	malla simple	1.55	74
	malla doble	1.65	79
	Fibras de coco con malla	2.25	108
	Fibra de vidrio tejida	2	96
RECPs no degradables de larga duración	Mantas o alfombras sintéticas:		
	No Vegetadas	3	144
	Parcialmente establecidas	4-6	192-288
	Totalmente vegetadas	8	384
	Geotextiles tejidos de tres dimensiones	10	480
Vegetativo	Tipo A	3.7	178
	Tipo B	2.1	101
	Tipo C	1	48
	Tipo D	0.6	29
	Tipo E	0.35	17
Riprap de Grava	25 mm (1 pulgada)	0.33	16
	50 mm (2 pulgadas)	0.67	32
Riprap de Enrocado	150 mm (6 pulgadas)	2	96
	300 mm (12 pulgadas)	4	192

Fuente: Adaptado de Chen y Cotton (1988).

2.3.3 Propiedades de las Plantas

Parámetros a tener en Cuenta en el Diseño

Para el diseño de un plan de revegetación se deben tener en cuenta los siguientes parámetros (Juárez, 2004):

1.-El Follaje

El follaje de la vegetación debe ser uniforme y relativamente cercano a la superficie. Cuando la distancia entre el follaje y la superficie es mayor de un metro la protección contra el impacto de las gotas de lluvia disminuye y aumenta la pérdida de partículas de suelo por erosión: sin embargo, cuando la altura de las hojas es menos de 20 centímetros, la erosión también aumenta. En todos los casos es conveniente que la cobertura vegetal tenga varios niveles de follaje con el objeto de que la amortiguación de la energía de las gotas se realice por etapas, logrando una mejor protección.

El establecimiento de una cobertura protectora de árboles con un cubrimiento no muy grande para evitar una disminución excesiva de la luz y de otra cobertura menor de hierbas y pastos en la superficie del talud, podría representar la mejor protección posible contra la erosión.

2.-Los Tallos

La rugosidad de un cauce o de una superficie al movimiento de agua es mayor cuando los tallos son rígidos. Sin embargo, los tallos flexibles se adaptan mejor a la corriente y la turbulencia es menor. Si el objetivo es disminuir la velocidad de la corriente, los tallos rígidos obtienen un mejor resultado, pero si el objetivo es proteger directamente el sitio contra la erosión, los tallos flexibles deben preferirse.

3.-Las Raíces

Las raíces actúan como refuerzo y sostén del suelo incrementando la resistencia al esfuerzo cortante y la resistencia a la fuerza tractiva del agua (Ver TABLA 2-5). La forma como las raíces actúan en cada caso está determinada por el tipo de planta y las condiciones de suelo del sitio.

2.3.4 Las Raíces

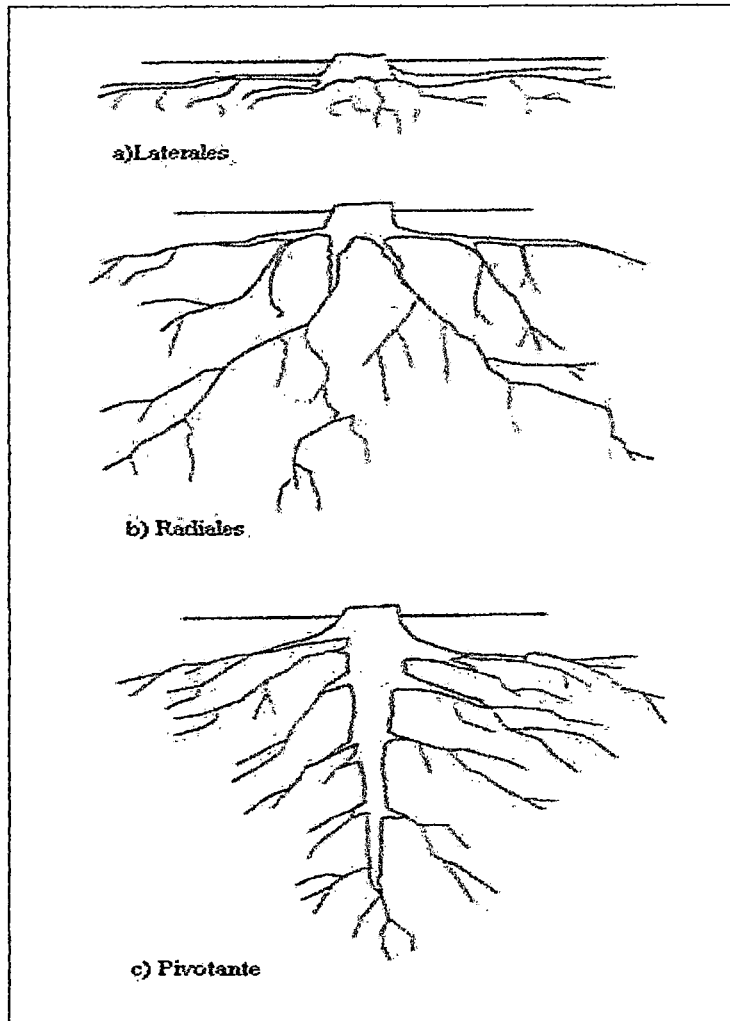
Estructura de las raíces

La literatura revisada clasifica las raíces de acuerdo a su forma, de la siguiente manera (FIGURA 2-18):

- 1.-Raíces de extensión lateral
- 2.-Raíces de extensión radial
- 3.-Raíces pivotantes

Las raíces pivotantes pueden ser más útiles para la estabilidad a la erosión en masa, pero las raíces de extensión lateral y radial pueden tener mejor efecto para la protección de la erosión superficial. Una alta densidad o concentración de raíces fibrosas de pequeño diámetro pueden ser más efectivas para control de erosión superficial que unas pocas raíces de gran diámetro. La resistencia al cortante del suelo, aportada por las raíces solo se extiende hasta la profundidad de anclaje de las raíces. Como regla general la mayoría de las raíces solo se profundizan hasta aproximadamente 1.5 metros (Gray, D. y Sotir, R., 1996).

La mejor protección contra la erosión se logra con una malla densa de raíces finas que alcance profundidades de al menos 50 centímetros. Un incremento en el porcentaje de área ocupado por raíces finas, produce una disminución exponencial en la erosión. Se deben preferir las raíces extensivas de tal forma que cubran una mayor área de superficie (Suárez, 2004).

FIGURA 2-18 Formas generales de las raíces de la vegetación, Wilde, 1958.

Relación de Área de Raíces

La cantidad de raíces generalmente disminuye con la profundidad. El término relación de área de las raíces, se refiere a la fracción del área total de superficie a una determinada profundidad que está ocupada por raíces. Este término es utilizado para caracterizar un sistema determinado de cobertura vegetal. Otra forma de analizar la densidad radicular es mediante los estudios de "Biomasa radicular". El sistema consiste en arrancar plantas enteras con la totalidad de sus raíces las cuales se pesan (Bohm, W., 1979).

Extensión Lateral

La extensión lateral de las raíces depende tanto de la especie vegetal como el tipo de suelo. Se reportan casos de árboles que en suelos arcillosos se extienden en arcillas 5 veces el ancho de follaje, en arenas 3 veces y en suelos arena arcillosos hasta 22 veces. Generalmente la extensión de las raíces es muy superior en suelos mixtos compuestos por arena y arcilla.

Por ejemplo, en un caso reportado por Kozlowski las raíces de algunos árboles en suelos arenosos se extienden hasta 65 m lateralmente (MacCullah, 2001).

Profundidad de las Raíces

La distancia vertical que puede alcanzar el sistema de raíces depende tanto de la especie vegetal como del suelo. Las raíces tienden a profundizarse más en suelos mixtos areno arcillosos que en suelos exclusivamente de arcilla o arena. En suelos residuales las raíces tienden a penetrar por las estructuras heredadas y pueden alcanzar profundidades importantes (Ver Sutton, 1969).

La profundidad de refuerzo de las raíces de los pastos es de solo 30 centímetros comúnmente, pero algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos. Las raíces de los pastos pueden alcanzar profundidades de 0.5 a 0.75 metros y en casos excepcionales hasta 1.5 metros. Las raíces de árboles y arbustos generalmente profundizan uno a tres metros con una densidad de raíces muy alta en el primer metro la cual disminuye con la profundidad.

En este orden de ideas, el anclaje de las raíces es principalmente paralelo a la superficie del terreno; sin embargo, no debe desestimarse la penetración de las raíces en las fisuras de la roca, anclando el suelo superficial o el efecto del anclaje en los dos primeros metros de suelo. (Suárez, J. 2004).

Resistencia de las Raíces

Los factores que más afectan la resistencia de las raíces son su diámetro, orientación y ambiente de suelo (Greenway, 1987). La resistencia de las raíces generalmente se encuentra en el rango entre 5 y 40 MPa, siendo mayor en las raíces de menor diámetro, pero en muchas ocasiones se han reportado

resistencias superiores a 90 MPa. La resistencia de las raíces depende de la densidad del sistema radicular, la resistencia propiamente dicha de las raíces, su longitud, diámetro, rugosidad superficial, dirección de las raíces y dirección de los esfuerzos principales. La resistencia de las raíces difiere mucho dependiendo de la especie, el clima y las dimensiones de las raíces (Suárez, 2004).

Generalmente la resistencia de las raíces disminuye al aumentar el diámetro de cada raíz, de acuerdo a la siguiente relación dada por Burroughs y Thomas, (1977).

$$Tr = n \cdot D^m$$

Donde:

Tr = Resistencia de la raíz a la tensión en MPa

D = Diámetro de la raíz en milímetros

n y m = son constantes empíricas que dependen de la especie vegetal

Para especies arbóreas n varía de 29 a 87 y m de 0.76 a -0.45.

Para pastos aún no se han realizado investigaciones.

El módulo de deformación de las raíces es muy importante para tenerlo en cuenta en los análisis de estabilidad debido a que la resistencia total no se moviliza sino a deformaciones relativamente grandes. Al removerse la vegetación, las raíces empiezan a descomponerse perdiendo poco a poco su resistencia. Existe un tiempo dependiendo del tipo de raíz y del medio ambiente en que las raíces continúan cumpliendo su misión de control de erosión después de que se ha removido el tallo o follaje (Gray y Megahan, 1980).

Tasas de crecimiento de las raíces

Es común observar la tasa de crecimiento muy rápida del follaje, de algunas especies vegetales. Sin embargo, el crecimiento de las raíces es mucho más lento y debe pasar generalmente, varios años antes de que las raíces puedan establecerse y cumplir su misión en forma efectiva. Algunas especies establecen longitudes importantes de raíces en poco tiempo, mientras otras son de desarrollo radicular más lento (Watson y otros, 1995).

Es común que una lluvia de alta intensidad destruya la vegetación antes de que esta haya podido desarrollar una buena cobertura radicular. El crecimiento de las raíces es muy lento en los suelos duros, al igual que en los suelos arcillosos. En la parte alta de los taludes generalmente el crecimiento de las raíces es menor que en las zonas bajas debido a las diferencias de humedad.

2.3.5 Caracterización para Control de Erosión

Es muy importante conocer las características de las especies vegetales disponibles para la construcción de una obra de bioingeniería.

Para el establecimiento de una cobertura vegetal en forma exitosa se requiere tener en cuenta una serie de criterios entre los cuales se encuentran los siguientes: (Dickerson y otros, 1998).

Seleccionar correctamente la especie vegetal

Para la selección de la especie vegetal se requiere tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de planta.
- Sistema tipo de suelo y habilidad radicular.
- Tasa de crecimiento.
- Preferencia de suelo (textura y drenaje).
- Preferencia de pH de suelo.
- Rapidez de establecimiento.
- Potencial de invasión.
- Tolerancia a las sequías.
- Tolerancia al sol y a la sombra.
- Tolerancia a la inundación.
- Tolerancia a la sedimentación.
- Tolerancia al viento.
- Tolerancia a incendios.
- Tolerancia al pisoteo.

- Mínima profundidad del nivel de agua tolerado.
- Máxima profundidad del nivel de agua tolerado
- Sistema de establecimiento (Estacas, semillas, rizomas, estolones, etc).
- Disponibilidad comercial.

Seleccionar la técnica de bioingeniería a utilizar

Se debe determinar el sistema de siembra conjuntamente con los sistemas de fertilización, riego, mantenimiento y protección.

2.3.6 Diseño de los Componentes Vegetativos

Para el diseño de los elementos vegetativos se deben tener en cuenta las siguientes etapas (Gray , D. y Sotir, R. ,1996):

1. Análisis del sitio.
2. Selección de las especies vegetales.
3. Preparación del sitio.
4. Manejo de los materiales vegetales.
5. Sistema de establecimiento.
6. Mantenimiento.

Análisis Del Sitio

Las condiciones del sitio afectan el comportamiento de cualquier obra biotécnica o de bioingeniería. La investigación del sitio incluye la revisión de la información existente sobre el clima, topografía, botánica y otros factores que afectan el proceso de revegetación.

Se deben analizar los siguientes factores (Gray, D. y Sotir, R. ,1996):

- **Clima**

Un gran número de variables climáticas afecta el crecimiento de las plantas y deben ser evaluados, incluyendo las siguientes variables:

- Temperatura del aire máxima, mínima, promedio y fluctuaciones
- Temperatura máxima y mínima del terreno
- Régimen de lluvias, intensidades, valores máximos, mínimos y promedios

- Duración y características de las temporadas secas

La lluvia y humedad disponibles es tal vez una de las propiedades más importantes de un sitio para el diseño de las obras de bioingeniería.

- **Microclima**

Cada sitio de acuerdo a la exposición al sol, al viento y a la lluvia puede cambiar climáticamente. Por ejemplo el viento aumenta la evapotranspiración requiriéndose mayor cantidad de humedad para el establecimiento y mantenimiento de las plantas. Algunas plantas por su parte son intolerantes a la luz del sol y requieren sombra.

- **Topografía**

Los valles y áreas bajas tienen condiciones diferentes para el manejo de la vegetación de las áreas altas y divisorias de aguas. Las zonas bajas pueden conservar fácilmente la humedad y soportar menores temperaturas. Generalmente se requiere una vegetación más tolerante a las sequías en los taludes de gran altura.

- **Suelos**

Se deben analizar las propiedades físicas y químicas de los suelos para determinar su habilidad para soportar el crecimiento de la vegetación. Entre las propiedades del suelo se requiere tener información de las siguientes:

- Distribución de tamaños y porcentaje de finos.
- Estructura o textura
- Densidad o grado de compactación
- Profundidad a la cual aparece la roca o capas impermeables
- Repelencia al agua
- Humedad o contenido de agua
- Disponibilidad de agua (Ver Tabla 2-6)
- Nutrientes (concentraciones y disponibilidad)
- PH (alcalinidad y acidez)

- Salinidad del agua
- Cantidad de Na intercambiable
- Toxinas presentes en el suelo (tipo y cantidad)

Se requieren los ensayos de nutrientes para determinar la necesidad de abonos adicionales. Es importante que los ensayos de suelos sean realizados por personas conocedoras de los suelos del sitio para poder recomendar los sistemas de mejoramiento del suelo que se requieran.

Un factor muy importante es la distribución de tamaños de granos. Los mejores suelos para el crecimiento de las plantas son aquellos que contienen arenas, limos y algo de arcilla, los cuales tienen suficientes finos para mantener humedad y buena aireación para facilitar el crecimiento de las plantas. Los suelos arcillosos no permiten la presencia suficiente de oxígeno, mientras los suelos totalmente granulares no permiten la acumulación de humedad por largos períodos de tiempo.

Selección de las especies vegetales

Una inmensa variedad de plantas pueden ser usadas para propósitos de revegetación; lo importante es decidir que tipos de plantas son compatibles con las condiciones de sitio. Las plantas no son diferentes a otros materiales en el sentido de que éstos deben ser seleccionados con cuidado para el propósito deseado. La diferencia con los materiales inertes es que éstos están en constante evolución y cambio. Las plantas son muy sensibles al suelo y condiciones de sitio; tales como topografía, suelo, disponibilidad de humedad y otros aspectos.

Vegetación Nativa

Generalmente los programas más efectivos de revegetación se obtienen con plantas nativas del área del proyecto. Las plantas nativas ya están adaptadas a las características del sitio como pendiente, clima, elevación, tipo de suelo, nutrientes, etc.

Tabla 2-6 Cantidad de agua disponible típica para diferentes suelos (De Helliwell, 1995)

Tipo de suelo	Capacidad de disponibilidad de agua mm/metro de espesor de perfil	Observaciones
Capa delgada de suelo sobre roca fracturada	10	No es posible establecer cobertura vegetal.
Capa delgada de suelo sobre arcillolita	125	Es posible establecer vegetación de acuerdo a las limitantes del sitio, del suelo y de la especie vegetal
Suelos arenosos sobre arenisca blanda	85	
Suelos arenosos sobre espesor	100	
Suelos limosos	130	
Suelos limo arcillosos	135	
Suelos arcillosos	115	
Turbas	200	
Gravas	50	Muy difícil establecer vegetación.
Suelos endurecidos	50	

Algunas entidades ambientales exigen la revegetación con especies nativas como un elemento que permite el mantenimiento ecológico de un área. La siembra de especies no nativas puede traer consecuencias negativas para el medio ambiente de un determinado sitio. Sin embargo, en algunos sitios no es viable establecer especies nativas debido a los cambios que se han efectuado al terreno como en el caso de taludes en corte para carreteras de gran pendiente donde se requiere especies no nativas capaces de sostenerse en esas pendientes. (Gray D. y Sotir R., 1996).

Las especies nativas o silvestres son generalmente las que mejor se ajustan a las condiciones del sitio y las que tienen menos efectos ecológicos negativos. Los beneficios de la utilización de vegetación nativa es la ideal desde el punto de vista ético, ecológico, estético y práctico. Las plantas nativas son la mejor garantía de un funcionamiento saludable del ecosistema, debido a que ellas

están adaptadas al suelo, temperatura y régimen de precipitación de su ambiente natural. La biodiversidad de las comunidades de plantas nativas generan grandes beneficios a la estabilidad del suelo, la retención de agua y el microclima. Las plantas nativas dan una mayor estabilidad a largo plazo, cuando se requiere cero mantenimiento: Sin embargo, el establecimiento de especies nativas puede ser difícil especialmente si el suelo no tiene los nutrientes que requieren estas especies para su crecimiento. Las especies nativas pueden requerir de un medio ambiente natural sin el cual no es posible su establecimiento (Suárez, J., 2004; Gray D. y Sotir R., 1996).

Las especies nativas son las que más atraen la fauna tanto pájaros como animales rastreros. Los pájaros por su parte ayudan a distribuir las semillas por toda el área ayudando a la reforestación. El principal problema consiste en que mientras conocemos muy bien a las especies no nativas, los profesionales tenemos muy poco conocimiento de las especies nativas. La gente de la región con algún conocimiento agrario, sin que se requiera que sean profesionales universitarios, tienen un alto potencial para desarrollar sistemas de establecimiento de especies nativas (Suárez, J., 2004).

Diseño del Tipo de Especie Vegetal

Una de las decisiones más importantes en el diseño de obras para el control es escoger acertadamente el tipo de especie más apropiado para cada caso en particular.

Para seleccionar el tipo de vegetación debe tenerse factores tales como:

- **Adaptación:** Comúnmente se recomienda emplear plantas comunes en la región que ya estén adaptadas al ambiente.
- **Hábitos de crecimiento:** Tolerancia a pisoteo, quemas, sequías y otros factores adversos.
- **Rapidez de crecimiento:** La rapidez de germinación y crecimiento es un factor muy importante.
- **Sistema de Siembra:** Debe diseñarse un sistema de siembra, abono, protección durante la germinación y crecimiento.

- **Sistemas de mantenimiento**
 - **Características de absorción** :Cada especie vegetal posee una capacidad de absorción diferente
 - **Características de las raíces**: Tipo de raíz, longitud densidad de sistema radicular, resistencia.
 - **Follaje**: Volumen y peso del follaje, tamaño de las hojas, rugosidad, capacidad de retención de agua.
 - **Tipo de suelo**: El pH del suelo y los nutrientes que se requieren para el crecimiento de cada especie.
 - **Disponibilidad de agua y humedad**: Algunas plantas requieren determinadas características de humedad.
 - **Tipo de Protección que se requiere**: Si es solo para control de erosión o se requiere estabilizar el talud.
-
- **Criterios para el diseño**
 - Un primer principio es la utilización de plantas locales que estén adaptadas al clima del sitio. Cada especie tiene sus limitaciones de humedad. temperatura. presión atmosférica, elevación, nutrientes, tolerancia de sustancias, etc. Se requiere que las especies sean compatibles con las características del sitio. La decisión de la especie vegetal requiere del trabajo conjunto de Ingenieros, Biólogos. Forestales y expertos en paisajismo.
 - En general la vegetación que absorbe grandes cantidades de agua funciona mejor para el control de la erosión en suelos arcillosos, en zonas húmedas para asegurar un mayor secado y capacidad de absorción en el momento de la lluvia.
 - Por el contrario las especies que absorben menos agua serían ideales para suelos arenosos, debido a que no es conveniente que se produzca demasiada sequedad, la cual aumenta la susceptibilidad a la erosión de los suelos granulares (Abramson L. W.,1996).
 - La vegetación arbórea es más resistente y generalmente posee raíces más profundas y al mismo tiempo su follaje es de mayor volumen y

altura. Estos árboles se prefieren cuando se desea mejorar la estabilidad geotécnica del talud.

- Las hierbas y pastos tienen raíces más cortas y densas y son preferidas para el control de la erosión superficial por corrientes de agua. Algunos pastos como el Vetiver (*Vetiveria Zizanioides*) poseen raíces muy densas y profundas y representan especies excepcionalmente efectivas para el control de la erosión.
- Algunas hierbas, poseen raíces relativamente profundas y poco follaje y pueden preferirse para la protección de las áreas más próximas al agua en la ribera de una corriente.
- Las cañas y bambúes se establecen muy fácilmente en las riberas de ríos y ésta adaptabilidad es muy importante en las decisiones de la especie a utilizar, debido al alto requerimiento de agua.
- En zonas recreacionales o áreas con acceso a humanos se requiere colocar especies resistentes al pisoteo. Estas especies son generalmente de tallos cortos y flexibles, con sistema de reproducción por estolones, de rápido crecimiento y habilidad para permanecer con las raíces expuestas.
- Al escoger las especies vegetales se debe al mismo tiempo seleccionar el sistema de siembra, la manipulación de la fertilidad del suelo y el manejo de los taludes. En la práctica no existe un sistema ideal y se debe llegar a un acuerdo entre lo mejor y lo que realmente es viable y práctico de acuerdo al sitio.
- Debido a la falta de información sobre especies vegetales es común que se acuda a la especie para la cual se consiguen comercialmente semillas o plántulas (Bayfield, 1995).

▪ **Especies Indeseables**

Existe una gran cantidad de especies vegetales, las cuales aunque pueden cumplir parcialmente con el objetivo de control de la erosión, tienen efectos ecológicos negativos. Es el caso de las especies invasoras las cuales se extienden hacia las áreas vecinas acabando con la bio-diversidad existente.

No es conveniente utilizar especies que son apetitosas para los animales y por esta razón no es recomendable utilizar las mismas especies que se utilizan para la alimentación del ganado. En todos los casos es importante la construcción de cercas para impedir el paso del ganado.

La introducción de especies no nativas puede tener un efecto adverso sobre la ecología. Hay una amenaza real de que las especies no nativas invadan los bosques naturales. Comúnmente las especies no nativas destruyen la flora nativa y lo que es peor no permiten el establecimiento de la fauna propia de la región. Sin embargo, la utilización de estas especies es muy común, especialmente en los países latinoamericanos debido a que los profesionales forestales generalmente conocen muy bien las especies exóticas pero tienen muy poco conocimiento de las características de bio-ingeniería de las especies nativas o plantas silvestres, de las cuales muchas veces no saben ni siquiera el nombre (Lawrence, 1995).

Un caso de vegetación invasora es el que corresponde al Kudzu (planta trepadora del Japón), la cual fue implantada por el Soil Conservation Service para el control de la erosión en el sureste de los Estados Unidos, el problema fue que esta especie creció tan rápidamente que trepaba toda cosa que tenía contacto con ésta, entre estas: Árboles, postes, etc., originando así la muerte de mucha vegetación y pérdida de bosques. Por lo cual se tuvo que crear herbicidas especiales para erradicar esta planta trepadora muy resistente a estos. A pesar de la aplicación de estos potentes herbicidas el Kudzu aun continúa viviendo de 4 a 10 años antes de morir, pero ese no es todo, pues el Kudzu esta creciendo en las riberas del río Colorado lo que hace imposible la aplicación de herbicidas, debido al posible deslizamiento de estos al suministro público, continuando así su avance sin poder ser erradicado.

En muchas situaciones es común que no exista información disponible de las especies nativas que se puedan utilizar para el control de erosión. Esto es muy común en América Latina, no existe una cultura de control de erosión utilizando vegetación y simplemente se utilizan las mismas especies que se emplean para ganadería y pastizales. Es por eso que se debe investigar las cualidades y propiedades de las plantas nativas.

- **Número de especies a combinar para un mejor desempeño**

En todos los casos se recomienda utilizar varias especies en cada sitio, las cuales deben complementarse para lograr un equilibrio ecológico y un sistema capaz de generar una cobertura densa y resistente a los cambios climáticos (Moses, 1998). Generalmente, los programas de revegetalización se realizan en taludes con baja fertilidad y el diseño debe realizarse teniendo en cuenta este factor limitante.

Para garantizar un óptimo comportamiento de la cobertura vegetal es conveniente utilizar una mezcla de especies de diferente comportamiento. En tal forma que unas y otras logren un efecto combinado y puedan crecer o regenerarse en condiciones relativamente hostiles. La selección de las especies es tal vez el factor más importante del diseño de la revegetación. Particularmente en suelos de baja fertilidad se deben utilizar mezclas de 6 a 10 especies incluyendo pastos, hierbas y leguminosas (Morgan y Rickson, 1995).

La selección de las especies apropiadas requiere de un balance cuidadoso de diversas ventajas y desventajas (Ver TABLA 2-7). Se debe establecer una estrategia a corto plazo y otra a largo plazo, de tal forma, que se establezca una vegetación lo más rápidamente posible utilizando especies pioneras como una forma de establecimiento de especies de lento desarrollo pero que representan una mejor protección a largo plazo. En todos los casos debe tenerse claro cuál va a ser el comportamiento de la comunidad combinada de especies a largo plazo. Existe la posibilidad que las especies pioneras terminen acabando con las demás especies a largo plazo (Coppin y Stiles, 1995).

Tabla 2-7 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de especie vegetal (De Coppin y Stiles, 1995).

Tipo de vegetación	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos, amplio rango de tolerancias, fáciles de establecer y cobertura buena y densa de la superficie	Raíces poco profundas. Se requieren un mantenimiento regular en el tiempo
Cañas y juncos	Se establecen muy bien en riberas de ríos crecen rápidamente	Son difíciles de conseguir y se debe sembrar uno a uno con costos altos de mano de obra.
Hierbas	Raíces profundas que pueden pasar el metro de profundidad	Semillas difíciles de conseguir. Muchas veces son difíciles de establecer
Leguminosas	Fáciles de establecer. Se mezclan muy bien con los pastos.	No toleran suelos poco fértiles
Arbustos	Plantas robustas relativamente fáciles de establecer. Raíces profundas. Bajo mantenimiento.	Costosos cuando no es posible establecerlos por estaca o semilla y algunas veces difíciles de establecer.
Arboles	Muy buena raíz profunda. Requieren poco mantenimiento.	Crece lentamente. Se requiere un tiempo largo para establecerlos. Generalmente son costosos.

2.3.7 Razones Técnicas para la Selección de Pasto como Cobertura Superficial

Ventajas

- Es multifuncional, económico, se regenerará naturalmente, es visualmente atractivo y por lo general no requiere de maquinaria para su instalación.
- La revegetación con pastos provee una capa natural que evita con mayor eficiencia la pérdida de suelos, ya que una vez instalados proveen de una buena cobertura con buena densidad en superficie.

- Provee una rápida cobertura que evita la pérdida de suelos por escorrentía.
- Posee un amplio rango de tolerancia y son relativamente fáciles de establecer.
- Bajo costo de instalación y mantenimiento.
- Impacto visual positivo.

Desventajas

- Es susceptible a quemas, plagas, sequías y a las condiciones climáticas.
- Dificultad de establecimiento en taludes muy inclinados que sobrepasen la relación (V:H) 2:3
- Falta de conocimiento sobre sus propiedades (resistencia a agentes externos, tensión, socavación, etc).
- El tratar de imitar las condiciones iniciales de cobertura vegetal no es simple (caracterización, sucesión, etc).
- Brinda solamente protección superficial.

Selección De Especies

Desde el punto de vista de los aspectos biofísicos es difícil recomendar una especie en particular para un sitio definido, sobre todo cuando se agrega un gran rango de condiciones ecológicas y de propiedades físicas y químicas del suelo. Para ello se deben conocer las características de las plantas (ecología, desarrollo) y poner énfasis en el uso de especies nativas, especies introducidas, y pastos mejorados, en ese orden (Ver TABLA 2-8).

Para ayudar a la selección de especies existen bases de datos que pueden ser de mucha ayuda, cuando se quiere realizar alguna recomendación; no obstante, en la mayoría de las ocasiones, las bases de datos no tienen la información estandarizada. (Tarazona, R. R. ,2004).

TABLA 2-8: Especies de Pastos Utilizados según la región (De Tarazona, R. R., 2004)

VALLES(hasta 3500 msnm)	SUNI (3500-4000 msnm)	PUNA (4000-4800 msnm)	SELVA ALTA (400-2000 msnm)	SELVA BAJA (80 a 400 msnm)
Cortadería	Cortadería	Pasto blanco	Alfalfilla	Alfalfilla
Pasto Lloron	Pasto Lloron	Pasto Lloron	Brachiaría	Brachiaría
Kikuyo	Kikuyo	Ichu	Torurco	Torurco
	Papal	Papal	Vetiveria	Vetiveria
	Chiliua	Chiliua		Paja pichi
	Champa	Champa		Tanzania
	Rye Grass	Rye Grass		
	Avena Forrajera	Avena Forrajera		

- **Criterios De Selección**

- Tolerancia a condiciones climáticas y latitudinales.
- Tolerancia a factores antrópicos.
- Adaptabilidad.
- Rápido crecimiento.
- Tipo de propagación (semillas, esquejes, cespedones, estolones).
- Características de profundidad de raíz.
- Velocidad de crecimiento.
- Área de cobertura.
- Tipo de crecimiento (erguido o rastro).
- Perenne o anual.
- Combinación de mínimo 3 especies (al menos una leguminosa).
- Disponibilidad comercial.

A continuación daremos una descripción del pasto Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*). Que será el pasto con el cual se efectuara las pruebas de laboratorio de esta tesis.

Pasto Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*)

El Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*) es una de las gramíneas más comunes y más bien adaptadas a la zona de clima frío. No prospera bien en suelos muy pobres y tolera la sequía. Tiene raíces profundas; es uno de los pastos más útiles para control de erosión. Se le utiliza en muchas partes del mundo, en climas tropicales (Ogasawara, 1996). Su crecimiento es muy rápido y tiene muy buena cobertura de raíz semiprofunda y estructura de estolón fuerte. Tolerancia a las sequías pero es muy susceptible a las heladas. Las plantas se extienden superficialmente y en los nudos de los rizomas y estolones se forman raíces, retoños y ramificaciones. Se puede formar un césped denso con un espesor que puede llegar a 50 centímetros semejante a un colchón. Esta especie se propaga vegetativamente por medio de estolones o mediante semilla. Crece muy bien en suelos de textura arcillosa. Es resistente a las quemaduras y permite el pisoteo (Suárez J., 2004).

A continuación se muestra diversas especies de pasto usadas en el control de erosión. (Ver TABLAS 2-9,2-10).

TABLA 2-9 Características de algunos pastos utilizados para el control de la erosión (De Suárez J., 2004).

Nombre Científico	Nombre Común	Altitud msnm	Temperatura C°	Lluvias mm/año	Reproducción	Invasor	Resistencia a quemas	Resistencia a pisoteo	Resistencia a sequías	Terreno
Vetiveria Zizanoides	Vetiver	0 a 2000	5 a 45	600 a 6000	Tallos enraizados	No	Si	Si	Si	Preferentemente húmedo
Brachiaria Decumbes Staff	Braquiaria	0 a 2200	20 a 30	800 a 4000	Cepas, estolones y semillas	Si	Si	Si	Si	Bien drenado, ácido
Melinis Minutiflora	Gordura	300 a 3300	18 a 27	800 a 3000	Semillas	No	No	No	No	Bien drenado a húmedo
Pennisetum clandestinum	Kikuyo	0 a 3500	10 a 30	800 a 2000	Estolones y semillas	Si	Si	Si	Si	Bien drenado a húmedo
Hiparrhenia Rufa Stapf	Puntero	0 a 2000	20 a 30	600 a 1000	Cepas y semillas	No	No	Si	Si	Bien drenado
Dicanthium aristatum	Angleton	600 a 1800	23 a 30	1000 a 4000	Estolones y semillas	Si	No	Si	No	Bien drenado neutro
Festuca arundinacea	Festuca	2000 a 3200	15 a 20	900 a 1700	Semillas	No	No	No	No	Húmedo a bien drenado
Panicum Maximun	Guinea	0 a 2200	20 a 30	1000 a 4000	Capas y semillas	No	No	No	No	Húmedo a bien drenado

TABLA 2-10 Características de algunos pastos utilizados para el control de la erosión (De Suárez J., 2004).

Nombre Científico	Nombre Común	Altitud msnm	Temperatura C°	Lluvias mm/año	Reproducción	Invasor	Resistencia a quemas	Resistencia a pisoteo	Resistencia a sequías	Terreno
<i>Brachiaria Mutica</i>	Para Admirable	0 a 1700	22 a 30	1000 a 4000	Estolones	Si	Si	Si	Si	Húmedo
<i>Disitaria Decumbens</i>	Pangola	0 a 2200	18 a 30	1000 a 2000	Estolones	Si	Si	Si	Si	Húmedo a bien drenado
<i>Lolium Perenne</i>	Raigras Perenne	2200 a 3000	10 a 20	1500 a 4000	Semilla	No	No	Si	No	Húmedo
<i>Centrocoma Plumieri</i>	Centro	0 a 1600	25 a 30	600 a 1000	Cepa (rastrero)	Si	No	Si	Si	Secos
<i>Pueraria phasecoloides</i>	Kudzu Tropical	0 a 2000	22 a 30	1000 a 2000	Cepa (rastrero)	Si	No	No	No	Húmedo a bien drenado
<i>Demodium spp</i>	Pega Pega	0 a 3000	18 a 30	1000 a 2000	Cepa (rastrero)	Si	No	No	Si	Bien drenado
<i>Stenotratum secundatum</i>	San Agustín	300 a 2000	18 a 25	1000 a 2000	Cepas	Si	No	No	Si	Bien drenado
<i>Penniceteum pupurerum</i>	Elefante	300 a 2300	18 a 27	1000 a 3000	Cepas, estolones y semillas	Si	No	Si	No	Húmedo neutro
<i>Cymbopogum Citratus</i>	Limonaria	300 a 2000	18 a 25	1000 a 3000	estolones	No	No	Si	Si	Bien drenado

2.4 COMPOSICIÓN Y APLICACIÓN DE CANALES REFORZADOS CON PASTO

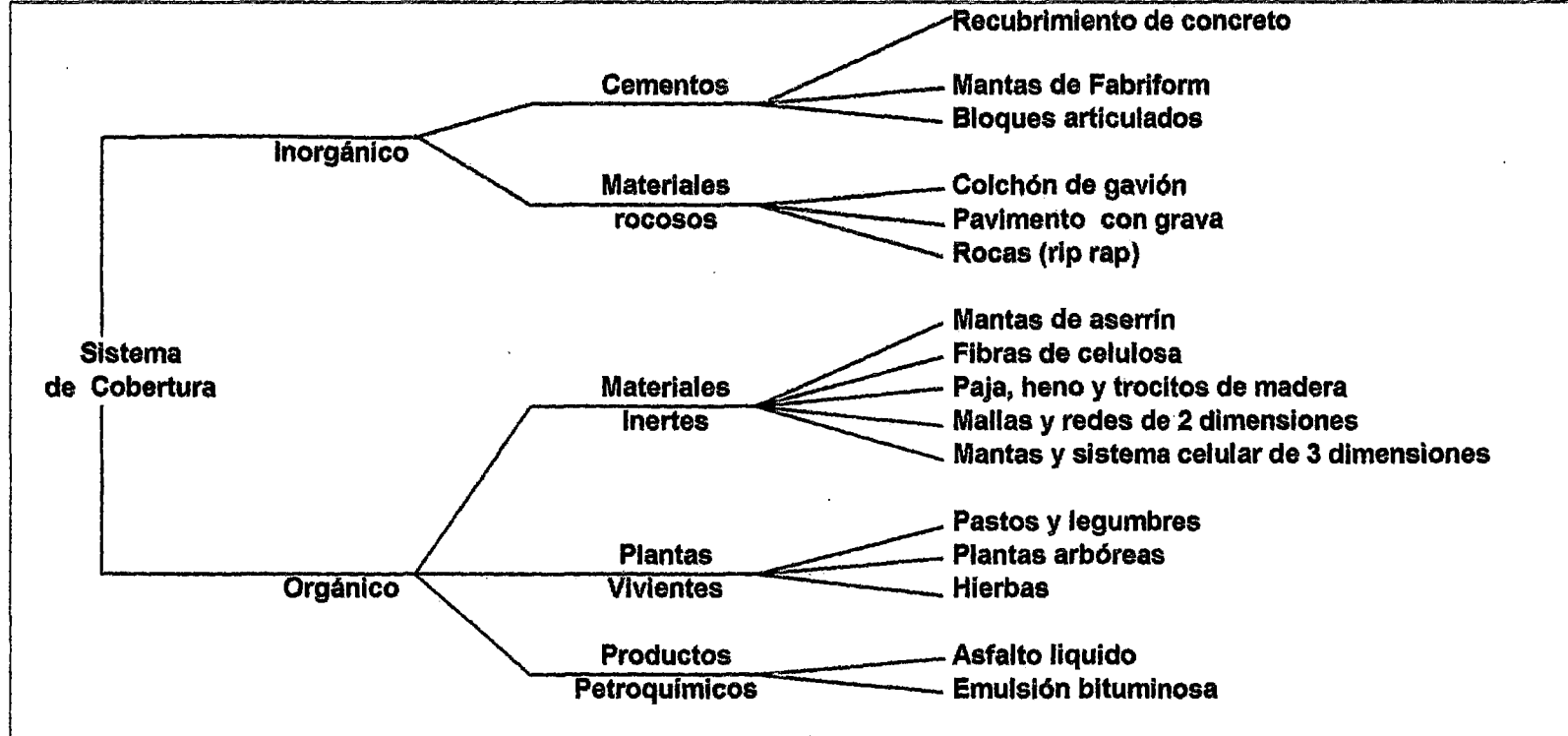
Esta sección muestra los elementos constituyentes de un canal reforzado con pasto y las funciones que este cumple. Pero antes mostraremos de forma resumida los sistemas de cobertura de suelo para tener noción de cómo están clasificados los sistemas de cobertura orgánica y afines; que se da en la FIGURA 2-19.

2.4.1. Canales Reforzados con Pasto

Antes de considerar los sistemas de reforzamiento, es necesario entender las funciones ingenieriles de la cobertura de pasto (Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E., 1987):

- El pasto suministra cobertura al terreno o suelo, en particular implementa protección a la superficie del suelo cuando este esta sujeto a velocidades altas de flujo y arrastre.
- La estructura de raíces refuerza el suelo adyacente a la superficie mediante la formación de un compuesto tierra –raíces, el cual tiene más resistencia a la erosión que el suelo solo.
- La vegetación encima de la superficie de tierra puede reducir en velocidad de erosión en esta por la interferencia con el flujo de agua superficial.
- En adición a estas funciones ingenieriles el diseño puede adicionar una importancia ambiental (visual, agricultura) y atributos económicos del pasto.

FIGURA 2-19 Materiales de cobertura de suelo para control de erosión (Adaptado de Gray, D. y Sotir, R., 1996)



Erosión de la Superficie de Pasto

La erosión de la superficie de pasto ocurre en diferentes formas (Ver FIGURA 2-20) (Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E., 1987):

- a) Cuando el flujo empieza, la vegetación suelta es removida por la fuerza de dragado del flujo de agua.
- b) Localmente el flujo puede socavar lentamente el suelo adyacente a las raíces de una planta, por esa razón el anclaje de la planta es removido lentamente.
- c) Las plantas de pasto individuales con pobre estructura de raíz desarrollada, son arrancadas del suelo o se rompen en las raíces. El flujo de agua causa mas altas fuerzas de arrastre en plantas que presenten un sustancial perfil al flujo en comparación con aquellas que están flexionadas.

Separadamente de la erosión localizada de plantas individuales, una más extendida denudación del compuesto raíz-suelo puede ocurrir debido a uno o más de los siguientes efectos:

- d) Progresivo enrollamiento debido a las fuerzas de arrastre local en el borde de la superficie de grass.
- e) Deslizamiento de la superficie poca profunda.
- f) Levantamiento debido a la presión excesiva del flujo subterráneo.

Los atributos físicos de las plantas mas específicamente del pasto, determinan la efectividad de la cobertura de pasto y estos son:

- Longitud y rigidez del tallo.
- Área de superficie de la hoja.
- Resistencia y profundidad de la estructura de raíces.
- Densidad de rizomas, estolones y estructuras de raíces.(Ver FIGURA 2-21)
- Área cubierta por el pasto.

2.4.2 Concepto de Reforzamiento

El uso de reforzamiento en canales con pasto realza las funciones ingenieriles de la cobertura, mientras el pasto retiene sus atributos económicos y ambientales.

Tipos y Elementos Constituyentes del Pasto Reforzado

Los tipos de refuerzo usado en canales de pasto reforzado pueden ser divididos hacia 2 principales grupos: Con geotextil o geosintético y con concreto (Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E., 1987). Los elementos principales que determinan el desempeño del sistema de pasto reforzado son: (Ver FIGURA 2-22)

Flujo en canal abierto: La velocidad de flujo es generalmente alta y por consiguiente considerable energía originada por esta es elevada, cuando el flujo es supercrítico la energía originada por la velocidad es mayor en relación con la energía originada por la altura de flujo.

Capa protectora: Esta formada por el refuerzo, las plantas o pasto y el suelo con las que estas interactúan. La capa protectora resiste la acción erosiva del flujo de agua y de esta manera protege el subsuelo.

Capa Inferior: Si se usa el pasto en conjunción con reforzamiento de concreto, esta capa inferior podría comprender un geotextil o material granular. La capa inferior puede servir en control de erosión, filtración, y regular la función del reforzamiento de la raíz.

Subsuelo: Este es protegido directamente del ataque por la capa protectora. Además el subsuelo debe sostener el crecimiento del pasto y ser estable bajo condiciones de flujo. El flujo de infiltración causará parcial o completa saturación lo cual podría afectar a la estabilidad del subsuelo.

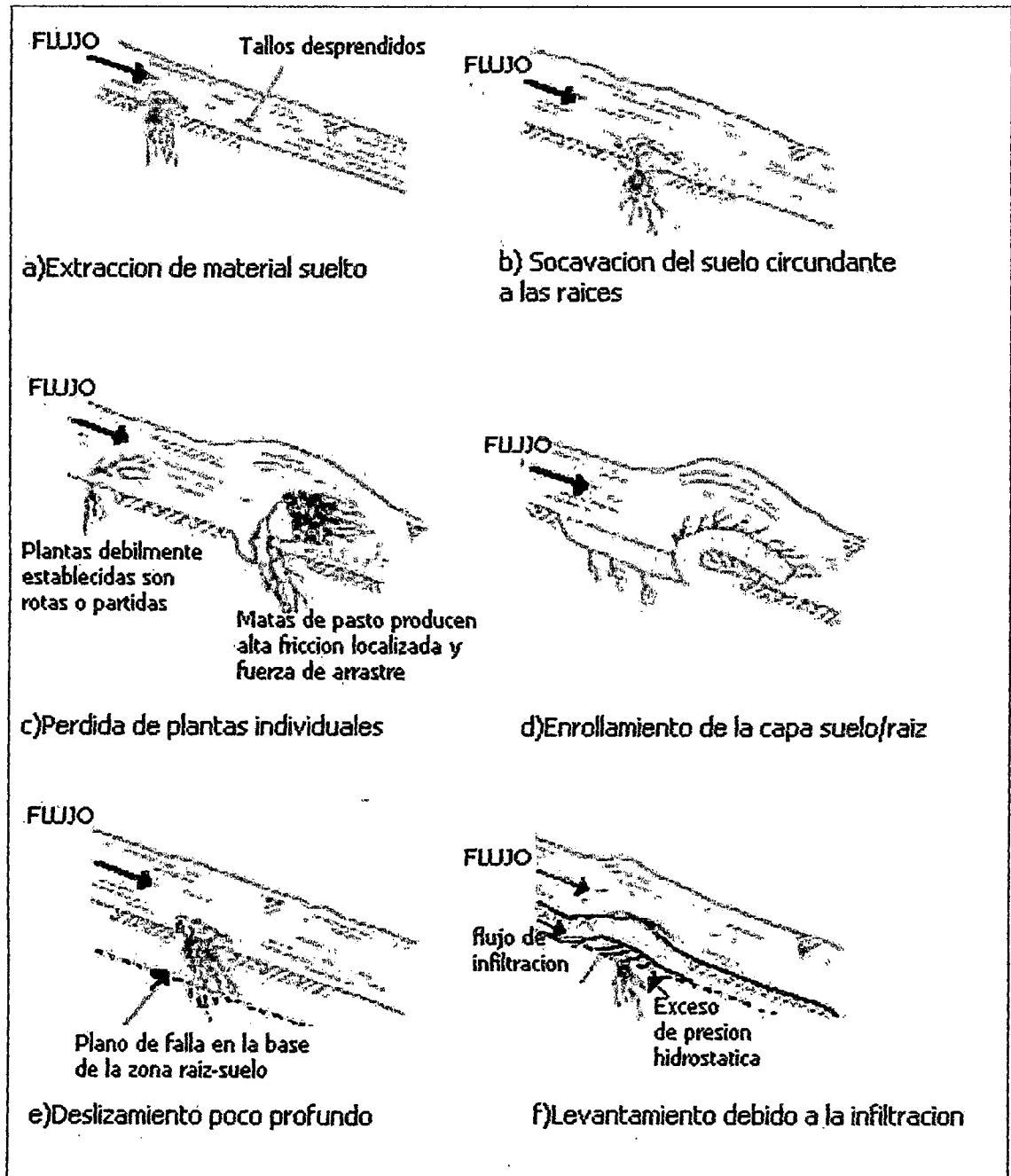
Estructura de las raíces: Esta ayuda al anclaje de la capa protectora con el subsuelo, y modifica la resistencia de el subsuelo dentro de la zona de la raíz.

Flujo de infiltración: este será pendiente abajo en dirección de la pendiente de las aguas superficiales y abajo hacia el subsuelo; se debe tener como un principio general que si existe excesivo flujo de infiltración, este podría afectar la durabilidad del talud.

Anclajes: Ayuda a restringir el movimiento de la capa protectora.

La efectividad de todos los sistemas depende de establecer una construcción compuesta con contacto íntimo entre las partes componentes. El desempeño de los canales es particularmente dependiente de la efectividad de las condiciones o detalles de borde, sea la manera en que los sistemas compuestos están terminados en la cresta, pies y costados en el detalle de las juntas.

FIGURA 2-20 Mecanismos de erosión para obras hidráulicas revestidas con pasto (Adaptado del Reporte 116 del CIRIA, 1987)



Fuente: CIRIA Report 116, (1987)

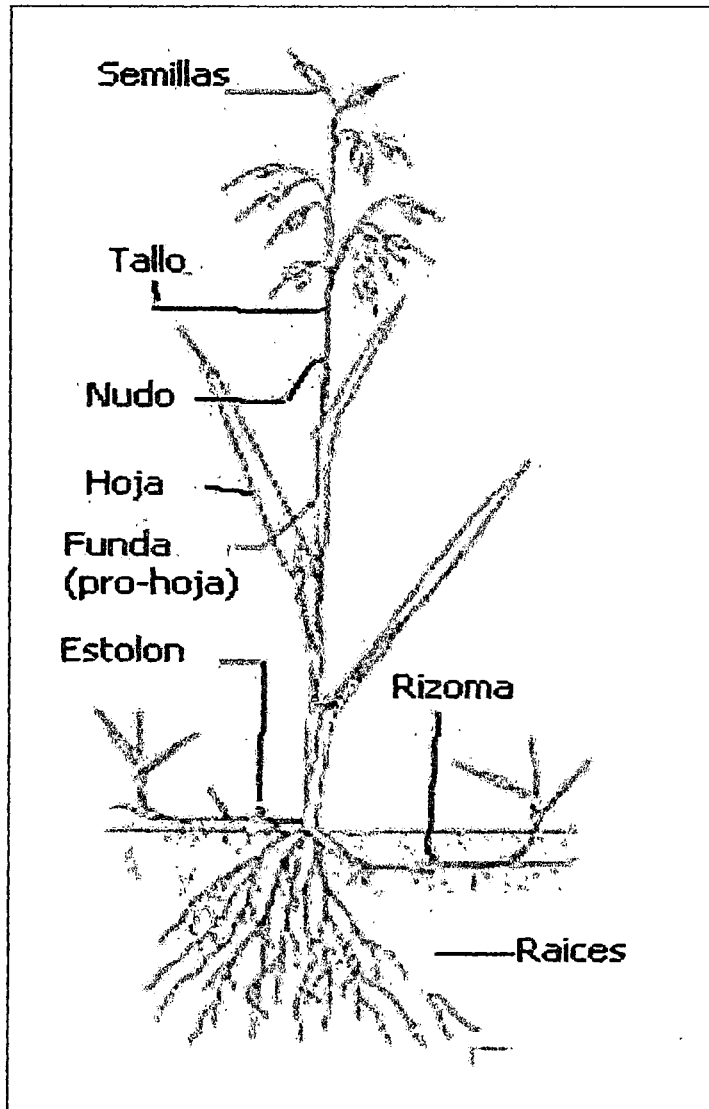
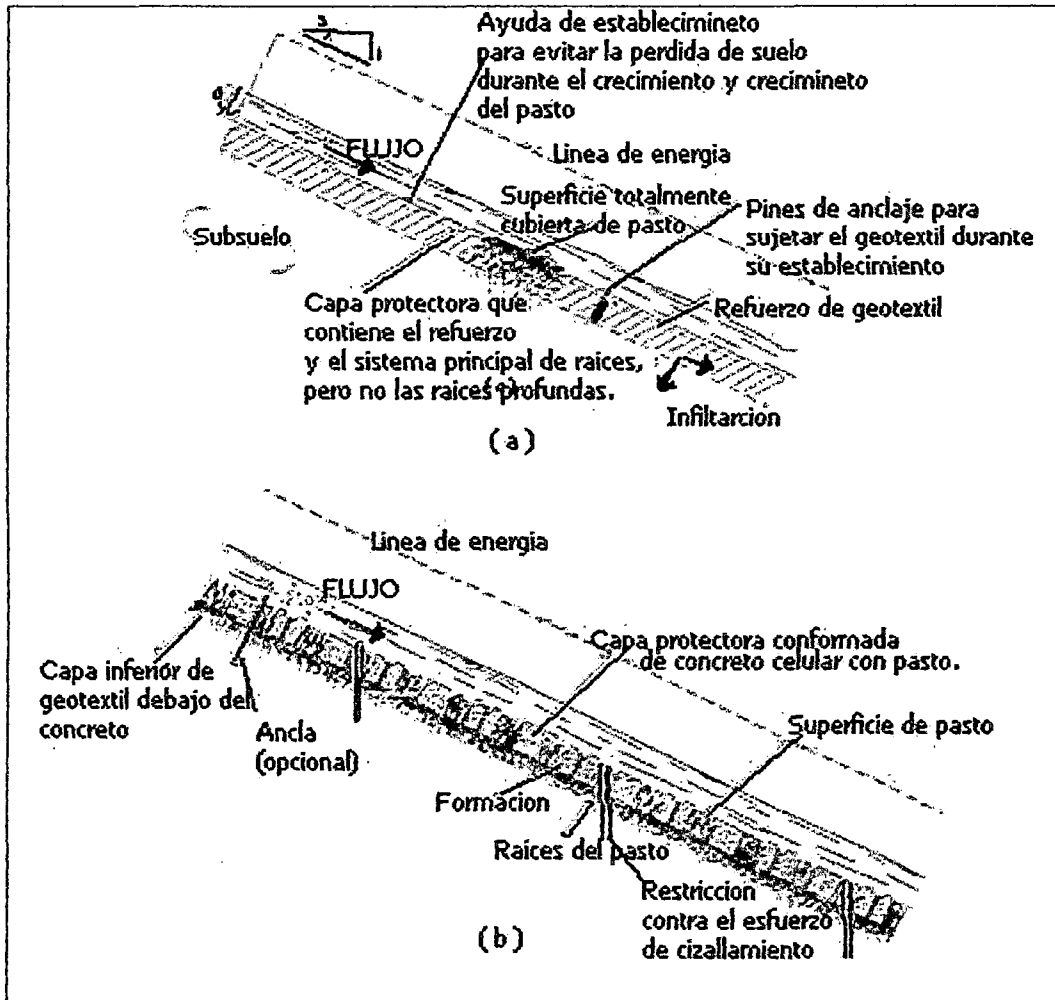
FIGURA 2-21 Principales características del Pasto (López, C. J., 1999).

FIGURA 2-22 Secciones de 2 sistemas protegidos por pasto para la protección de canales. (a) Compuesto biotécnico. (b) Bloques de concreto (Adaptado de Hewlett et al., 1987).



El Refuerzo de Geotextil y Geosintéticos

Materiales geotextiles y geosintéticos están actualmente disponibles para uso como refuerzo de pasto, son tela tejida, mallas o alfombras, los cuales están subdivididas en 3 grupos principales (Austin, D. N., y Driver, T., 1995):

- 2-Dimensiones: Tela tejida y mallas.

- **3-Dimensiones Abierto:** Alfombras sintéticas las cuales son posteriormente rellenas con suelo fértil y protegidas superficialmente por pasto.
- **3-Dimensiones Abierto:** Alfombras sintéticas rellenas con material bituminoso y grava.

Con refuerzo de geotextil y/o geosintético el área de superficie entera es sembrada con pasto, y las raíces se atan o sujetan alrededor de los geotextiles y/o geosintético para formar una alfombra continua de geotextil-suelo-raíz, por lo cual el uso de geotextil y/O geosintético puede suministrar muchas ventajas a la superficie de pasto, tales como:

- Mejora de la cobertura del terreno y consecuentemente la protección de la superficie de suelo de la erosión. El desarrollo de sitios locales de debilidad disminuirá en gran medida, por ejemplo en tráfico concentrado, daño de ganado o sequía, serán también retardados por la presencia de refuerzo.
- Asistencia a la estructura de la raíz al restringir las partículas del suelo de la superficie de la erosión por flujo de agua.
- Implementa una continuidad lateral entre las plantas de pasto y consecuentemente una reducción en el riesgo de falla localizado debido a la erosión de plantas individuales.

Recomendaciones

Los geotextiles de 3 dimensiones pueden dar garantía de un buen crecimiento del pasto. Además se debe tener cuidado en la instalación de geotextiles pues se puede encontrar vacíos entre el geotextil y el terreno lo cual puede ser llamados zonas de falla probables. El tamaño de abertura de los geotextiles debe ser suficientemente grande como para dejar que las plantas se desarrollen (Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E., 1987).

2.4.3. Aplicaciones de Canales Reforzados con Grass

Es importante señalar que la mayoría de pastos existentes no pueden tolerar la inundación o anegación por más que unos días, sin empezar a morir. Además que el pasto debe ser solo usado en situaciones donde la frecuencia de ocurrencia de flujo es baja. Las aplicaciones son típicamente asociadas con protección de áreas de canales y terraplenes sujetos a flujo de tormenta, inundación u otros eventos infrecuentes.

El pasto reforzado debe ser usado en las siguientes situaciones (Hewlett, H. W. M. Boorman, L. A. y Bramley, M. E., 1987):

- a) Cuando la velocidad de flujo es suficiente alta para causar una peligrosa erosión, la cual es de esperar que el pasto solo no pueda resistir.
- b) Cuando el riesgo de no lograr una adecuada protección de la superficie sea alto, el que es asociado a la instalación del pasto solo; tales como sectores localizados desnudos

En general en canales donde la velocidad de flujo es alta, se requiere reforzamiento del pasto, tal es el caso de los flujos supercríticos; se debe enfatizar que el pasto reforzado es igualmente aplicable a altas velocidades de flujos subcríticos como en una entrada de una compuerta anegada.

Las principales aplicaciones de grass reforzado para protección de erosión son (Powledge, G. R. et al, (1989) y Hewlett, H. W. M. et al, (1987)):

- En la superficie de terraplenes aguas abajo, en el cual el riesgo de desborde durante eventos de inundación es extrema, tales como presas de tierra, terraplenes de almacenamiento de inundación, terraplenes de inundación a lo largo de ríos, estuarios y costas; y terraplenes de carretera en planicies de inundación.
- En canales de demasías, que llevan flujos ocasionales de alta velocidad: Tales como aliviaderos auxiliares en presas, aliviaderos de estanques de

almacenamiento de inundación, canales de alivio de inundación y canales de desviación.

- Para proteger los taludes de las presas de cierre de las minas y taludes de las presas de tierra.

CAPÍTULO 3.- DESARROLLO TÉCNICO Y EXPOSICIÓN DE HIPÓTESIS

En este capítulo se determina la hipótesis y características del modelo, se dan los parámetros del cuál dependen los resultados de esta investigación, y se enuncian las ecuaciones matemáticas para su posterior contraste en el Capítulo 5.

3.1. GENERAL

El diseño de canales de pasto reforzado no se puede considerar de manera totalmente analítica. El desempeño del pasto reforzado es determinado por una interacción compleja de los elementos constituyentes de este. Actualmente estos procesos físicos y propiedades inferibles de geotextiles y pasto no pueden ser totalmente descritos en términos cuantitativos.

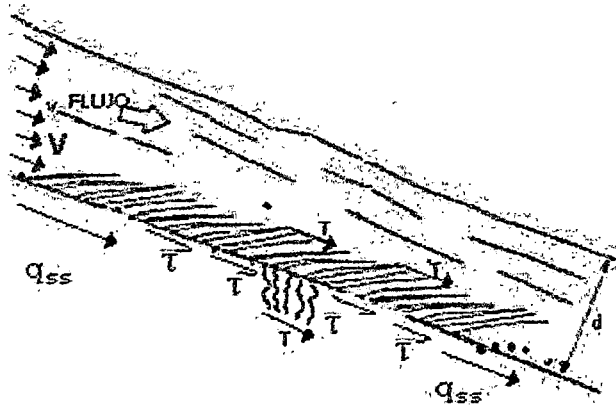
Por lo cual el desempeño de diseño es largamente empírico e involucra una consideración sistemática de cómo cada elemento constituyente, se comporta bajo condiciones de servicio y como sus propiedades ingenieriles pueden ser seguras al ser utilizadas.

3.2. PLAN DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

La etapa de planificación involucra evaluar la factibilidad de establecer los parámetros de diseño y se seguirá los siguientes puntos:

- Caracterización del canal o estructura a proteger.
- Frecuencia y duración de flujo. Esto en lo que respecta a la prueba misma y para que la vegetación pueda recuperarse.
- Riesgo en Falla.- En el cual se define la aceptabilidad de falla.
- Caudal y carga hidráulica.
- Propiedades del subsuelo.
- Mantenimiento y manejo del pasto.

En lo que respecta a la metodología de investigación esta se realizará en un modelo físico, el cual ya fue utilizado en la tesis del Ingeniero Luis Alberto de la Cruz Fallaque. Este modelo fue construido con la finalidad de que éste sea capaz de conducir agua hasta escurrirla en taludes de prueba simulando de esta manera el flujo por escorrentía superficial originado por las lluvias, de donde se plantea estudiar la erosión superficial en un talud de corte o relleno tal y como se muestra en la FIGURA 3-1.

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

En la figura se muestran las variables que actúan sobre la cobertura vegetal.

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.

d = Tirante del flujo

Partiendo de la premisa que la erosión depende directamente de los siguientes factores según Gray y Sotir (1996):

- Topografía.
- Clima (Intensidad de lluvia y duración de donde se obtiene la velocidad e escorrentía y un tiempo de acción).
- Suelo (Erodibilidad que depende del tipo de suelo y compactación).
- Técnica que se usa para la cobertura sea esta Bioingenieril o Biotécnica.

Se puede decir que la Erosión (e), depende de las siguientes variables medibles: Pendientes del Talud (S), fracción de área de vegetación (M), altura de vegetación (h_v), caudal de escorrentía (q), tiempo de escorrentía (t), compactación del suelo ($\%c$), porcentaje de materia orgánica ($\%org$), diámetro representativo (D_s) y humedad ($\%h$); así como de las siguientes variables no medibles : Tipo de vegetación (veg), técnica de bioingeniería o biotécnica

(bioi), para lo cual es necesario realizar ensayos de laboratorio para determinar relaciones entre estas variables .

De todo esto se tiene a través de un análisis dimensional que:

$$e = f(S, M, hv, q, t, \%c, \%org, Ds, \%h, veg, bioi) \dots \dots (3-1)$$

Pero para efecto de estudio que se llevará a cabo en el modelo físico, se partirá del siguiente análisis.

$$e = f(q, t, bioi, veg) \dots \dots \dots (3-2)$$

Lo que significa que se realizan mediciones variando los parámetros descritos en esta última ecuación, tomando los siguientes enunciados como hipótesis:

1.-Los taludes estarán en estado superficialmente saturado, para esto antes de cada prueba se regó.

2.-Para todas las pruebas, se tomaron los siguientes parámetros como constantes:

- Suelo, humedad del suelo, según la bibliografía estudiada la humedad no es un parámetro importante en la erosión laminar de un suelo, es decir que su variación no genera cambios importantes respecto a la pérdida de suelo (Temple, 1987 y Hanson, 1988).

- Pendiente del terreno aproximadamente $S_o = 0.52$.

- Especie de pasto, altura de pasto y densidad de pasto, cabe resaltar que la densidad y altura del pasto, no son constantes en toda la cobertura, debido a que el crecimiento de este no es del todo uniforme, pero se puede asumir constante debido a su poca variabilidad.

- Los parámetros a calcular se determinaron a partir de la topografía y de mediciones realizados desde una pequeña plataforma corrediza (Ver CAPÍTULO 4-3) ubicada encima del canal, desde la cual se determinarán parámetros tales como velocidad y tirante del flujo, y profundidad de erosión.

A continuación se describirá más detalladamente cada parámetro mencionado anteriormente.

a) PENDIENTE:

La pendiente a usar es de 1:2 (V:H), debido a que generalmente ésta es la pendiente límite para el establecimiento de vegetación de taludes con pasto, además que es una pendiente recomendable para el tipo de suelo usado, que es un suelo arcillo limo arenoso; también se adoptó esta pendiente para realizar un estudio comparativo con los resultados antes realizados con el pasto Tanzania hechos por el Ing. Luis Alberto de la Cruz.

b) VEGETACIÓN:

Se utilizará el pasto Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*), especie oriunda de las regiones tropicales de alta montaña en el África Central y Oriental, pero ampliamente difundida en zonas desde los 0 a 3500 m.s.n.m en toda América con gran capacidad de soportar el frío y a la vez con capacidad de adaptarse bien a zonas tropicales.

Altitud: 0-3500 m.s.n.m

Temperatura : 10-30° C

Lluvias mm/año : 800 a 200

Reproducción : Estolones y semillas

Además reúne otras características importantes, como su excelente resistencia a la sequía y su resistencia al pisoteo. En su instalación se usarán cespedones traídos desde la ciudad de Juliaca en el departamento de Puno, lo cual conllevará a un período inicial de aclimatación.

c) ÁREA DE COBERTURA VEGETAL

Se usarán 2 técnicas de implantación: La primera es la de sembrar el pasto Kikuyo en el llano y luego mediante cespedones trasladarlo al talud, claro esta, esto ya una vez que el pasto se haya desarrollado; y la otra es de sembrar el pasto Kikuyo directamente en el talud, y esto se hizo para saber como influirá en el crecimiento inicial del césped.

Esta técnica de sembrado vía cespedones fue adoptada por ser de más rápida instalación y recomendada para este caso específico por profesionales de la Universidad Agraria de la Molina principalmente por el Ingeniero Efraín Malpartida.

La fracción de cobertura (# de tallos / m²) esta representada por el parámetro "M" y es necesario para determinar el coeficiente de Manning para la vegetación.

d) CAUDAL DE ESCORRENTÍA

Se probaron caudales aproximados de 10, 20, 30, 40, 55 y 70 l/s, los cuales se escogieron a partir de la experiencia en los ensayos de Laboratorio llevada a cabo con el Ing. Luis Alberto de la Cruz.

e) TIEMPO DE ESCORRENTÍA

Se consideraron tiempos de acción de flujo de 10, 30 y 60 minutos, contados a partir del momento en que el flujo ingresa al talud.

f) OBRAS DE BIOTECNOLOGÍA

Se planteó inicialmente el uso de geosintéticos Geoceldas y Macmat, pero finalmente se concluyó por la bibliografía, que el uso de Macmat no es aconsejable para el establecimiento de cespedones y esto es conocido por ensayos realizados por la Universidad Católica del Oriente de Colombia (Ver Anexo D), en los que se noto un mal comportamiento del sembrado de cespedones con Biomantos y Agromantos que tienen semejanza con el Macmat,

de lo cual se optó por no usar Macmat; además se usó esquejes de céspedón para la siembra en las geoceldas (Geoweb) y esto por ser las geoceldas de tamaño menor a los rectángulos de los céspedes.

g) ALTURA DE VEGETACIÓN

Para todos los casos con pruebas de taludes vegetales se considera una altura de promedio de 20 cm. que corresponda a un tiempo de crecimiento de 15 días en época de verano en la que se realizaron estas predicciones.

h) TIPO DE SUELO

Se tuvo en consideración que se necesitaba un terreno que permita la instalación del pasto, por lo que se utilizó suelo de cultivo del distrito de Carabaylo para cubrir 50 cm. de espesor del talud, además de acuerdo a los ensayos de laboratorio llevados a cabo en el mismo, se determinó que este es un suelo Arcillo limo arenoso de baja plasticidad (CL-ML), según la clasificación SUCS (Ver Anexo E).

También se tuvo especial consideración en elegir un suelo altamente erosionable, por lo cual se utilizó el suelo antes citado, para fines de exposición más crítica.

3.3 METODOLOGÍA

A continuación se explicaran 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 90° para todos los caudales (Ver TABLA 4.1).
- Pendiente de los taludes.- Que se calculó 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 H e ítem 4.3.2.

- **Altura representativa del pasto (h), la cual fue medida en campo para cada prueba, pues la vegetación varía sus características a través del tiempo.**
- **Número de tallos por unidad de área (M), medido en campo.**
- **Tasa de crecimiento de la raíz del pasto Kikuyo, calculada siguiendo el procedimiento descrito en el Capítulo 4**
- **El tirante del flujo para cada prueba, obtenido a partir de la medición de la cota del espejo del agua y el lecho del canal, ver Anexo F e ítem 4.3.2.**
- **Las velocidades de flujo para cada prueba, calculados en campo con la ayuda de una solución de permanganato de Potasio en agua (trazador visual), ver Anexo A y G.**

Debido a las fluctuaciones pequeñas de tirantes y velocidades a lo largo y ancho del talud, y características del pasto no del todo uniformes; se optó por tener en cuenta los siguientes 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.**
- **La distribución de tirantes para una sección transversal es uniforme.**

3.3.1 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 2.1.10 describen el desarrollo de las investigaciones en transporte de sedimentos. La mayoría de las fórmulas planteadas en la parte teórica son producto de muestreos y ensayos en laboratorio con lechos arenosos y gravosos, y están en función del tamaño representativo del suelo D_s ; por lo tanto, no se pueden plantear estas ecuaciones para desarrollar esta investigación. (De la Cruz, 2005).

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

$$\text{Dubois, 1879: } q_{bv} = k\tau_0 (\tau_0 - \tau_c) \dots \dots \dots (3-3)$$

$$\text{O' Brien y Rindalub, 1934: } q_{bv} = k' (\tau_0 - \tau_c)^m \dots \dots \dots (3-4)$$

$$\text{Temple, 1987: } \frac{d\varepsilon}{dt} = k (\tau_e - \tau_c)^a \dots \dots \dots (3-5)$$

Estas ecuaciones están en función de $(\tau_0 - \tau_c)$ y $(\tau_e - \tau_c)$ donde τ_0 es el esfuerzo cortante total, τ_e es el esfuerzo cortante efectivo y τ_c es el esfuerzo crítico del suelo; ahora estas ecuaciones podrían usarse para suelo fino, pero para superficies vegetadas solo se pueden usar aquellas expresiones que tengan involucrado el esfuerzo cortante efectivo (τ_e); pues en este se involucran también la acción de la vegetación (que es motivo de investigación de esta tesis) expresada en 2 variables: " C_{Ft} " y " nf " que son el factor de cobertura vegetal para el área de falla y el número de Manning global, que inicialmente se puede asumir igual al número de Manning para una superficie vegetada.

De lo anteriormente dicho se optó por usar una sola ecuación:

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

Esta ecuación se puede simplificar, debido a lo que se explicó en el ítem 2.1.10, τ_c es cero o muy pequeño para suelo finos el cual es nuestro caso, esta por investigaciones de Shaikh et al. (1988) en arcillas, y al ser el suelo una arcilla limo arenosa de baja plasticidad el utilizado en esta investigación, se puede escribir:

$$\text{Temple, 1987: } \frac{d\varepsilon}{dt} = k(\tau_e)^n \dots\dots (3-6)$$

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

Temple, 1987

La ecuación de Temple fue desarrollada para determinar volúmenes de erosión por unidad de Área y por unidad de tiempo en canales vegetados y esta es determinada por muchas variables que se determinan para cada tipo específico de vegetación y suelo, de lo cual se desarrolla la ecuación de temple de la siguiente manera:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k(\tau_e)^n$$

$$\rightarrow \frac{d\varepsilon}{dt} = k(\gamma DS(n'/nf)^2 (1 - C_{Rt}))^n$$

Integrando la ecuación anterior:

$$E(t_0) - E(t) = k \int_{t_0}^t [\gamma DS(n'/nf)^2 (1 - C_{Rt})]^n dt \dots\dots(3-7)$$

Donde $E(t_0)$ es la elevación de la superficie del suelo en la condición inicial de tiempo t_0 y $E(t)$ es la elevación de la superficie del suelo en el tiempo t , ahora la ecuación anterior puede ser aplicada para casos en los que la erodibilidad del suelo este dentro de una tendencia constante, en el caso en que el tiempo de prueba no sea constante la ecuación anterior se puede escribir de la siguiente manera:

$$E_0 - E_N = k \sum_{i=1}^N \left[\gamma D_i S_i (n' / n_f)^2 (1 - C_{F_i}) \right]^a \Delta t_i$$

$$\Delta E_N = k \sum_{i=1}^N \left[\gamma D_i S_i (n' / n_f)^2 (1 - C_{F_i}) \right]^a \Delta t_i \dots \dots \dots (3-8)$$

$$K = \Delta E_N / \left[\sum_{i=1}^N \left[\gamma D_i S_i (n' / n_f)^2 (1 - C_{F_i}) \right]^a \Delta t_i \right] \dots \dots \dots (3-9)$$

Donde:

K: Coeficiente de relación de erosión.

ΔE_N : Profundidad de erosión acumulada hasta la prueba N.

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

a: Exponente de relación de erosión .

γ : Peso específico, N/m^3

d: tirante del flujo, m

S: pendiente de energía, m/m.

n': Coeficiente de la rugosidad del suelo, que fue investigado bibliográficamente, encontrándose un valor de 0.0156 para suelos cohesivos según estudios realizados por Temple (1980) y Hanson (1989), en suelos cohesivos para aliviadores y canales.

nf: Coeficiente global que varía a través del tiempo de acuerdo a la morfología del canal y macro rugosidades, siendo "nf" calculado según la formula dada en (3-10).

Δt_i : Duración de la prueba i.

C_{Ft} = Factor de cobertura vegetal para el área de falla, que denota el decaimiento de la cobertura vegetal, es decir como esta va desapareciendo o siendo dañada conforme van pasando las pruebas, es por eso que C_{Ft} según la ecuación (3-11).

$$n_f = n - \left(n - n_b \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right)^d \right) \dots\dots(3-10).$$

$$C_{Ft} = C_F * \left(1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right)^b \right) \dots\dots(3-11).$$

Donde:

n = Número de Manning debido a la vegetación calculado según las formulas dadas en los ítems 2.1.4 y 2.1.5

n_b = Número de Manning representativo de la superficie del suelo erosionada con al vegetación removida, según la experiencia en canales no revestidos n_b es igual a 0.02 (Chow, 1959).

C_F = El factor de cobertura vegetal antes de la erosión, que en nuestro caso varia de 0.9 a 0.95 según Gray y Sotir, (1996), por lo cual nosotros escogeremos el caso mas critico en el cual C_F es 0.9.

ε =La profundidad de erosión ($\varepsilon \leq \varepsilon_1$).

ε_1 =La profundidad de erosión correspondiente a la completa falla del revestimiento vegetal, que según las investigaciones realizadas por Temple, 1987; ε_1 es igual a 0.06 metros.

b y d = Exponentes determinados empíricamente, según Temple,1987 ; b y d son iguales a 3 .

Siendo la ecuación (3-8) la que se utilizará para calcular el coeficiente de erodibilidad K y el exponente de erodibilidad a , para lo cual se tendrá que resolver un sistema de ecuaciones.

De la ecuación (3-8) se obtiene el sistema de ecuaciones dados en (α) :

$$\Delta E_N = \kappa \sum_{i=1}^N w_i^a * \Delta t_i$$

$$(\alpha) \left\{ \begin{array}{l} \Delta E_1 = \kappa w_1^a \Delta t_1 \\ \Delta E_2 = \kappa (w_1^a \Delta t_1 + w_2^a \Delta t_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta E_N = \kappa (w_1^a \Delta t_1 + \dots + w_N^a \Delta t_N) \end{array} \right.$$

N=Numero de pruebas para cada fase (Fase I corresponde a al cobertura de Geoweb con pasto Kikuyo y la Fase II corresponde a la cobertura de pasto Kikuyo).

Donde N=18 para la Fase I y N=17 para la Fase II, las ecuaciones de (α) se pueden escribir:

$$\frac{\Delta E_1}{\Delta t_1} = \kappa \tau_1^a$$

$$\frac{\Delta E_2 - \Delta E_1}{\Delta t_2} = \kappa \tau_2^a$$

$$\frac{\Delta E_3 - \Delta E_2}{\Delta t_3} = \kappa \tau_3^a$$

$$\vdots$$

$$\vdots$$

$$\frac{\Delta E_{N-1} - \Delta E_{N-2}}{\Delta t_{N-1}} = \kappa \tau_{N-1}^a$$

$$\frac{\Delta E_N - \Delta E_{N-1}}{\Delta t_N} = \kappa \tau_N^a$$

De donde se saca logaritmo y se obtiene el sistema matricial (3-12):

$$\begin{bmatrix} 1 & \ln \tau_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \ln \tau_N \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \ln K \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \left(\frac{\Delta E_1}{\Delta L_1} \right) \\ \vdots \\ \ln \left(\frac{\Delta E_N - \Delta E_{N-1}}{\Delta L_N} \right) \end{bmatrix} \dots\dots(3-12)$$

$$\Rightarrow \bar{B} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \bar{C}$$

Multiplicando por la transpuesta de la matriz B, se obtiene el sistema matricial (3-13) que da la solución para las constantes K y a :

$$\Rightarrow \bar{B}^T \cdot \bar{B} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \bar{B}^T \cdot \bar{C} \dots\dots\dots(3-13)$$

Donde: $x = \ln(K)$ y $y = a$

K = Constante de erosionabilidad del terreno.

a = Constante de la cobertura vegetal, en nuestro caso para el pasto Kikuyo en la fase II y para el pasto Kikuyo reforzado con Geoweb en la fase I.

CAPÍTULO 4.- CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ANÁLISIS Y DE PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS

En este capítulo se describe la fase experimental de la tesis que se desarrollo entre los meses de febrero y noviembre del 2005, que en resumen consta de la fase de mejoramiento de estructuras y existentes, fase de mantenimiento y limpieza, fase de Instalación de coberturas vegetales y geosintéticas y la fase de Pruebas, así como también se mencionan los equipos y materiales utilizados, cabe resaltar que la fase de prueba duró desde el 16 de agosto al 28 de octubre del 2005

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO O ÁREA DE TRABAJO

4.1.1 Ubicación y Descripción del modelo

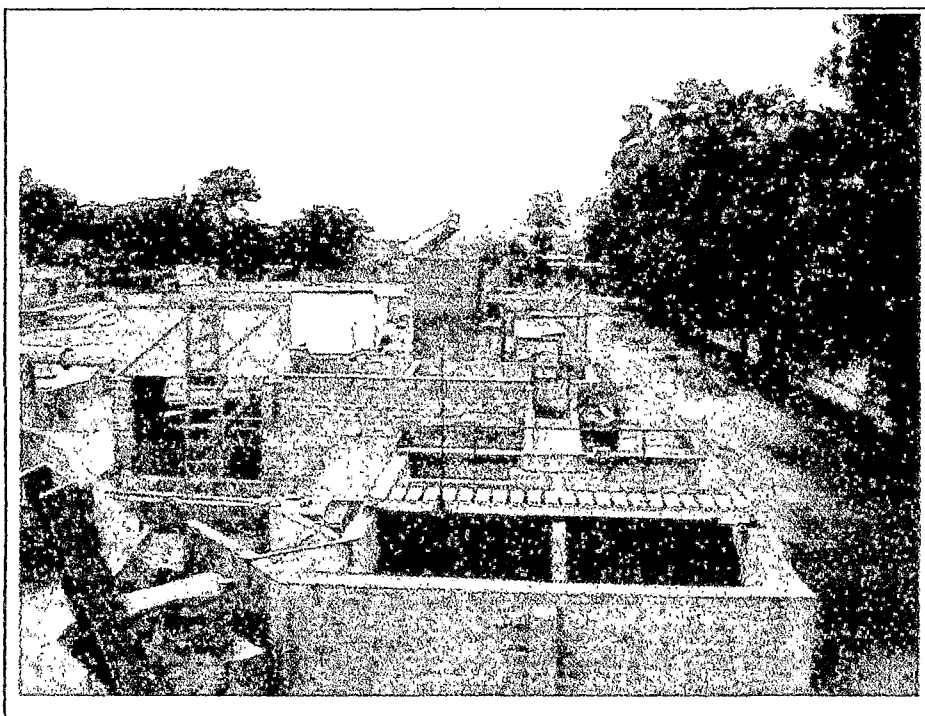
El modelo usado fue el que utilizó el Ingeniero Luis Alberto de la Cruz Fallaque para la elaboración su tesis de investigación; y está ubicado en un área del cielo abierto dentro de la zona de experimentación que posee el Laboratorio nacional de Hidráulica, ocupando un área aproximada de 50m², como se observa en FOTOGRAFIA 4-1.

A continuación realizamos una descripción literal de las partes que corresponden el modelo físico original (Ver anexo B).

- a. Vertedero triangular de caja metálica de 90°, el cual ya estaba construido, por lo que solo se tuvo que realizar trabajos de mantenimiento en este.
- b. Poza disipadora, está ubicada a la salida del vertedero en salto de skí, y construida de material noble, además que en ella se ubican 2 compuertas de fibra de vidrio que sirve para derivar el agua al talud derecho o izquierdo según sea el caso.
- c. Taludes de prueba de 1.94 m de ancho con pendiente aproximada de 1:2 (V:H), para el talud izquierdo y derecho respectivamente. La proyección horizontal y vertical del talud son de 2.6 m y 1.3 m respectivamente. En el perímetro de los taludes existen muros de cabeza pulidos. Los taludes están rellenos de material común excepto en la capa superficial de 50 cm. de profundidad, el cual es suelo de cultivo que se explicará al detalle en el Sub-capítulo 4-2
- d. Poza de sedimentos de 4 m de longitud y sección rectangular de 0.6*0.4 (b * h)
- e. Canal de retorno de 11.6 m de longitud y sección rectangular 0.9*0.55 m , cuyas paredes son de ladrillo de soga tarrajeados con mortero de arena fina.
- f. Cabe señalar que las estructuras anteriormente descritas ya estaban construidas por lo que se tuvo que realizar un mantenimiento y reparación parcial de estas, además se realizó una mejora sustancial

al adicionar un puente corredizo del cual se hace una explicación más detallada en el Capítulo 4-3.

FOTOGRAFIA 4-1 Se observa el área completa del modelo e instalaciones auxiliares, los cuales se ubican en el Laboratorio Nacional de Hidráulica.

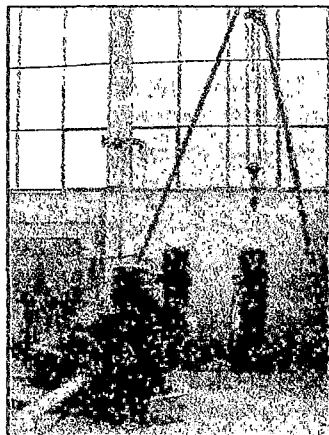


4.1.2 Instalaciones auxiliares

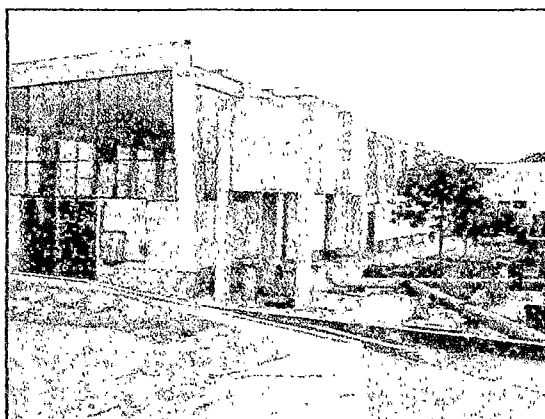
La estructura fue abastecida desde la cisterna del laboratorio Nacional de Hidráulica, por medio de una bomba centrífuga que impulsa hasta 200 l/s con una carga máxima de 6 m (Ver FOTOGRAFIA 4-2), la cual impulsa el agua a un tanque elevado de concreto armado de 27 m³ de capacidad (Ver FOTOGRAFIA 4-3) y cuyo espejo o superficie libre se mantiene constante a 5.80 m sobre el nivel del piso del laboratorio.

La tubería de alimentación de la estructura (modelo) (Ver FOTOGRAFIA 4-4) se inicia en una válvula de compuerta ubicada en una tubería de 356 mm (14") de diámetro nominal, a la salida del reservorio elevado de concreto antes mencionado.

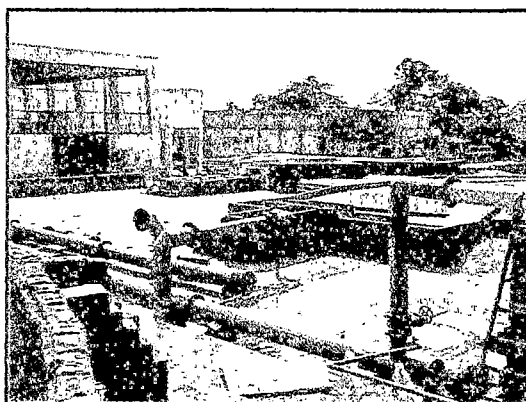
FOTOGRAFIA 4-2 Se observan las bombas que impulsan el agua al tanque elevado y posteriormente al modelo físico.



FOTOGRAFIA 4-3 Se tiene el Tanque elevado desde donde sale el flujo de agua hacia el modelo



FOTOGRAFIA 4-4 Se observa la tubería de alimentación que interconecta el tanque elevado con el modelo físico

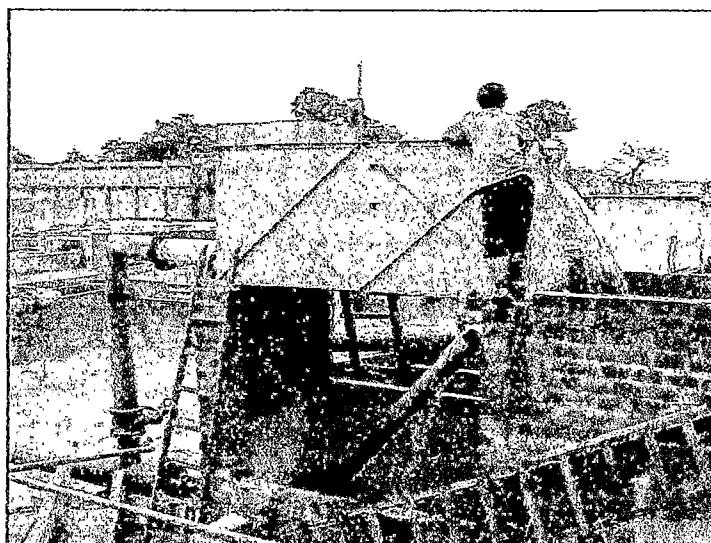


La tubería de alimentación es de acero de 356 mm (14") de diámetro nominal, y de longitud de 30 m; de esta nace la tubería de 200 mm (8"), la cual termina alimentando a un tanque metálico de aforos.

La regulación del caudal que ingresa al tanque metálico se hace mediante una válvula de compuerta de 200 mm (8"), que funciona como válvula general de corte.

En el tanque metálico se ha instalado un vertedero de 90° de bronce para la medición de 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 la precisión, por lo que se tuvo que instalar una tubería de 102 mm (4") de diámetro nominal con una válvula de compuerta para regular de manera mas precisa el control de caudales. (Ver FOTOGRAFIA 4-5).

FOTOGRAFIA 4-5 Tanque metálico el cual es utilizado para regular el caudal requerido para cada prueba, en este se encuentra el limnómetro y las válvulas para regular el caudal así como el vertedero de 90°



4.2 CARACTERIZACIÓN DEL MODELO

4.2.1 Caracterización geométrica y topográfica

Cabe resaltar que las dimensiones de la estructura no obedecen al modelamiento de una determinada cuenca o determinadas condiciones establecidas de alguna locación; como se plantea en el Capítulo I, el objetivo de esta investigación es evaluar coberturas vegetales y técnicas de biotecnología para observar su comportamiento bajo varias condiciones de flujo escorrential, además se optó por estas dimensiones de la estructura (modelo físico), debido a que anteriormente ya se realizó una investigación por el Ing. Luis Alberto de la Cruz la cual tiene semejanza con esta investigación, por lo que se decidió por mantener las dimensiones iniciales para así tener una mayor amplitud de datos de comparación ya sea según por el : Tipo de técnica de bioingeniería (especie de planta a utilizar), tipo de Biotécnica, tiempo y caudal de escorrentía superficial.

Por consiguiente la pendiente aproximada es 1:2 (V : H) fue elegida por ser la que se usó en la anterior investigación, además de acuerdo a lo dicho en el Capítulo 2 se recomienda proteger los suelos con pastos hasta taludes críticos de 1:2, esto por facilidad de establecimiento del pasto o para tener un buen desarrollo de tallo y raíces sin que el pasto sucumba o logre un pobre crecimiento.

4.2.2 Caracterización Geotécnica

La elección del tipo de suelo que se utilizó para conformar la parte superficial del talud de un espesor de 50 cm. estuvo sujeta a los siguientes criterios:

- **Grado de Erosionabilidad que tenga éste.** Por lo visto en el Capítulo 2.1 (Ver TABLA 2-3) se sabe que los suelos arcillo limosos están entre los de mayor erosionabilidad; de lo cual se planteó como primera opción el uso de suelo arcillo limoso por ser el de condición crítica.

- **El tipo de suelo usado en la investigación predecesora a esta tesis, fue una arcilla Limo arenosa según los ensayos de análisis granulométrico y de plasticidad (Ver Capítulo 5.1.5) , lo cual nos da un mayor ámbito de análisis y comparación entre los resultados de esta tesis y los de su predecesora .**
- **La fertilidad del suelo para el establecimiento de la vegetación. Teniendo en cuenta que el suelo usado en la investigación anterior a esta tesis, fue traído de una zona agrícola de Carabaylo, se puede concluir que éste, es atractivo para el establecimiento y buen desarrollo del pasto Kikuyo.**

De los 3 criterios anteriores se vio conveniente el uso del suelo utilizado en la anterior investigación y esto por ser de condición crítica debido a su alta erosionabilidad además de servirnos de punto de comparación entre las especies de pasto Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*) y Tanzania (*Panicum Maximun*), que fue la especie anteriormente usada en la investigación del Ing. Luis Alberto de la Cruz

4.2.3 Caracterización hidrológica

Los caudales simulados fueron elegidos de acuerdo a los resultados obtenidos en la fase de calibración realizada en la investigación hecha por el Ingeniero Luis Alberto de la Cruz, en la cual participó el autor de esta tesis. Además se buscó llevar al máximo la capacidad de la estructura teniendo como caudal máximo límite 70 l/s. De donde se escogieron los caudales de 10 l/s, 20 l/s, 30 l/s, 40 l/s, 55 l/s y 70 l/s para cada una de las pruebas realizadas en cada terraplén.

Los tiempos de escorrentía fueron basados en las pruebas del laboratorio del Reporte N .-116 (1987), realizados por el CIRIA del Reino Unido ,cuyos ensayos efectuados son similares a los hechos en esta investigación, de donde los tiempos de escorrentía elegidos son: 10 minutos, 30 minutos y 60 minutos, para cada uno de los caudales.

Es importante recalcar que se eligió un tiempo de escorrentía $t = 10$ minutos, para poder comparar los resultados de las pruebas, con las pruebas realizadas con el Ingeniero Luis Alberto de la Cruz las cuales fueron hechas en su totalidad con un tiempo de escorrentía de $t = 10$ minutos.

4.2.4 Caracterización Botánica

Por ser motivo de la investigación "El control de la erosión por flujo superficial" se optó por el uso de pasto en vez de arbustos, hierbas u otra vegetación, por ser este de mayor eficacia en el control de erosión de flujos superficiales, además por ser el pasto mucho más versátil y barato que otro tipo de vegetación.

Tipo de pasto

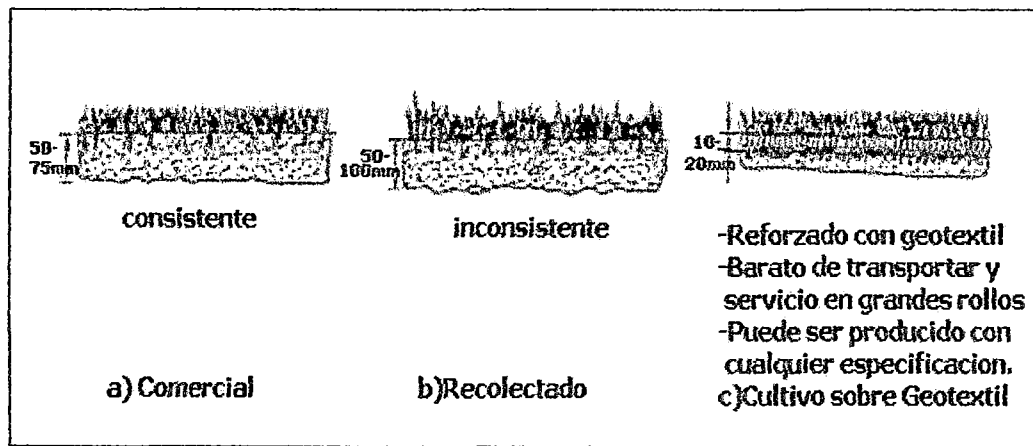
Se eligió la especie de pasto llamado Kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst ex Chiov).(ver Capítulo 2.4) debido a muchas cualidades y características favorables, además que es una especie ampliamente difundida en la sierra de nuestro país, cabe señalar que esta especie crece de 0 a 3.500 m.s.n.m. y no solo en zonas frías, sino también en zonas cálidas – húmedas o subtropicales, tal es el caso que esta especie es usada en zonas tropicales de Venezuela y Colombia ,en donde ya se realizaron algunas pruebas con el pasto Kikuyo (Pérez, U. y López, R. (2000); Revista Forestal de Venezuela. UCO, (1996)), dando buenos resultados en el control de la erosión hídrica.

Debido a su agresivo crecimiento bajo condiciones difíciles tales como pendientes elevadas, terrenos agresivos con alto contenido de sales y bajo condiciones de pisoteo o agresión física, es un pasto con características adecuadas para el control de la erosión. Suárez, J., (2004) (Ver Sub capítulo 2.3.7).

Técnica de establecimiento de pasto

El pasto Kikuyo se puede establecer mediante el sembrado de semillas, estolones, rizomas y por la colocación de esquejes y cespedones. (Ver FIGURA 4-1).

FIGURA 4-1 Tipos de cespedones o tepes que se utilizan como técnica de establecimiento del pasto.



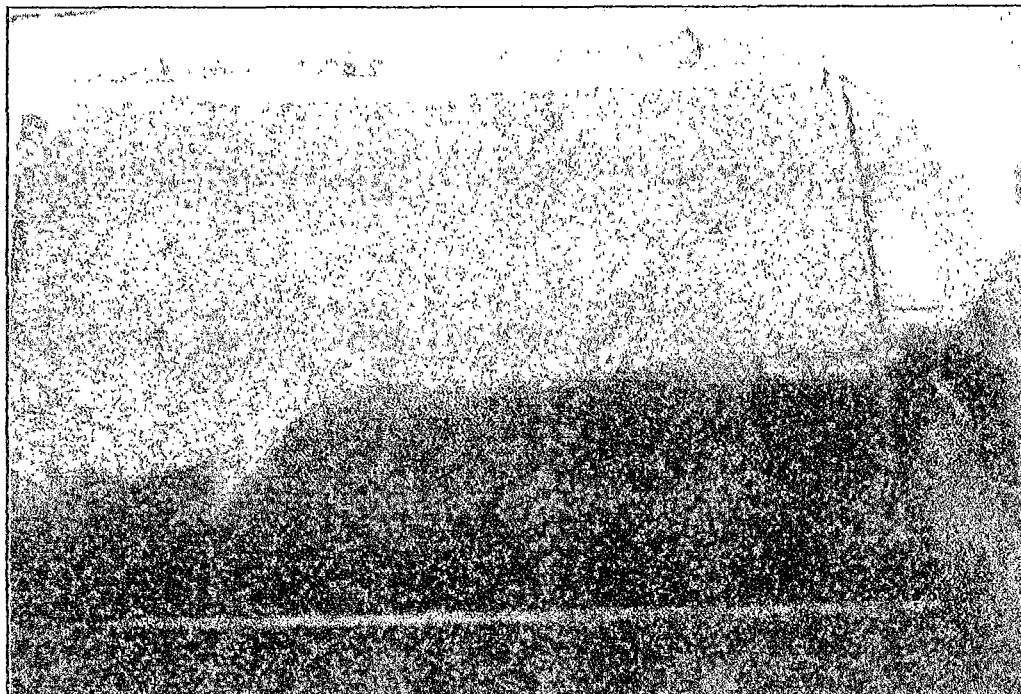
La elección de la técnica de establecimiento estuvo sujeta:

- A la rapidez del desarrollo de una buena cobertura del terreno, siendo la forma mas rápida mediante tepes o cespedones.
- A la técnica de biotecnología a usar.

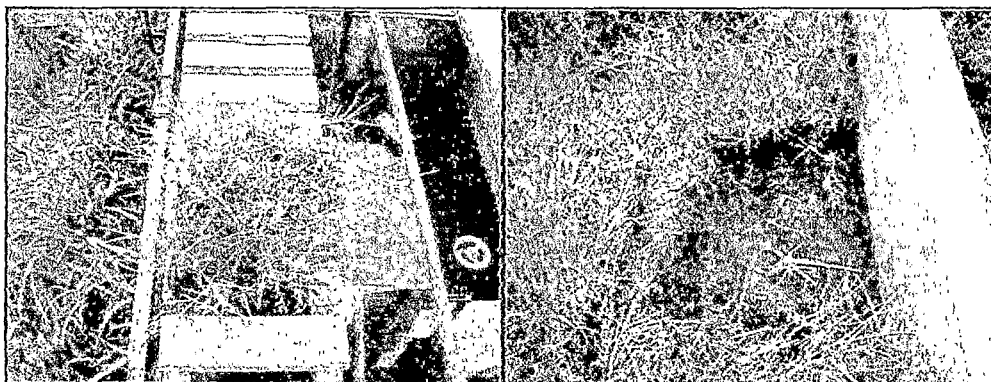
De lo cual se usaron dos técnicas de establecimiento.

- **Para el talud izquierdo (Fase II)**, en el que se usó solo pasto para cubrirlo; se utilizó como técnica de establecimiento cespedones de 0.3 x 0.3 m y 0.3 x 0.6 m de área, los cuales fueron emplazados inicialmente en una superficie horizontal al costado del modelo (ver FOTOGRAFÍA 4.6), para luego una vez que el pasto estuviese establecido, éste sea trasladado al talud (superficie inclinada) (ver FOTOGRAFÍA 4.7).

FOTOGRAFÍA 4-6 Pasto Kikuyo al costado del modelo, la foto fue tomada 4 días después de la siembra



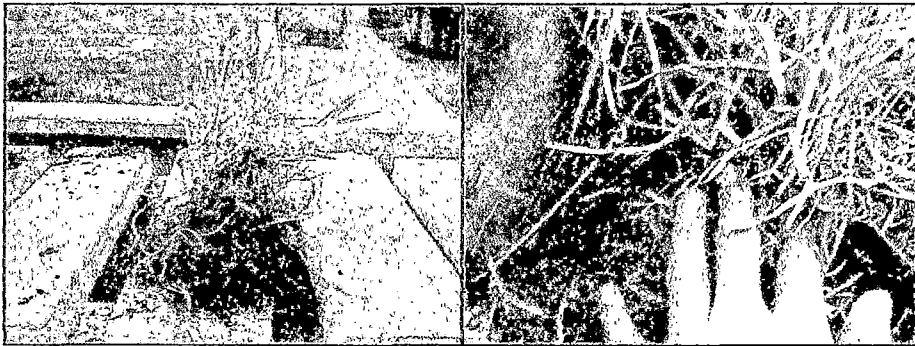
FOTOGRAFÍA 4-7 Traslado del pasto Kikuyo al talud izquierdo, el cual se realizo utilizando cespedones.



- **Para el talud derecho (Fase I)**, en el que se colocó el geosintético Geoweb (ver anexo C) y debido al tamaño de cada geocelda se optó por sembrar el pasto Kikuyo por medio de esquejes (ver FOTOGRAFÍA 4.8), este trabajo se realizó geocelda por geocelda,

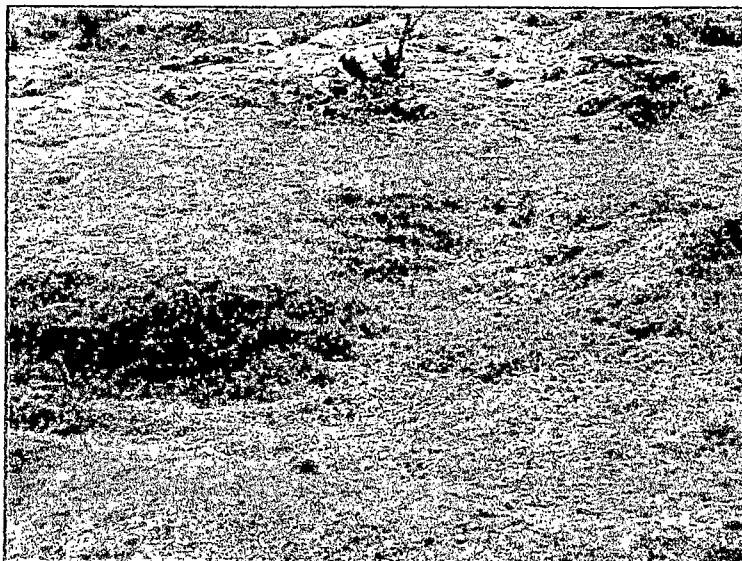
tratando de evitar que se generen vacíos entre las paredes de la geocelda y el pasto kikuyo, pues de allí se originan las posibles fallas.

FOTOGRAFÍA 4-8 Sembrado del pasto Kikuyo en el talud derecho en el cual se utilizo Geoweb para protegerlo, la técnica de sembrado del pasto fue mediante esquejes de pasto Kikuyo.



Es importante señalar que el pasto Kikuyo fue traído desde las afueras de la ciudad de Juliaca en el departamento de Puno (ver FOTOGRAFÍA 4.9), la cual está situada a 3812 m.s.n.m. con temperaturas que varían desde los -2°C hasta los 21°C .

FOTOGRAFÍA 4-9 Se observa el pasto Kikuyo en su ambiente natural (Juliaca-Puno), desde donde fue traído para motivo de esta tesis.



4.3 MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS Y EL DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

4.3.1 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 90° para todos los caudales. 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 que en el limnómetro se colocó el cero respectivo. Los caudales que pasan por el vertedero están regidos por la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{8}{15} * C_d \sqrt{2 * g * \text{Tang}(\beta/2)} * H^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots (4-1)$$

Donde:

Q = Descarga (m³/s)

C_d = Coeficiente de descarga (adimensional) que en nuestro caso es igual a 0.6

H = descarga de agua respecto al vértice del vertedero triangular (m)

g = aceleración debido a la gravedad (m/s²)

β = Ángulo del vertedero triangular, para esta investigación β=90°

De acuerdo a las descargas se determinaron las cargas "h" necesarias, de las tablas de vertederos de NEYRPIC, como se muestra en el cuadro

TABLA 4-1 Caudales utilizados en las pruebas

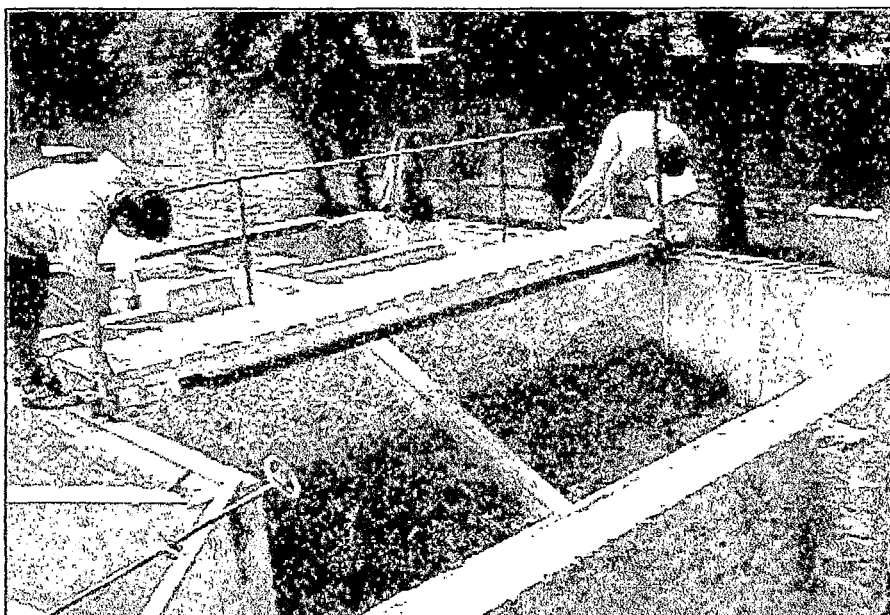
Caudal	Caudal	Ángulo de vertedero	Lectura en el limnómetro
(m ³ /s)	(l/s)	°	mm
0.01	10	90	138.3
0.02	20	90	182.8
0.03	30	90	215.4
0.04	40	90	241.4
0.055	55	90	274
0.07	70	90	302

FUENTE: Neyrpic, (1957).

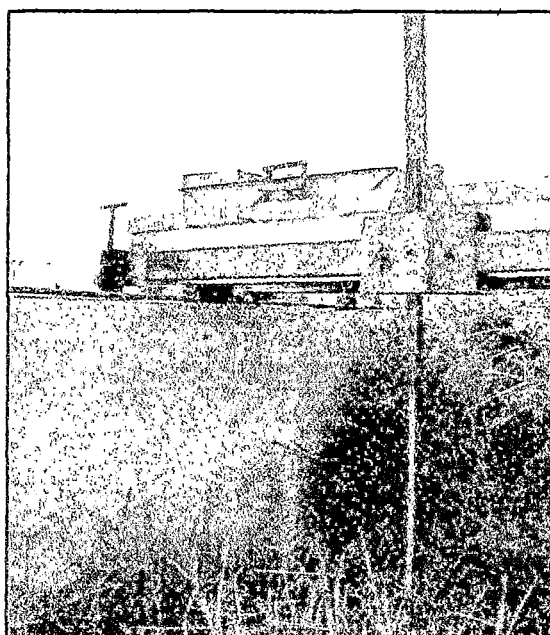
4.3.2 Mediciones de pérdida de suelos y tirantes de flujo

Se utilizó la plataforma-puente móvil usado en el modelo de la central hidroeléctrica de Yuncán, que fue acondicionada con la finalidad de que la plataforma-puente pueda desplazarse sobre unos rieles en sentido longitudinal de los taludes (ver FOTOGRAFÍA 4-10), la plataforma-puente contaba con un dispositivo corredizo (ver FOTOGRAFÍA 4-11), que tenía en este una regla, la cual cumplía la labor de mira topográfica o estatal; el dispositivo corredizo se desplaza en forma transversal a los taludes, de tal modo que quede cubierta toda el área de los taludes.

FOTOGRAFÍA 4-10 Se observa La plataforma-puente que se utilizó para hacer mediciones hidráulicas y topográficas.



FOTOGRAFÍA 4-11 Se Observa el dispositivo corredizo que se deslizaba a lo largo de la plataforma-puente, este dispositivo contaba con una regla graduada para realizar diversas mediciones



Esta plataforma – puente movable fue utilizada para tomar los datos topográficos en los taludes, antes y después de las pruebas, además fue utilizada para medir los tirantes del flujo superficial durante las pruebas, siguiendo el procedimiento que utilizó Hanson, G. H., (1990) en sus investigaciones de pérdida de suelos en canales de suelo. Los puntos de control topográfico se señalaron con letra en las paredes separados cada 0.15 m y tomados en la zona válida para efectuar medidas determinadas en la fase de calibración. Así mismo la plataforma – Puente movable fue señalada por números ubicados cada 0.10 m para las mediciones transversales.

4.3.3 Mediciones de velocidad

Para el cálculo de la velocidad se utilizó un trazador visual, que consistía en 4 bolsitas de 2 gr de permanganato de potasio las cuales eran diluidas en un balde de 4 litros de agua. Para determinar el tiempo en que recorre el trazador desde la parte superior del talud a la inferior, entre dos puntos conocidos de control; se usó una video cámara Sony Digital 8, con la que se hicieron filmaciones desde el momento en que cae el trazador al agua, hasta que llega a la parte inferior del talud, el cual es de concreto y pintado de blanco para mejorar la visualización del paso del trazador encima de éste (Ver ANEXO A).

También se usaron flotadores que eran bolitas de plástico, las cuales fueron usadas con caudales elevados, en los que el pasto estaba doblado, con la finalidad de que no haya rozamiento o fricción entre el pasto y las bolitas, para un cálculo de velocidad más realista.

Las grabaciones eran posteriormente visualizadas en una computadora con la que se registro el tiempo que demoraba el frente de la solución en atravesar todo el talud tomando el tiempo inicial (t_1) y el tiempo final (t_2) para el punto de control inicial y final del talud respectivamente, luego siendo conocida la distancia (L) entre el punto de control inicial y final se calculó la velocidad del flujo : $V = L / (t_2 - t_1)$ (Ver Anexo G).

4.4 PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS Y MATRIZ DE PRUEBAS

4.4.1 Fases de ejecución y toma de datos de pruebas

Las pruebas fueron divididas en 2 fases que corresponden a la variable de técnica de bioingeniería y biotécnica; como se describe a continuación:

Fase I Fase de pruebas con Kikuyo

Se utilizó suelo arcillo limo arenoso (ver ANEXO E), el cual estaba protegido con pasto Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*).

Fase II Fase de pruebas con Kikuyo y Geoweb

Se utilizó un suelo arcillo limo arenoso protegido con pasto Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*) y reforzado con el sistema de confinamiento celular Geoweb de Presto.(Ver ANEXO C).

4.4.2 Matriz de Pruebas

Para el desarrollo de las pruebas de esta investigación se han adoptado como variables el tiempo escorrentía (t) el caudal, (Q) y la técnica de bioingeniería o biotécnica.

La matriz de pruebas se ha dividido en dos fases, cada fase corresponde a un tipo de cobertura, en la cual se alteran los tiempos de escorrentía para cada caudal; así sucesivamente con cada caudal; obteniendo un total de 36 pruebas, como se muestra en los cuadros 4.1 y 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 de 90°.
- Tiempo de escurrimiento t, correspondiente a cada prueba.
- 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).

TABLA 4-2 MATRIZ DE PRUEBAS PARA FASE I

FASE	PRUEBA	Caudal unitario (l/s/m)	Tiempo de escorrentia (minutos)	Cobertura
I	I-1	4.91	10	Geoweb con pasto Kikuyo
	I-2	5.69	30	
	I-3	5.18	60	
	I-4	10.33	10	Geoweb con pasto Kikuyo
	I-5	10.33	30	
	I-6	10.33	60	
	I-7	15.56	10	Geoweb con pasto Kikuyo
	I-8	15.56	30	
	I-9	15.56	60	
	I-10	20.75	10	Geoweb con pasto Kikuyo
	I-11	20.44	30	
	I-12	21.41	60	
	I-13	27.07	10	Geoweb con pasto Kikuyo
	I-14	26.86	30	
	I-15	28.35	60	
	I-16	35.78	10	Geoweb con pasto Kikuyo
	I-17	36.08	30	
	I-18	34.91	60	

TABLA 4-3 MATRIZ DE PRUEBAS PARA FASE II.

FASE	PRUEBA	Caudal unitario (l/s/m)	Tiempo de escorrentía (minutos)	Cobertura
II	II-1	5.96	10	Pasto Kikuyo
	II-2	5.31	30	
	II-3	5.31	60	
	II-4	9.99	10	Pasto Kikuyo
	II-5	10.26	30	
	II-6	10.4	60	
	II-7	15.56	10	Pasto Kikuyo
	II-8	15.39	30	
	II-9	15.56	60	
	II-10	20.75	10	Pasto Kikuyo
	II-11	20.75	30	
	II-12	20.75	60	
	II-13	27.83	10	Pasto Kikuyo
	II-14	27.83	30	
	II-15	27.83	60	
	II-16	36.08	10	Pasto Kikuyo
	II-17	36.08	30	
	II-18	36.08	60	

4.4.3 Descripción General de la Ejecución de las pruebas

No fue necesario realizar pruebas de calibración, pues estas ya fueron realizadas en la anterior investigación, hecha por el Ingeniero Luis Alberto de la Cruz, en la cual el autor de esta tesis participo en la totalidad de los ensayos de campo, de donde se consiguió lo siguiente:

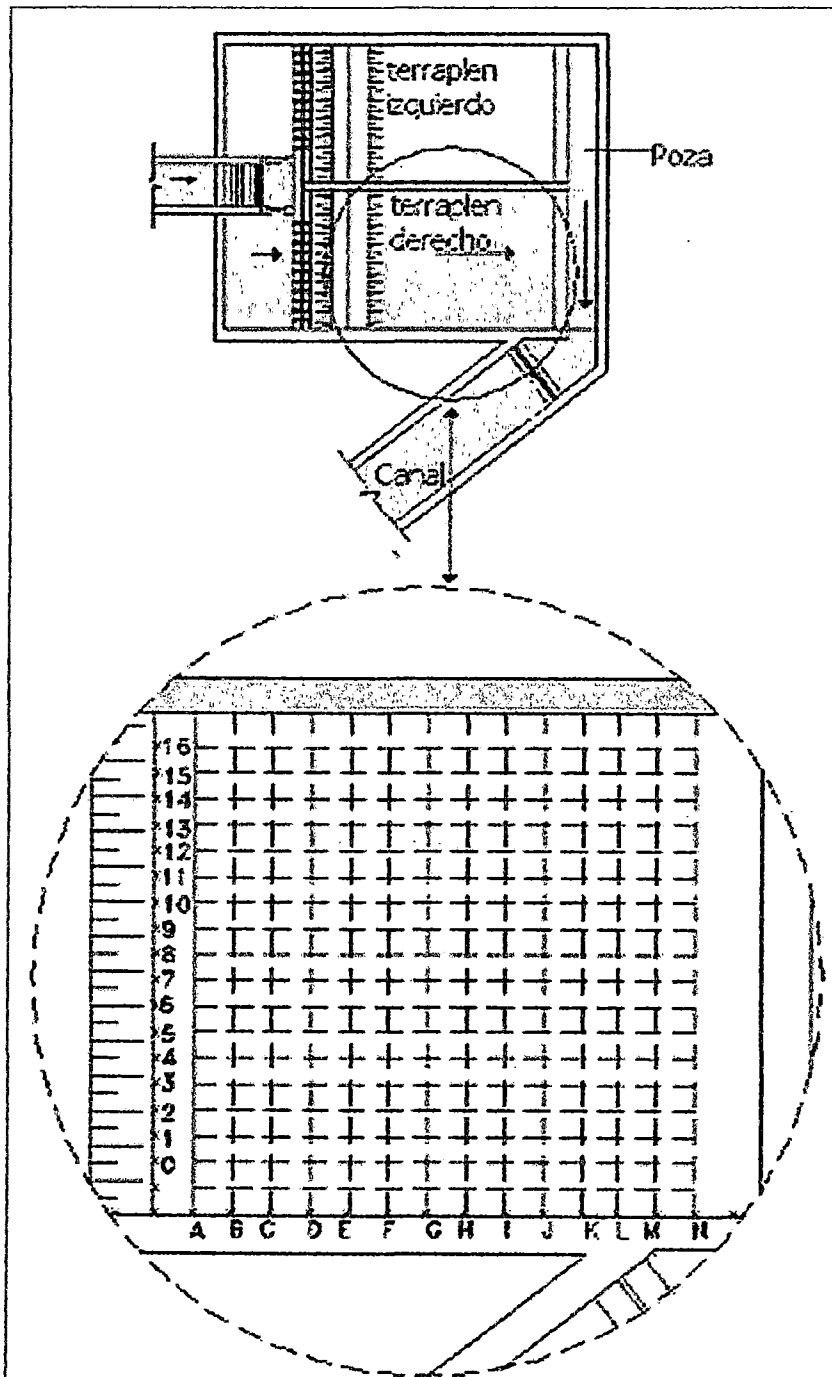
- La forma de trabajo a realizarse durante las pruebas, el número de personas, la función y la forma de trabajo de cada uno. Se decidió que se necesitaban como mínimo 2 personas para ejecutar cada prueba: Una persona se encargo de cerrar o abrir la válvula de entrada al vertedero y la otra realizo las lecturas en el limnómetro para el caudal deseado.
- El área de toma de datos, se eligió un área central del talud, debido a que los bordes y el tramo aguas arriba no son muy representativos dada la existencia de las paredes de concreto que generan interfases de rozamiento (concreto – suelo), produciéndose efectos diferentes a los planteados en la hipótesis. Se obviaron los 10 cm. extremos de cada lado del talud y los primeros 40 cm. desde aguas arriba así como los últimos 40 cm. aguas abajo del talud.

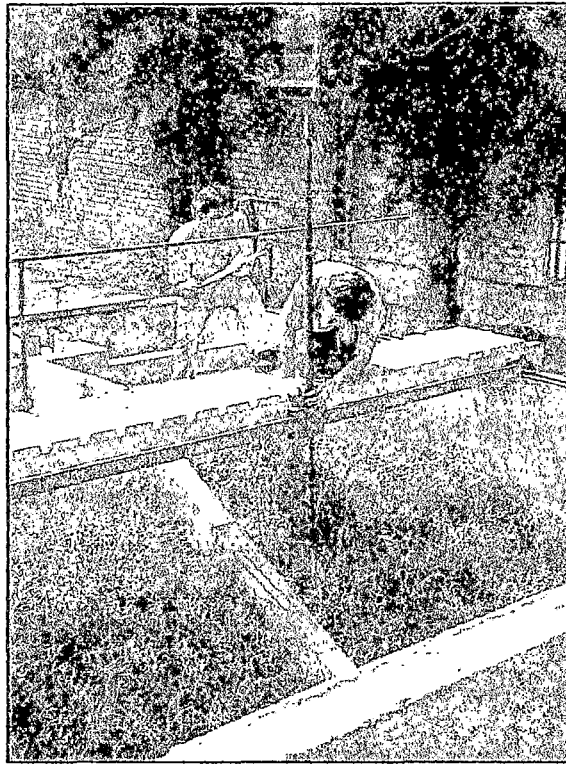
Cabe resaltar que el proceso de ejecución de las pruebas de la Fase I y Fase II son iguales.

A continuación se detalla el procedimiento:

- Antes de cada prueba se determinaba la altura promedio de pasto así como el número de tallos por unidad del área, llegando a la conclusión de que esta densidad del pasto no vario en el periodo en que duraron las pruebas.
- Antes de cada prueba se regó las superficies vegetadas para que estas estén saturadas y listas para ser ensayadas.
- Se realizaban trabajos de topografía en el talud, los cuales se llevaron a cabo con la plataforma – puente móvil teniendo una cuadrícula de 15 x 10 cm. (Ver FIGURA 4-2 y FOTOGRAFÍA 4-12).

FIGURA 4-2 En la cual se observa la cuadrícula sobre la cual se hicieron las mediciones de profundidad de erosión y nivel de la superficie del flujo de agua. En el sentido longitudinal se observan las marcas desde la letras A hasta M, y en el sentido transversal se tienen divisiones desde el numero 0 hasta el 16.



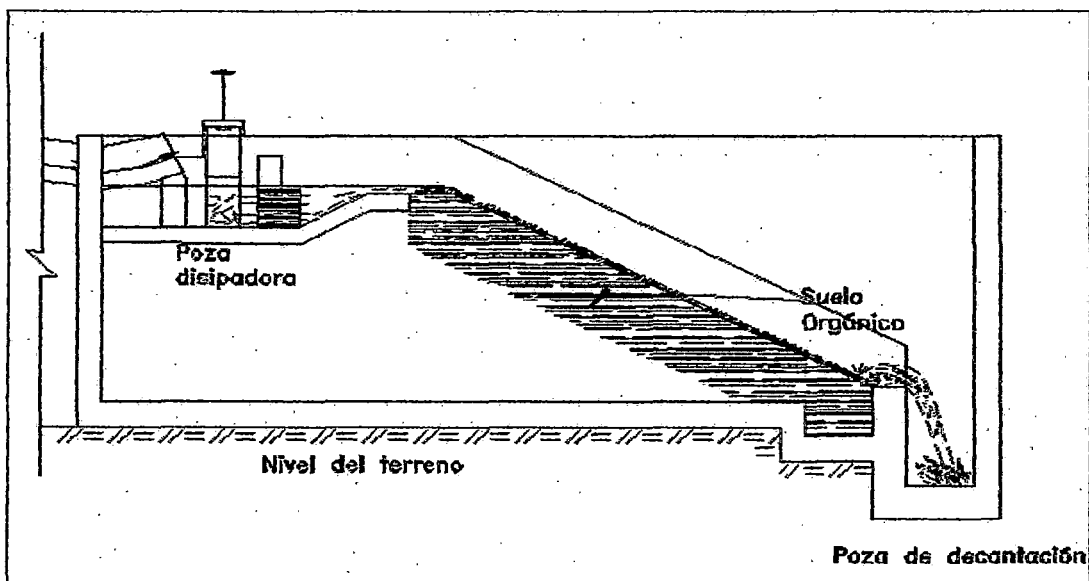
FOTOGRAFÍA 4-12 Medición de la topografía del talud

- Se abría la compuerta correspondiente al talud a ensayar y se cerraba la otra.
- Una vez realizados los pasos anteriores, se daba inicio a la prueba, en la que inicialmente el caudal se controlaba directamente con la válvula de compuerta 200 mm (8"), hasta que se lograra el caudal correspondiente a la prueba en ejecución y se mantenga constante la lectura del limnómetro correspondiente al caudal de la prueba en ejecución, luego se esperaba que se llene la poza hasta que el agua llegue a la poza de decantación momento en el cual se empezaba a controlar el tiempo de duración de la prueba (tiempos de escorrentía) (Ver FIGURA 4-3)
- Durante la prueba se medían los tirantes para algunas de las filas sobre todo en las que se tenía visibilidad, pues en algunos sectores el pasto ocultaba la superficie del flujo de agua haciendo imposible la medición de los tirantes, esto se dio sobre todo en caudales de 10 , 20 , 30 , l/s mas no en caudales de 40, 55 y 70 l en los cuales no se tuvieron inconvenientes de visibilidad ; todas las mediciones de

tirantes se realizaron ya sea al inicio o al final de cada prueba y esto debido a que el lecho del talud variaba en el tiempo; la plataforma móvil fue usada para la medición del tirante siguiendo la misma cuadrícula que se utilizó para hallar la topografía inicial del terreno; claro esta, que se tuvo especial énfasis en observar que la regla roce minúsculamente la superficie del flujo de aguas

- Durante la prueba también se midieron las velocidades, las cuales se realizaron con la video cámara Sony Digital 8 con la cual se filmaba el recorrido de un trazador (solución de permanganato de potasio en agua) (ver capítulo 4.3.3) , desde un punto inicial hasta otro final previamente establecido; cada medición de velocidad se realizó en 3 sectores del talud: Talud central, derecho e izquierdo (Ver ANEXO A), esto para tener una mayor muestra de la variación de las velocidades a lo ancho del talud.
- Al acabar el tiempo correspondiente a cada prueba, se apagaba la bomba y se esperaba que deje de escurrir completamente el agua; para empezar a tomar los datos de la topografía final de la superficie del talud.

FIGURA 4-3 Se observa el instante preciso en el que el agua llega a la poza de decantación, instante en el que se empieza a contabilizar el tiempo de duración de la prueba (De la Cruz, L. A. (2005)).



CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE DATOS

En este Capítulo se muestran las mediciones realizadas en campo, después de realizar un primer procesamiento de datos, para la captación de datos se siguió el procedimiento descrito en el Capítulo 4. En la parte final se muestran los resultados luego de procesarlos según el desarrollo técnico, haciendo un análisis comparativo de las diferentes fases y analizando independientemente cada fase.

5.1 MEDICIONES HIDRÁULICAS, GEOTÉCNICAS, BOTÁNICAS Y DE EROSIÓN DEL SUELO

5.1.1. Generalidades

El presente trabajo de investigación se desarrollo entre los meses de febrero y noviembre del 2005, el cual consta de la siembra e implantación de la vegetación y geosintéticos, así como de la ejecución de todas las pruebas siguiendo el procedimiento del Sub-capítulo 4.3 y con las condiciones dadas en las TABLAS 4-2 y 4-3

5.1.2. Mediciones Hidráulicas

Los caudales fueron medidos con el limnómetro del vertedero y regulados con la válvula de 76.2 mm (3" de diámetro nominal) del vertedero como se detalla en el ítem 4.3.1, el objeto de medir estos caudales es determinar los caudales unitarios. En la TABLA 5-1, se muestran los caudales unitarios, para luego éstos, ser aplicados en la ecuación de Manning.

Los tirantes fueron obtenidos midiendo las cotas del talud y de la superficie del agua (Ver los valores en el Anexo F) en el momento de la ejecución de las pruebas, tal como se detalla es el ítem 4.3.2, para luego de un procesamiento tener los tirantes calculados tal y como se puede observar en las TABLAS 5-2, 5-3, 5-4 y 5-5.

Las velocidades promedio a lo largo de una sección longitudinal del talud de longitud 1.71 m, fueron medidas siguiendo lo descrito en el ítem 4.3.3, teniendo como datos iniciales los tiempos: t_1 para cuando el trazador pasa por el punto P_1 de control inicial aguas arriba del talud y t_2 para cuando el trazador pasa por el punto P_2 de control final, aguas abajo del talud. La distancia entre P_1 y P_2 es 1.71 m. De donde se calcula la velocidad promedio a lo largo del talud (Ver TABLA 5-6) que es el cociente de la distancia P_1P_2 entre (t_2-t_1) . Cabe resaltar que los valores de t_2 y t_1 se pueden observar en el Anexo G.

TABLA 5-1 Lecturas del limnómetro con las que se determino los caudales y caudales unitarios de cada prueba.

Fase	Prueba	Caudal (l/s)	Caudal Unitario (l/s/m)	Ángulo de Vertedero °	Lectura del Limnómetro mm
I	I-1	9.53	4.91	90	136
	I-2	11.03	5.69	90	144
	I-3	10.05	5.18	90	138.5
	I-4	20.043	10.33	90	183
	I-5	20.043	10.33	90	183
	I-6	20.043	10.33	90	183
	I-7	30.195	15.56	90	216
	I-8	30.195	15.56	90	216
	I-9	30.195	15.56	90	216
	I-10	40.254	20.75	90	242
	I-11	39.65	20.44	90	240.5
	I-12	41.53	21.41	90	245
	I-13	52.525	27.07	90	569
	I-14	52.118	26.86	90	268.2
	I-15	54.993	28.35	90	274
	I-16	69.41	35.78	90	301
	I-17	69.99	36.08	90	302
	I-18	67.732	34.91	90	298.2
II	II-1	11.56	5.96	90	146.5
	II-2	10.3	5.31	90	140
	II-3	10.3	5.31	90	140
	II-4	19.377	9.99	90	180.5
	II-5	19.906	10.26	90	182.5
	II-6	20.185	10.4	90	183.5
	II-7	30.195	15.56	90	216
	II-8	29.85	15.39	90	215
	II-9	30.195	15.56	90	216
	II-10	40.25	20.75	90	242
	II-11	40.25	20.75	90	242
	II-12	40.25	20.75	90	242
	II-13	53.994	27.83	90	272
	II-14	53.994	27.83	90	272
	II-15	53.994	27.83	90	272
	II-16	69.99	36.08	90	302
	II-17	69.99	36.08	90	302
	II-18	Prueba que no se llevo a cabo por la falla del talud			

TABLA 5-2 Tirantes obtenidos en campo para la Fase I, en la cual se uso la cobertura de pasto Kikuyo con Geoweb.

Caudal (l/s)	TIRANTES (cm)																	tirante promedio por sección transversal (cm)	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Q = 10	A	3.2	2.7	2.6	2.9	3.1	3.2	3.6	2.7	3.4	3.6	4	4.5	3.5	2.2	2.8	3	3.1	3.2
	B	3.4	2.8	3	3.1	3	3.1	3.4	3	3.3	3.4	3.8	4.2	3.1	2.6	2.6	3.1	3.2	3.2
	H	3.2	2.9	3.2	3	3.2	3.2	3.6	3.2	2.8	3.5	4.2	3.6	3.6	3	2.4	2.5	2.8	3.2
	M	2.8	3.6	4.5	4	3.6	3.4	2.8	3	3.3	3.4	3.5	2.9	3.4	2.8	2.9	3	3.1	3.3
tirante promedio por caudal																			3.2
Q = 20	A	5.2	5.8	6.2	5.1	5.5	3.6	4.4	6.3	5.5	5.4	5.7	6.1	6.6	6.1	5.9	4.6	3.5	5.4
	B	5.4	5.7	5.9	5.6	4.1	4.2	4.6	6	6.1	5.6	5.7	5.4	5.9	6	5.8	5.7	4.9	5.4
	H	6.1	5.5	5.4	4.4	5.1	4.9	5.7	6	5	5.7	5	5.6	5.1	5.2	4.1	5.6	5.9	5.3
	M	5.5	6	5.2	5.5	5.6	5.1	4.8	4.6	5	4.5	5.5	5.8	6.1	5.8	5.1	4.8	4.6	5.3
tirante promedio por caudal																			5.4
Q = 30	A	7.8	7.5	8.5	8.1	4.3	7.7	8.6	5.4	8.2	8.8	6.7	4.9	7.1	5.8	3.3	6.6	6.9	6.8
	B	7.5	6.5	7	7.6	5	7.8	7.5	4.5	7	7.5	7.8	5.8	8	6.5	4.6	5.8	7.8	6.7
	H	6.3	5.1	6	6.8	7.8	6.4	6.5	6.8	7.5	6.5	7.6	6.5	7.4	6.8	6.9	6.8	7.9	6.8
	M	6.9	7.8	7.5	6.4	8	5.8	7.5	6.8	6.8	5.8	7.3	7.1	6.8	7.9	5.7	6.9	6	6.9
tirante promedio por caudal																			6.8

TABLA 5-3 Tirantes obtenidos en campo para la Fase I, en la cual se uso la cobertura de pasto Kikuyo con Geoweb.

Caudal (l/s)	TIRANTES (cm)																		tirante promedio por sección transversal (cm)	
	A	B	F	L																
Q = 40	A	7.2	12	8.7	8.3	7	7.9	8	9.1	10	9.8	7.4	5.5	8.6	9.2	11	8.6	7.3	8.6	
	B	8.2	8.9	6.9	9.2	8.6	8.9	9	8.6	7.8	7.9	9.8	8.6	8.8	9	8.4	7.8	9.4	8.6	
	F	8	9.8	10	6.7	7.6	8.7	9.7	12	7.8	7	7.1	8.5	8.6	8.8	9.5	9.7	8.7	8.7	
	L	11	7.2	7.1	7.9	9.5	6.9	6.6	10	8.8	8.4	7.2	10	9.9	8.8	9.5	7.7	5.4	8.4	
																			tirante promedio por caudal	8.6
Q = 55	A	5.9	9.2	7.2	7.4	7.2	8.6	9	7.7	9.6	15	6.8	7.4	8.7	9.3	7.9	10	9.5	8.6	
	B	8.7	11	11	10	7.3	8.7	9.1	14	7.2	12	7.6	6.4	8.2	8.6	7.6	7.1	7.6	8.9	
	C	8.5	9.6	10	10	8.2	9.5	8.4	10	8.3	10	6.5	5.9	8.9	8.5	8.9	8.4	8.8	8.8	
	H	10	9.6	9.3	6.6	6	9.6	8.4	6.5	7.8	9	9.2	11	7.8	8.3	9.3	9	7.9	8.6	
	M	14	15	7.4	8.6	7.4	10	12	6.1	10	5.8	11	9.6	5.4	9.8	9.3	7.2	6.1	9.1	
																			tirante promedio por caudal	8.8
Q = 70	A	7.1	11	8.2	7.3	8.9	9.5	10	7.9	8.2	12	9	8.3	11	9.8	6.7	8.8	5.7	8.7	
	B	9.2	11	12	7.9	8.6	11	8.9	13	6.8	11	8.3	11	9.3	8.3	9.3	6.5	6.6	9.3	
	C	13	7.6	11	17	10	12	12	11	7.4	9.1	8.4	8.4	8.7	8.2	11	7	7.9	9.9	
	H	11	9.6	10	8.6	7.8	12	11	8.2	8	7.3	8.1	11	6.3	6.3	10	9.1	8.4	9	
	M	13	15	10	10	11	9.3	15	8.1	10	6.4	14	13	7.4	11	10	7.4	7.9	10.5	
																			tirante promedio por caudal	9.5

TABLA 5-4 Tirantes obtenidos en campo para la Fase II, que es la fase con cobertura de pasto Kikuyo.

Caudal	TIRANTES																	tirante promedio por sección transversal (cm)	
	l/s	(cm)																	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Q=10	A	2.6	4.2	2.6	4.1	3.9	2.4	1.8	3.4	3.6	4.7	2.6	4.4	2.6	3.5	2.2	2.7	2.5	3.2
	B	2.8	2.5	3	3.8	3.6	3.3	2.5	3.6	3.8	4	2.8	3.8	3	2.6	2.4	2.8	3	3.1
	H	3	2.9	3.6	3	3.4	2.8	3.6	3.1	4	3.8	3.2	3.6	2.8	2.6	3.8	2.9	2.6	3.2
	M	3.8	3.9	3.5	3.6	2.8	3	3.3	3.6	2.8	3.1	2.4	3.3	2.9	3.1	3.1	3	3.1	3.2
		tirante promedio por caudal																	3.2
Q=20	A	4.9	6.1	7.7	5.2	5.8	3.2	3	5.5	5.4	5.1	5	8.6	6.5	4.7	3.9	3.3	4.7	5.2
	B	5.2	6.5	8.6	4.6	6.1	3.9	4.4	7.3	5.5	5.9	5.8	6.5	5.8	5.8	6.8	2.2	4	5.6
	H	4.8	5.8	7.1	5.8	6.1	4.2	3.4	5.5	5.4	5.1	4	6.8	5.7	6	6.2	5.8	4.8	5.4
	M	5	5.8	4.8	6.5	7	5.4	5.8	5.1	5.4	4.6	5.6	4.2	4.8	5.1	5.4	6	5.5	5.4
		tirante promedio por caudal																	5.4
Q=30	A	6.5	8.1	8.5	7.2	6.9	5	4.1	5.7	4.7	6.1	9.6	9.9	6.8	6.5	4.5	3.7	5.9	6.6
	B	7.5	8.5	9.3	5.8	8.4	5.4	5	8.4	6.4	9.1	8.4	9.1	8.8	7.4	7.3	3.5	4.7	7.2
	H	6.8	8.2	8.5	8.6	4.9	7.8	6.8	7.8	7.9	7.5	6.4	8.6	7.1	6.6	6.8	6	4.8	7.1
	M	6.8	6.6	5.6	6.8	7.5	8.8	7.6	6.5	5.8	7.8	6.4	5.5	5.1	7.5	6.3	6.1	5	6.6
		tirante promedio por caudal																	6.8

TABLA 5-5 Tirantes obtenidos en campo para la Fase II, que es la fase con cobertura de pasto Kikuyo.

Caudal	TIRANTES																	tirante promedio por sección transversal (cm)	
	(l/s)	(cm)																	
Q=40	A	8.3	10	8.5	7.9	10	6.5	8.8	6.7	7.1	8.1	9.1	11	8.1	8.4	8.7	7.9	13	8.6
	B	8.6	8.8	9.9	8.4	9.8	11	7.1	11	8.6	9.4	10	11	9	8	9.7	6.3	9.5	9.1
	C	6.7	6.3	7.9	8.8	9.6	6.5	6.3	11	8.9	11	12	9.7	11	10	11	8.3	8.3	9
	L	6.6	7.5	8	8.6	9	7.5	8.6	9.6	8.5	8.1	10	9.6	8.7	9.2	10	8.4	8.9	8.6
tirante promedio total por caudal																			8.8
Q=55	A	12	11	9.6	8.9	9.5	7.9	7.2	8.5	9.1	8.9	8.4	11	8.4	9.9	8.1	7.6	9.2	9.1
	B	8.7	9.3	9.8	9.3	9.8	9.3	9.8	10	10	9.9	9.7	11	9.1	8.9	11	7.6	8.1	9.5
	C	8.8	8.2	8.7	8.8	8.7	11	9	9.5	9.8	10	9.3	9	9.7	11	11	6.8	9.6	9.4
	H	11	9	8.8	11	9.7	9.3	7.9	6.5	9	10	8.4	9.3	9.9	9.1	8.6	10	10	9.3
M	7.7	9.4	7	8.6	8.7	9.1	8.7	12	10	7.2	9.1	13	7.7	7	7.6	9	9.9	8.9	
tirante promedio total por caudal																			9.2
Q=70	A	11	10	9.6	9.6	8.7	9	8.4	10	9.6	11	10	12	9.6	11	8.3	8	12	9.8
	B	9.5	10	11	9.6	9.9	11	10	9.6	9.8	11	11	9.8	9.2	9.1	11	9.8	11	10.1
	C	8	8.2	9	9.1	11	11	9.8	10	10	11	8.4	9.6	11	12	11	10	8.6	9.95
	H	10	9.5	9.8	11	9.6	12	9.6	9.5	9.8	10	9.5	10	10	9.4	9.8	10	9.5	9.96
M	9.8	11	11	8.9	9.8	9.1	11	11	11	11	8.9	8.6	11	10	9.9	10	9.8	10.1	
tirante promedio total por caudal																			9.994

TABLA 5-6 Velocidades del flujo escorrential superficial en tres sectores del talud: Sector central, izquierdo y derecho.

Técnica de Bioingeniería	Caudales (l/s)	TECNICA DE MEDICION	VELOCIDADES (m / s)		
			derecha del talud	centro del talud	izquierda del talud
COBERTURA DE GEOWEB	10	con permanganato	0.37	0.39	0.4
	20	con permanganato	0.47	0.52	0.66
	30	con permanganato	0.53	0.67	1.04
	40	con permanganato	0.78	1.31	1.97
	55	con permanganato	1.61	2.06	2.44
	70	con permanganato	2.37	2.69	3.35
	70	con pelotitas			3.54
COBERTURA DE PASTO	10	con permanganato	0.53	0.4	0.38
	20	con permanganato	0.75	0.66	0.46
	30	con permanganato	0.94	0.74	0.69
	40	con permanganato	1.36	1.3	1.22
	55	con permanganato	2.52	2.25	2.71
	70	con permanganato	2.75	2.69	3
	70	con pelotitas	1.7	2.53	2.84

Nota: la solución utilizada como trazador visual para el cálculo de la velocidad fue permanganato de potasio diluido en agua

5.1.3. Mediciones topográficas o erosión del suelo

Se siguió lo considerado en los ítems 4.3.2 y 4.4.3 en donde se hicieron levantamientos topográficos antes y después de cada prueba, estos valores pueden ser observados en el Anexo H.

El objeto de determinar esta erosión fue para comparar las diversas técnicas de bioingeniería utilizadas y para ser comparadas con los resultados de las ecuaciones desarrolladas en el ítem 3.3.1.

Para determinar la profundidad de erosión representativa de cada área efectiva por prueba, fue necesario determinar las cotas en cada punto, antes y luego de cada prueba (Ver Anexo H) y de estos valores se estableció un promedio obteniéndose los resultados que se muestran en la TABLA 5-7.

TABLA 5-7 Erosión promedio por prueba y erosión acumulada a través del tiempo para un mismo caudal

Caudal (m/s)	Tiempo de Escorrentía (minutos)	Geoweb Erosión por prueba (cm)	Geoweb Erosión acumulada (cm)	Pasto Erosión por prueba (cm)	Pasto Erosión acumulada (cm)
10	10	0.35	0.35	0.24	0.24
	30	0.38	0.73	0.26	0.5
	60	0.42	1.15	0.59	1.09
20	10	0.33	0.33	0.23	0.23
	30	0.25	0.58	0.18	0.41
	60	0.17	0.75	0.12	0.53
30	10	0.22	0.22	0.12	0.12
	30	0.33	0.55	0.16	0.28
	60	0.22	0.77	0.09	0.37
40	10	0.17	0.17	0.07	0.07
	30	0.19	0.36	0.13	0.2
	60	0.33	0.69	0.17	0.37
55	10	0.18	0.18	0.24	0.24
	30	0.21	0.39	0.21	0.45
	60	0.39	0.78	0.31	0.76
70	10	0.17	0.17	0.17	0.17
	30	0.14	0.31	0.24	0.41
	60	0.16	0.47	El Talud falló	

5.1.4 Mediciones botánicas

Específicamente son mediciones geométricas del pasto a través del tiempo, estas mediciones se realizaron para determinar el coeficiente de Manning en superficies vegetadas y para observar el comportamiento del pasto bajo ciertas condiciones de flujo hidráulico y de establecimiento ya sea por tipo de técnica de sembrado o por el tipo de suelo

Para este se tomaron medidas de la altura del pacto "h" y densidad de tallos por unidad de área "M" en el mismo tiempo en que se realizaron las pruebas hidráulicas, como se muestra en la TABLA 5-8. Además se tomaron medidas de la tasa de crecimiento promedio de los tallos bajo 2 situaciones: La primera se sembró solo pasto Kikuyo en un talud, en la segunda se sembró el pasto Kikuyo en un talud con Geoweb, todo esto para ver como variaba la taza de crecimiento entre las 2 condiciones, obteniéndose la TABLA 5-9, la cual muestra el crecimiento de los tallos a través del tiempo en 6 sectores diferentes (I, II, II, IV, V y VI), los cuales son producto de la subdivisión de cada talud en 6 cuadrados de similares medidas.

Otras mediciones que se realizaron fueron las de crecimiento de raíces del pasto Kikuyo, el cual fue emplazado en botellas de plástico de 5, 11, 18 y 20 cm de altura (Ver FOTOGRAFÍA 5-1), en donde se controló el tiempo en el cual las raíces alcanzaban el fondo de las botellas (Ver FOTOGRAFÍA 5-2), teniéndose así la tasa de crecimiento de la raíz de Kikuyo que se muestra en la TABLA 5-10.

FOTOGRAFÍA 5-1 Se observan algunas de las botellas que sirvieron para determinar la tasa de crecimiento de la raíz del pasto Kikuyo.



FOTOGRAFÍA 5-2 Se observa como se desarrollaron las raíces en el fondo de las botellas.



TABLA 5-8 Datos del pasto al momento de realizarse las pruebas tales como densidad de tallos por unidad de área y la altura promedio del pasto Kikuyo

Fase	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
	I-1	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	16/08/2005	96	896	0.2
	I-2	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	17/08/2005	97	896	0.2
	I-3	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	18/08/2005	98	896	0.2
	I-4	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	22/08/2005	102	896	0.2
	I-5	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	24/08/2005	104	896	0.21
	I-6	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	24/08/2005	104	896	0.21
	I-7	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	26/08/2005	106	896	0.21
	I-8	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	01/09/2005	112	896	0.21
I	I-9	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	08/09/2005	119	896	0.22
	I-10	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	12/09/2005	123	896	0.22
	I-11	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	12/09/2005	123	896	0.22
	I-12	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	14/09/2005	125	896	0.225
	I-13	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	15/09/2005	126	896	0.23
	I-14	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	15/09/2005	126	896	0.23
	I-15	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	21/09/2005	132	896	0.24
	I-16	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	24/09/2005	135	896	0.25
	I-17	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	27/09/2005	138	896	0.25
	I-18	Kikuyo con Geoweb	12/05/2005	27/09/2005	138	896	0.25
	II-1	Pasto Kikuyo	05/04/2004	29/09/2005	178	878	0.19
	II-2	Pasto Kikuyo	05/04/2004	29/09/2005	178	878	0.19
	II-3	Pasto Kikuyo	05/04/2004	03/10/2005	182	878	0.19
	II-4	Pasto Kikuyo	05/04/2004	03/10/2005	182	878	0.19
	II-5	Pasto Kikuyo	05/04/2004	03/10/2005	182	878	0.19
	II-6	Pasto Kikuyo	05/04/2004	06/10/2005	185	878	0.19
	II-7	Pasto Kikuyo	05/04/2004	12/10/2005	191	878	0.2
	II-8	Pasto Kikuyo	05/04/2004	12/10/2005	191	878	0.2
II	II-9	Pasto Kikuyo	05/04/2004	12/10/2005	191	878	0.2
	II-10	Pasto Kikuyo	05/04/2004	14/10/2005	193	878	0.2
	II-11	Pasto Kikuyo	05/04/2004	14/10/2005	193	878	0.2
	II-12	Pasto Kikuyo	05/04/2004	17/10/2005	196	878	0.21
	II-13	Pasto Kikuyo	05/04/2004	17/10/2005	196	878	0.21
	II-14	Pasto Kikuyo	05/04/2004	18/10/2005	197	878	0.21
	II-15	Pasto Kikuyo	05/04/2004	18/10/2005	197	878	0.21
	II-16	Pasto Kikuyo	05/04/2004	18/10/2005	197	878	0.21
	II-17	Pasto Kikuyo	05/04/2004	18/10/2005	197	878	0.21
	II-18	Prueba que no se llevo a cabo por la falla del talud					

El tamaño del pasto que se muestra en el cuadro 5-6 fue medido después de varios cortes al pasto por lo cual la altura que se tiene del pasto no corresponde a la edad de este.

TABLA 5-9 Crecimiento del pasto o altura de este a través del tiempo para 6 diferentes sectores de los taludes.

Técnica de	Fecha de medición	Nro. De Días	Altura del Pasto (cm)						Promedio
			I	II	III	IV	V	VI	
Bioingeniería									
Pasto	05/04/2005	0	1	0.5	1	1	1.5	1.2	1.03
Pasto	07/04/2005	2	1	0.7	1.2	1.3	1.5	1.5	1.2
Pasto	09/04/2005	4	5.4	3	3.1	2.8	3	4.2	3.58
Pasto	12/04/2005	7	9.4	6	7.2	11.5	6.3	7	7.9
Pasto	18/04/2005	13	16	12	14	16	13	13	14
Pasto	21/04/2005	16	25	21	24	26	23	20	23.17
Geoweb con Pasto	12/05/2005	0	1.1	1	1.1	1	1.2	1.5	1.15
Geoweb con Pasto	14/05/2005	2	1.2	1.5	1.3	1.3	1.4	1.8	1.42
Geoweb con Pasto	16/05/2005	4	5	5.2	4.2	6.2	6	5.1	5.28
Geoweb con Pasto	19/05/2005	7	14	10	11	16	17	15	13.83
Geoweb con Pasto	26/05/2005	13	26	25	27	30	33	32	28.83

Una vez alcanzadas las alturas indicadas, se realizó el primer corte de los muchos que se hicieron para lograr una mayor densidad del pasto.

TABLA 5-10 Tasa de crecimiento de la raíz del pasto Kikuyo.

Fecha de Medición	Nro. De Días	PROFUNDIDAD DE LA RAIZ (cm)			
		botellas de altura de 5 cm	botellas de altura de 11 cm	botellas de altura de 18 cm	botellas de altura de 20 cm
11/07/2005	0	0	0	0	0
14/07/2005	3	5	5.4	5	6
17/07/2005	6	—	11	10	12
18/07/2005	7	—	—	12	13
20/07/2005	9	—	—	18	20

5.1.5. Mediciones geotécnicas

Esta investigación tuvo por objetivo evaluar los beneficios de la bioingeniería como herramienta en control de erosión, por lo cual se tuvo que hallar la granulometría y plasticidad para así determinar el grado de erodibilidad del suelo utilizado.

En el Anexo E 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. De donde se resumen las propiedades físicas del suelo que se muestran en la TABLA 5-11.

Además se optó por el número de Manning calculado por el Ing. Luis Alberto de la Cruz siguiendo el método de servicio de conservación de suelo, siendo el "n" del suelo igual a 0.055.

TABLA 5-11 Propiedades físicas del suelo

Propiedades físicas	Valores
	%
% Arena > 0.05 mm	37.3
% Limo > 0.002 mm	51
% Arcilla < 0.002 mm	11.7
Limite líquido (LL)	21.5
Limite plástico (PL)	16.5
Índice plástico (PI)	5
Tipo de suelo según A.S.C.	Limo arenoso
Tipo de suelo según U.S.C.	Arcilla limo arenosa de baja plasticidad (CL-ML)

5.2 SÍNTESIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.

A continuación se muestran los resultados de las pruebas procesados y resumidos para su posterior análisis y discusión en el ítem 5.3.

TABLA 5-12 Tirantes y velocidades para el canal revestido con Geoweb y pasto Kikuyo correspondiente a la Fase I.

CAUDAL	CAUDAL UNITARIO	TIRANTES	VELOCIDADES	Numero de Froude	Tipo de Flujo
l/s	m ³ /s/m	m	m/s		
10.2	0.00526	0.032	0.39	0.8	Subcrítico
20.04	0.01033	0.054	0.55	0.8	Subcrítico
30.2	0.01557	0.068	0.75	1	Crítico
40.48	0.2087	0.086	1.35	1.6	Supercrítico
53.21	0.02743	0.088	2.04	2.4	Supercrítico
69.04	0.03559	0.095	2.8	3.1	Supercrítico

TABLA 5-13 Tirantes y velocidades para el canal revestido con pasto Kikuyo correspondiente a la Fase II.

CAUDAL	CAUDAL UNITARIO	TIRANTES	VELOCIDADES	Numero de Froude	Tipo de Flujo
l/s	m ³ /s/m	m	m/s		
10.72	0.005526	0.032	0.44	0.9	Subcrítico
19.82	0.010216	0.054	0.62	0.9	Subcrítico
30.08	0.015505	0.068	0.79	1.1	Supercrítico
40.25	0.020747	0.088	1.29	1.6	Supercrítico
53.994	0.027832	0.092	2.49	2.4	Supercrítico
69.99	0.036077	0.0999	2.81	3.1	Supercrítico

TABLA 5-14 Erosión promedio por prueba y erosión acumulada (Profundidad de erosión desde la primera prueba) para cada Fase.

Tiempo de Escorrentía (minutos)	FASE I (Geoweb con pasto Kikuyo)			FASE II (Pasto Kikuyo)		
	Caudal (l/s)	Erosión por prueba (m)	Erosión acumulada (m)	Caudal (l/s)	Erosión por prueba (m)	Erosión acumulada (m)
0	0	0	0	0	0	0
10	10.2	0.0035	0.0035	10.72	0.0024	0.0024
40	10.2	0.0038	0.0073	10.72	0.0026	0.005
100	10.2	0.0042	0.0115	10.72	0.0059	0.0109
110	20.04	0.0033	0.0148	19.82	0.0023	0.0132
140	20.04	0.0025	0.0173	19.82	0.0018	0.015
200	20.04	0.0017	0.019	19.82	0.0012	0.0162
210	30.2	0.0022	0.0212	30.08	0.0012	0.0174
240	30.2	0.0033	0.0245	30.08	0.0016	0.019
300	30.2	0.0022	0.0267	30.08	0.0009	0.0199
310	40.48	0.0017	0.0284	40.25	0.0007	0.0206
340	40.48	0.0019	0.0303	40.25	0.0013	0.0219
400	40.48	0.0033	0.0336	40.25	0.0017	0.0236
410	53.21	0.0018	0.0354	53.994	0.0024	0.026
440	53.21	0.0021	0.0375	53.994	0.0021	0.0281
500	53.21	0.0039	0.0414	53.994	0.0031	0.0312
510	69.04	0.0017	0.0431	69.99	0.0017	0.0329
540	69.04	0.0014	0.0445	69.99	0.0024	0.0353
600	69.04	0.0016	0.0461	69.99	El talud falló	El talud falló

TABLA 5-15 Crecimiento promedio del pasto Kikuyo o altura promedio de este a través del Tiempo.

Nro. de días de crecimiento	Altura Promedio de cobertura de pasto (cm)	Altura Promedio de cobertura de pasto con Geoweb (cm)
0	1.03	1.15
2	1.2	1.42
4	3.58	5.28
7	7.9	13.83
13	14	28.83
16	23.17	—

TABLA 5-16 Tasa de crecimiento en profundidad de la raíz del pasto Kikuyo.

Fecha de Medición	Nro. De Días	Tasa de crecimiento en profundidad de la raíz (cm/día)			
		botella de altura de 5 cm	botella de altura de 11 cm	botella de altura de 18 cm	botella de altura de 20 cm
11/07/2005	0	0	0	0	0
14/07/2005	3	1.7	1.8	1.7	2
17/07/2005	6	—	1.9	1.7	2
18/07/2005	7	—	—	2	1
20/07/2005	9	—	—	3	3.5

A continuación se tiene el CUADRO 5-17, en el cual se muestran el número de Manning de laboratorio (n_l), hallado con la ecuación de Manning y el número de Manning (n), hallado con las fórmulas de Temple dadas en el ítem 3.3.1, la forma en que se calculó cada número de Manning se muestra en el Anexo F.

TABLA 5-17 Número de Manning (n_l) para las coberturas de la Fase I y II, calculado en laboratorio y número de Manning teórico (n).

Tiempo (t) minutos	Fase I		Fase II	
	Número de Manning de Laboratorio (n_l)	Número de Manning (n)	Número de Manning de Laboratorio (n_l)	Número de Manning (n)
0	0.182	0.21	0.16	0.206
10	0.182	0.21	0.16	0.206
40	0.182	0.21	0.16	0.206
100	0.182	0.21	0.16	0.206
110	0.18	0.21	0.159	0.199
140	0.18	0.213	0.159	0.199
200	0.18	0.213	0.159	0.199
210	0.153	0.164	0.144	0.157
240	0.153	0.164	0.144	0.157
300	0.153	0.17	0.144	0.157
310	0.098	0.141	0.104	0.131
340	0.098	0.141	0.104	0.131
400	0.098	0.143	0.104	0.136
410	0.066	0.123	0.055	0.113
440	0.066	0.123	0.055	0.113
500	0.066	0.126	0.055	0.113
510	0.05	0.111	0.051	0.098
540	0.05	0.111	0.051	0.098
600	0.05	0.111		

En los CUADROS 5-18 y 5-19, se tienen los esfuerzos cortantes Totales y Efectivos para cada fase, hallados con las ecuaciones de Temple (1987) dadas en el ítem 3.3.1, los parámetros tales como C_{ft} y n_f se calcularon siguiendo las ecuaciones de Temple dadas en ítem 3.3.1, la constante n' es igual a 0.0156 de acuerdo a las investigaciones hechas por Temple(1980) y Hanson(1990); la manera como se calcularon los parámetros C_{ft} y n_f se muestran esquematizados en cuadros del Anexo F.

Cabe resaltar que los esfuerzos cortantes Totales y Efectivos hallados, son esfuerzos cortantes promedios de cada talud correspondiente a cada prueba, las cuales fueron 18 para la fase I y 17 para la fase II

TABLA 5-18 Esfuerzo cortante total y efectivo para cada prueba de la Fase I, calculado con las ecuaciones de Temple(1987).

Tiempo acumulado de Prueba Minutos	Número de Manning del Suelo (n')	Número de Manning del Pasto (n)	Esfuerzo Total (τ total) Pa	Factor de cobertura Vegetal para el área de Falla (CFt)	Coefficiente de Manning para el área de Falla (nf)	Esfuerzo Efectivo (τ_{ef}) Pa
0	0.0156	0.21	162.148	0.9	0.21	0
10	0.0156	0.21	162.148	0.8998	0.2099	0.09
40	0.0156	0.21	162.148	0.8984	0.2096	0.091
100	0.0156	0.21	162.148	0.8937	0.2086	0.096
110	0.0156	0.21	273.624	0.8865	0.2071	0.176
140	0.0156	0.213	273.624	0.8784	0.2082	0.187
200	0.0156	0.213	273.624	0.8714	0.2067	0.2
210	0.0156	0.164	344.564	0.8603	0.1578	0.47
240	0.0156	0.164	344.564	0.8387	0.1544	0.568
300	0.0156	0.17	344.564	0.8207	0.1571	0.609
310	0.0156	0.141	435.772	0.8046	0.1279	1.267
340	0.0156	0.141	435.772	0.7841	0.1252	1.461
400	0.0156	0.143	435.772	0.7419	0.1215	1.855
410	0.0156	0.123	445.906	0.7152	0.1015	3.001
440	0.0156	0.123	445.906	0.6803	0.0975	3.648
500	0.0156	0.126	445.906	0.6043	0.0913	5.148
510	0.0156	0.111	481.376	0.5664	0.0772	8.528
540	0.0156	0.111	481.376	0.5328	0.0738	10.052
600	0.0156	0.111	481.376	0.4918	0.0696	12.275

TABLA 5-19 Esfuerzo cortante total y efectivo para cada prueba de la Fase II, calculado con las ecuaciones de Temple (1987).

Tiempo acumulado de Prueba Minutos	Numero de Manning del Suelo (n')	Numero de Manning del Pasto (n)	Esfuerzo Total (τ total) Pa	Factor de cobertura Vegetal para el área de Falla (Cft)	Coefficiente de Manning para el área de Falla (nf)	Esfuerzo Efectivo (τ_{ef}) Pa
0	0.0156	0.206	160.58	0.9	0.2063	0
10	0.0156	0.206	160.58	0.8999	0.2063	0.092
40	0.0156	0.206	160.58	0.8995	0.2062	0.092
100	0.0156	0.206	160.58	0.8946	0.2052	0.098
110	0.0156	0.199	270.978	0.8904	0.1973	0.186
140	0.0156	0.199	270.978	0.8859	0.1964	0.195
200	0.0156	0.199	270.978	0.8823	0.1957	0.203
210	0.0156	0.157	341.232	0.878	0.1539	0.428
240	0.0156	0.157	341.232	0.8714	0.1529	0.457
300	0.0156	0.157	341.232	0.8672	0.1522	0.476
310	0.0156	0.131	441.594	0.8636	0.1264	0.918
340	0.0156	0.131	441.594	0.8562	0.1255	0.981
400	0.0156	0.136	441.594	0.8452	0.1285	1.007
410	0.0156	0.113	461.666	0.8268	0.1059	1.736
440	0.0156	0.113	461.666	0.8075	0.1039	2.004
500	0.0156	0.113	461.666	0.7735	0.1003	2.528
510	0.0156	0.098	501.309	0.7516	0.085	4.191
540	0.0156	0.098	501.309	0.7167	0.082	5.138

5.3 DISCUSIÓN Y CONTRASTE DE RESULTADOS OBTENIDOS EN CAMPO Y AJUSTES.

Este subcapítulo consta del cálculo de los parámetros explicados en el Capítulo 3 realizando comparaciones entre las diversas técnicas de bioingeniería y biotecnología usadas en esta investigación, así como con la predecesora a esta, la cual fue realizada por el Ingeniero Luis Alberto de la Cruz.

También se realizaron comparaciones de los datos obtenidos en las 36 pruebas de campo, con las ecuaciones desarrolladas en el subcapítulo 3.3.

5.3.1 Relación entre tiempo y la profundidad de erosión, caudal unitario, esfuerzo efectivo, esfuerzo total, número de Manning y velocidad promedio.

Las FIGURA 5-1, 5-2 muestran los resultados correspondientes a cada fase de prueba. Luego de procesar los datos recolectados de los Anexos F, G y H mostrados en los cuadros de resultados del subcapítulo 5.2.

La FIGURA 5-1 muestra los resultados de profundidad erosión acumulada (ΔE_N) para cada fase, así como también el esfuerzo cortante total promedio para todo el talud (τ_0), esfuerzo cortante efectivo promedio para todo el talud (τ_e) y la velocidad promedio del flujo en laboratorio, todos estos en función del tiempo de duración de las pruebas, siendo estas últimas llevadas consecutivamente, lo que nos ayudo a confeccionar nuestro gráfico tal y como se muestra en la FIGURAS 5-1 y 5-2.

La FIGURA 5-2 muestra también la profundidad de erosión acumulada para cada fase, pero esta vez contrastada con el número de Manning y el caudal para cada prueba, todas estas en función del tiempo.

Es importante recalcar que la metodología de ensayo, de realizar las pruebas de forma consecutiva y aumentando la descarga, fue adoptada de las investigaciones de Hanson (1990) y de De La Cruz (2005).

FIGURA 5-1 Profundidad de erosión VS Tiempo de duración de las pruebas

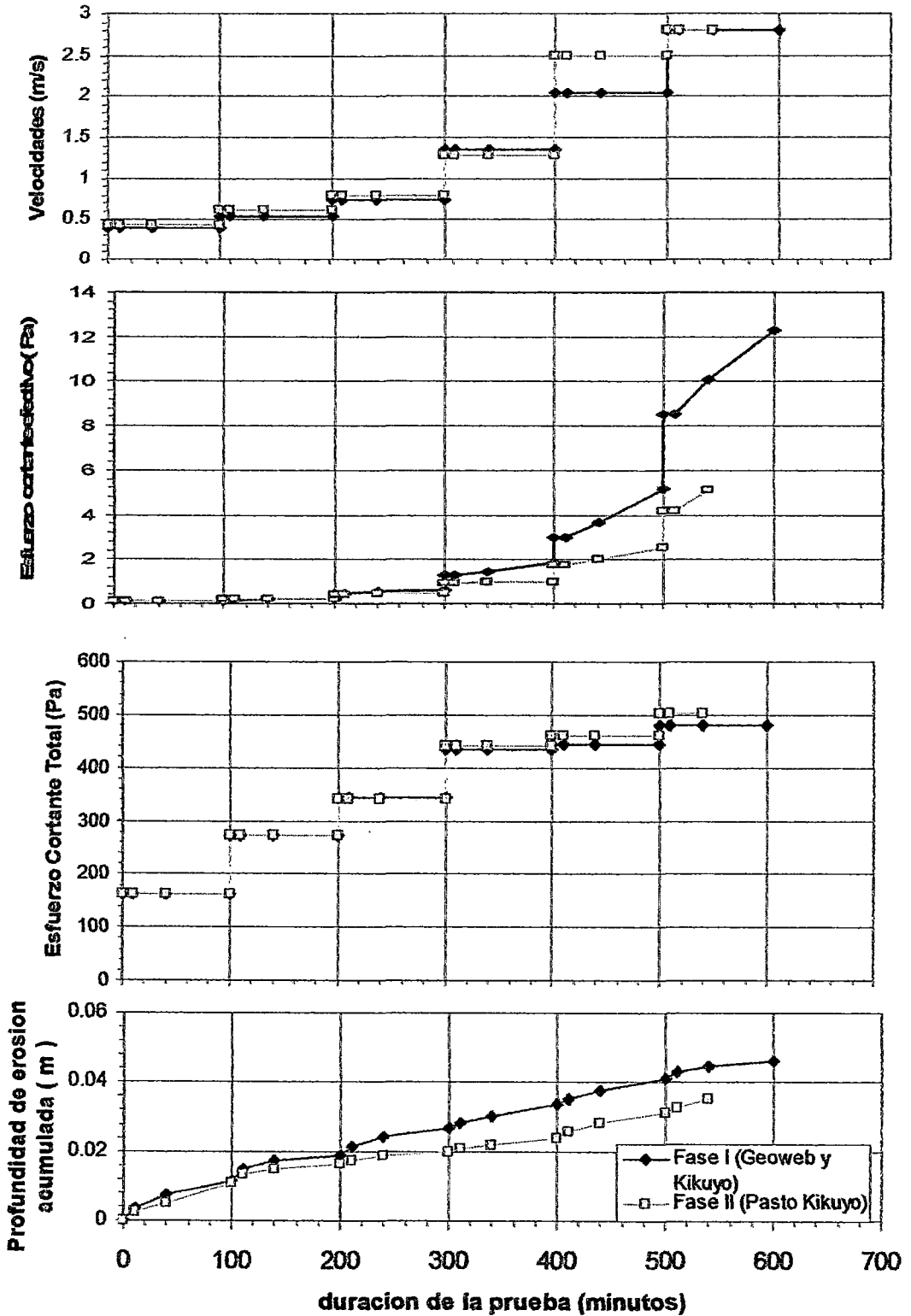
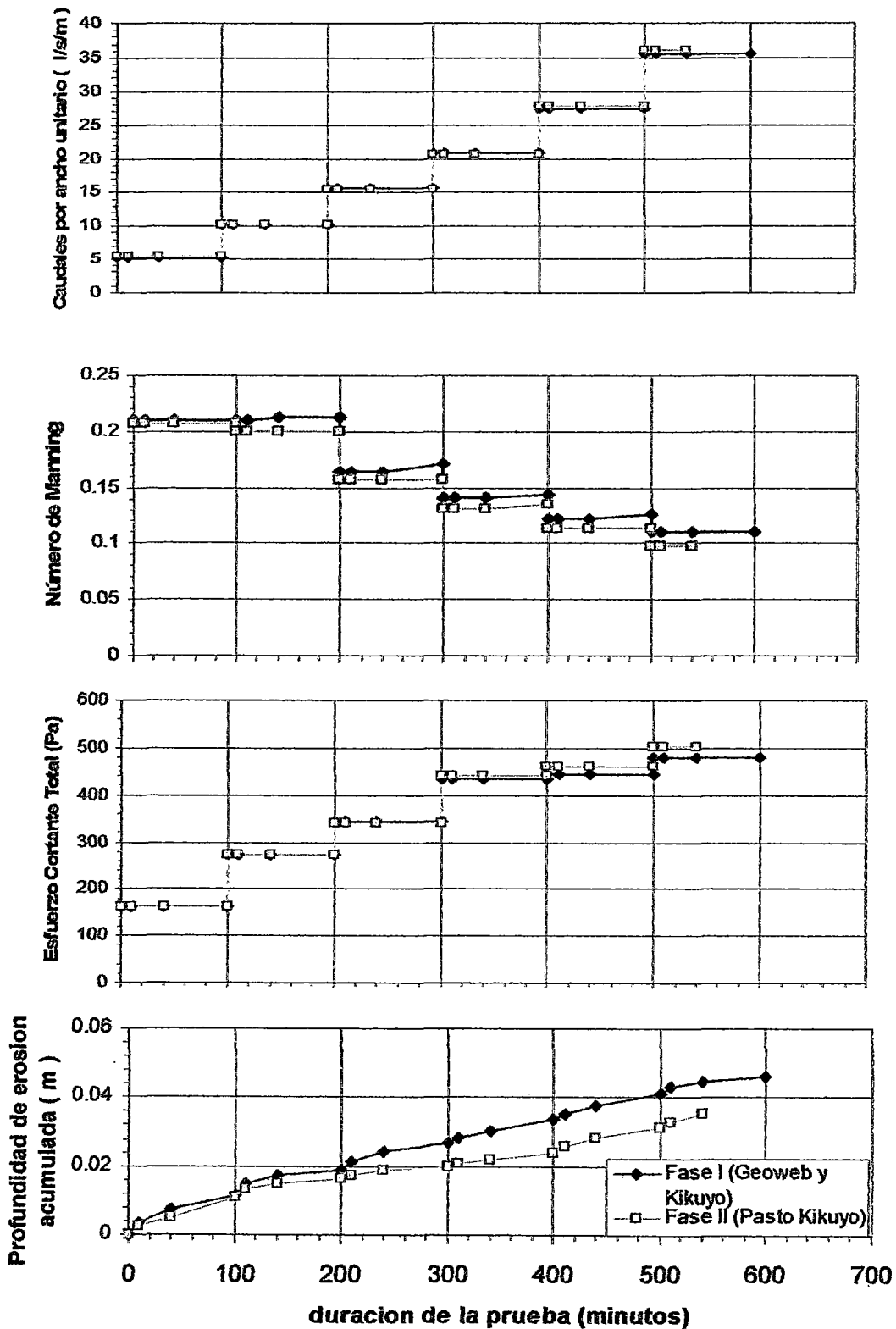


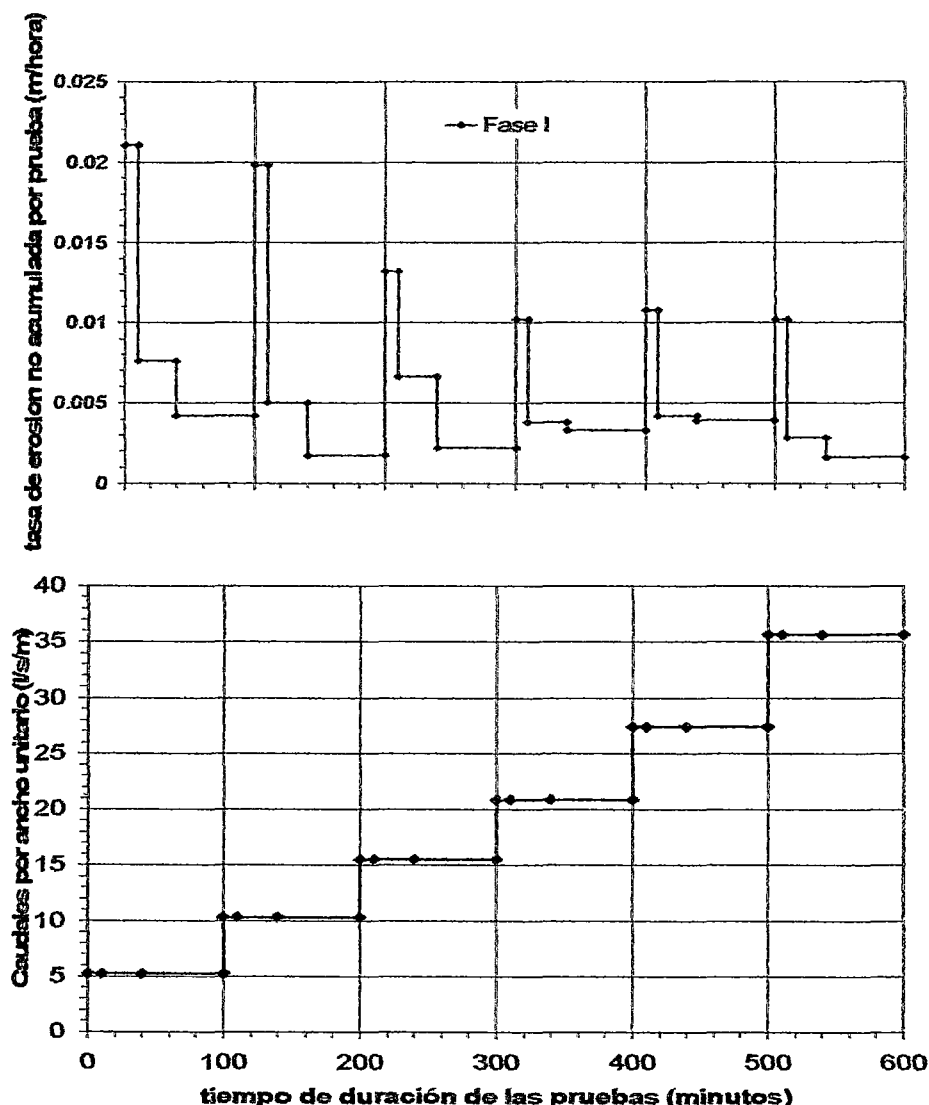
FIGURA 5-2 Profundidad de erosión VS Tiempo de duración de las pruebas



Discusión de Resultados de la Fase I (Cobertura de Pasto Kikuyo con Geoweb)

En esta fase se reforzó el suelo con sistema de confinamiento celular Geoweb. Se observó que las pérdidas de suelo son casi indetectables para cada prueba, pues las profundidades de erosión para cada una de ellas están en el orden de 0.16 cm a 0.42 cm, pero para un mejor análisis comentaremos la relación entre la tasa de erosión por prueba (profundidad de erosión en metros/hora) versus el tiempo de duración de total de las pruebas, correspondiente a la FIGURA 5-3, en la cual también se tiene el caudal unitario para realizar un mejor análisis.

FIGURA 5-3 Tasa de erosión no acumulada para cada prueba de la Fase I.



– **Analizando independientemente la tasa de erosión para cada caudal**

En la FIGURA 5-3 puede observarse que la tasa de erosión (profundidad/tiempo), para un mismo caudal disminuye a través del tiempo, lo cual se observa para cada uno de los caudales unitarios, conforme transcurre el tiempo; pues para los primeros 10 minutos la tasa de erosión, es mayor que para los 30 minutos siguientes y esta es mayor para los 60 minutos siguientes correspondientes a cada caudal dado.

– **Analizando la tasa de erosión para todos los caudales**

Se observa una tendencia general a disminuir la tasa de erosión, conforme se aumenta la profundidad de erosión y el caudal.

Del análisis anteriormente dicho se puede decir que la erosionabilidad del suelo no solo depende de las propiedades del suelo tales como gradación y plasticidad, sino también de otros factores como densidad y estructura del suelo; este último factor es la verdadera razón por la cual el suelo utilizado en esta tesis de investigación es menos erosionable, debido a que en nuestro caso la estructura del suelo no solo está conformada por el suelo sino también por raíces de pasto y refuerzo (Geoweb), lo cual hace que nuestra tasa de erosión tenga el comportamiento anteriormente descrito.

Además, se puede añadir que la tasa de erosión en la prueba I-1 (Prueba de $q=5$ l/s/m y $t=10$ minutos), fue mayor en comparación a las otras pruebas; y esto se debe a que la capa superficial del terreno estaba conformada por *suelo suelto*, producto del crecimiento, desarrollo de las plantas y contenido de material orgánico; lo cual no es motivo de debilidad de la estructura, por ser tan solo de carácter superficial.

Se tuvo especial consideración en el cálculo del número de Manning, sobre todo porque el esfuerzo efectivo τ_e depende de este, además que el número de Manning (n) nos da referencia de la tasa de erosión por ser esta dependiente del

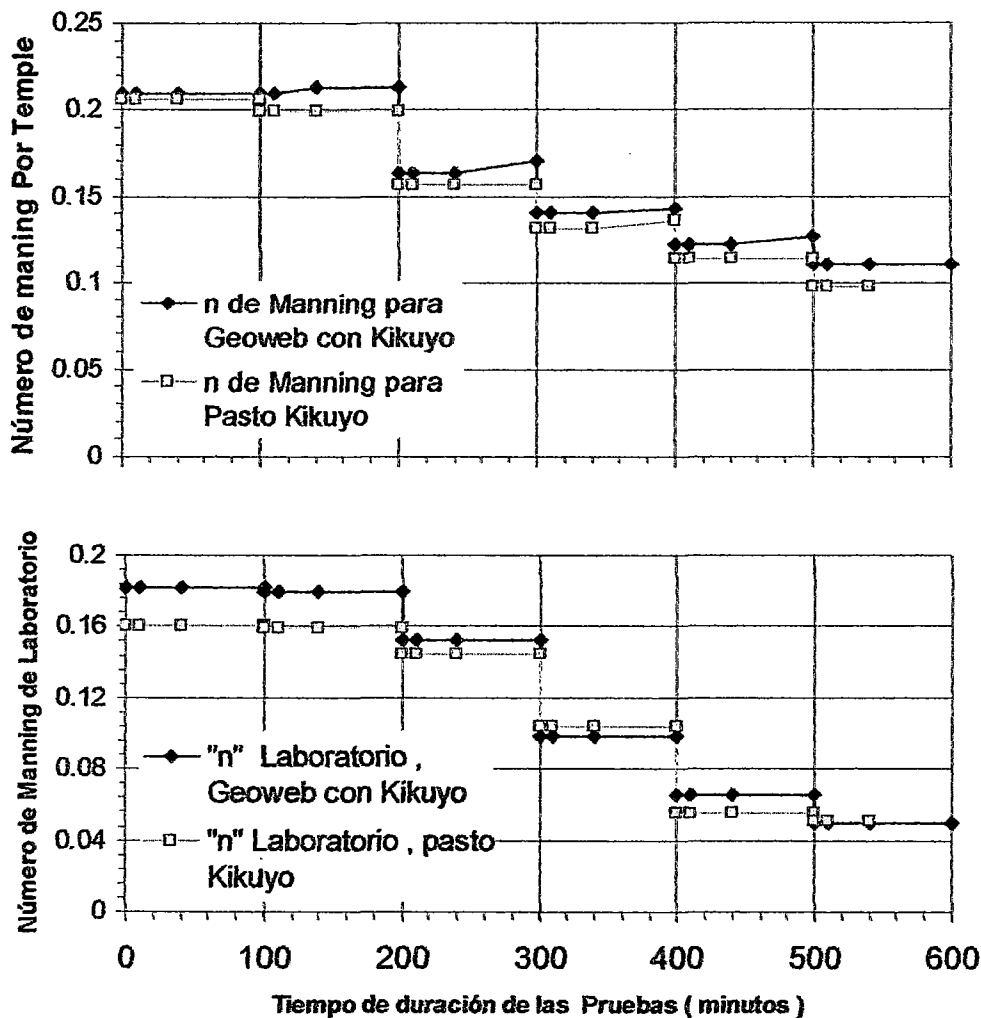
esfuerzo efectivo. Por lo cual se tuvo especial consideración en elegir las hipótesis y métodos del cálculo del número de Manning.

– **Rugosidad de refuerzos adicionales al talud ajenos al pasto.**

Se sabe por investigaciones presentadas en el reporte N° 116 del CIRIA, 1987; que en canales reforzados con pasto, la hidráulica no varía por la adición de geoceldas y la rugosidad se mantiene igual a la del canal reforzado con solo pasto; esto en condiciones en las que el pasto tenga una altura y densidad óptimas, las cuales son nuestro caso, de donde se optó por calcular el número de Manning, solo en función de la rugosidad de pasto Kikuyo.

La condición anteriormente asumida fue corroborada en esta investigación, cuando se hicieron los cálculos de los números de Manning teóricos y de campo (Laboratorio) para la cobertura de pasto Kikuyo (Fase II) y la cobertura de Pasto Kikuyo reforzada con Geoweb (Fase I), obteniéndose la FIGURA 5-4, en donde el número de **Manning teórico** (por Temple) para la Fase I (cobertura de pasto Kikuyo y Geoweb) fue calculado de similar manera que para la Fase II (cobertura de Pasto Kikuyo), tomándose solo el efecto de la rugosidad del pasto Kikuyo. El número de **Manning de Laboratorio** fue calculado con la ecuación de Manning, pues se contaban con los datos de tirantes y velocidades del flujo en campo, por lo cual el número de **Manning de Laboratorio** obtenido para la Fase I (cobertura de pasto Kikuyo y Geoweb) tenía contenido los efectos de todas las rugosidades ubicadas en el lecho del canal, analizando las gráficas se tiene que la variación entre el número de Manning teórico de la fase I y Fase II ($\Delta n_{\text{teórico}}$), es de similar cuantía que la variación del número de Manning de laboratorio de las Fase I y Fase II ($\Delta n_{\text{laboratorio}}$), de donde se puede decir que las rugosidades adicionadas por el refuerzo del Geoweb en la Fase I pueden ser obviadas. Esto se debe al buen tamaño y buena densidad del pasto, haciendo que los efectos producidos por la rugosidad del pasto sean mayores a los del Geoweb.

FIGURA 5-4 Variabilidad del número de Manning de la cobertura de pasto, ante la adición de refuerzo, en este caso Geoweb.



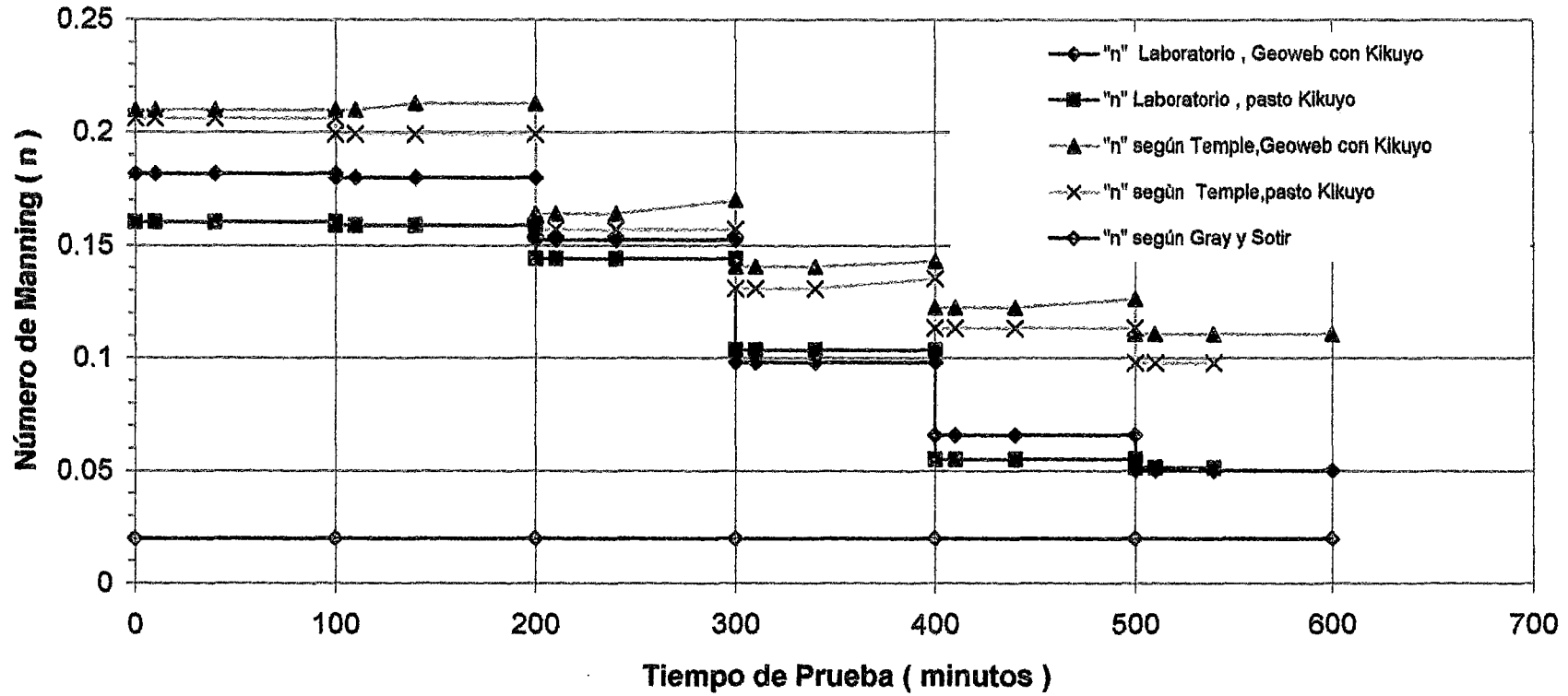
– Método para el cálculo del número de Manning

Otro de los aspectos analizados en esta tesis de investigación fue, el método adecuado para el cálculo del número de Manning teórico. En la bibliografía presentadas por Gray y Sotir (1996); el número de Manning es igual a 0.02 para taludes revestidos con pasto con pendiente $\geq 1/3$, en nuestro caso no usamos este valor por tener bien claro que el número de Manning no solo depende de la pendiente del talud (S), sino de otros factores tales como el caudal unitario, la densidad (M) y tamaño del pasto (h); los cuales condicionan la interacción entre

el pasto y el flujo y consecuentemente el valor del número de Manning; motivo por el que se usaron las ecuaciones dadas por Temple (1987).

Todo lo anteriormente dicho se corrobora con las pruebas efectuadas en esta investigación, según la FIGURA 5-5; se demuestra que las gráficas del número de Manning teórico (por la ecuación de Temple ,1987) y el número de Manning de Laboratorio disminuyen conforme se aumenta el caudal unitario, mostrando una tendencia variable y no constante; es por eso que se recomienda el uso de las ecuaciones dadas por Temple, para el calculo del número de Manning.

FIGURA 5-5 Número de Manning de laboratorio contrastado con el "n" de Manning según Temple y Gray.



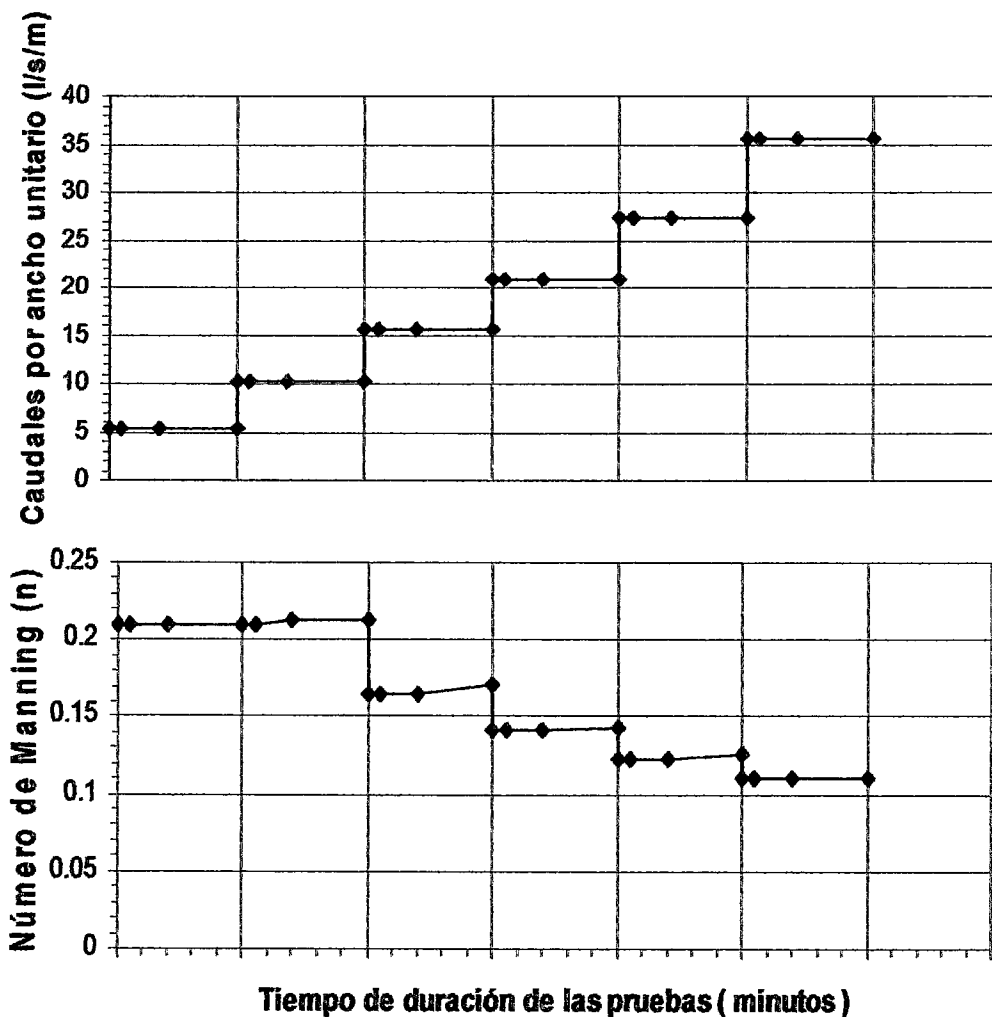
– **Comportamiento hidráulico del pasto.**

Analizando la FIGURA 5-6, se tiene que el número de Manning para caudales unitarios de 5.15 l/s/m y 10.31 l/s/m permanece constante, esto debido al bajo caudal, que hace que la densidad y altura del pasto condicionen totalmente el flujo y por consiguiente a su rugosidad hidráulica; por tanto el cálculo del número de Manning teórico (n), esta en función de la densidad (M) y la altura (h) del pasto Kikuyo, esto quiere decir que bajo estas condiciones este permanece erguido y sin muchos esfuerzos que lo obliguen a doblarse (Ver FOTOGRAFÍA 5-3).

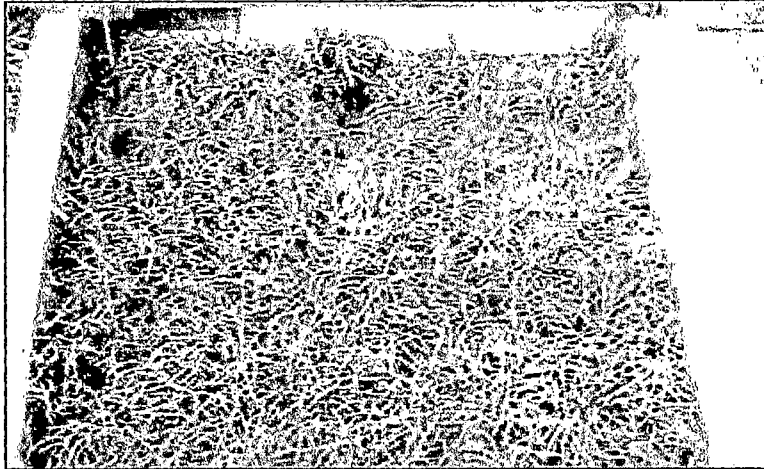
De la FIGURA 5-6, para caudales mayores e iguales a 15.46 l/s/m el número de Manning empieza a disminuir, esto se debe a que en este caso el número de Manning no solo depende de la densidad (M) y altura del pasto (h), sino también del caudal unitario (q), esto se visualiza en la deflexión del pasto (Ver FOTOGRAFÍA 5-4), esto se hace más notorio conforme va aumentando el caudal, produciendo la disminución del número de Manning y aumento del esfuerzo efectivo τ_b , y en consecuencia en el incremento de la erosión.

Cabe señalar que hay ligeros incrementos del número de Manning (n) para los caudales de 10.31, 15.46, 20.62 y 28.33 l/s/m, debido a que el pasto Kikuyo continúa creciendo a pesar de la acción erosiva del flujo superficial.

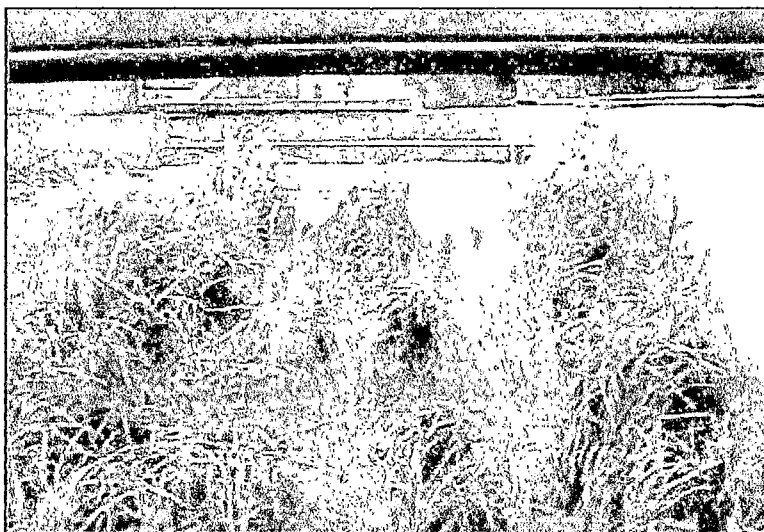
FIGURA 5-6 Número de Manning dado por las ecuaciones de Temple, 1987; el cual se utilizo para realizar los cálculos hidráulicos.



FOTOGRAFÍA 5-3 Se observa que para los caudales de 5 y 10 l/s/m el pasto Kikuyo permanece erguido.



FOTOGRAFÍA 5-4 Para caudales mayores a 10 l/s/m se muestra como el Pasto Kikuyo empieza a flexionarse, modificando así su comportamiento hidráulico.



FOTOGRAFÍA 5-5 Para el caudal de 70l /s/m se muestra como el pasto Kikuyo se dobla, modificando así su comportamiento hidráulico.

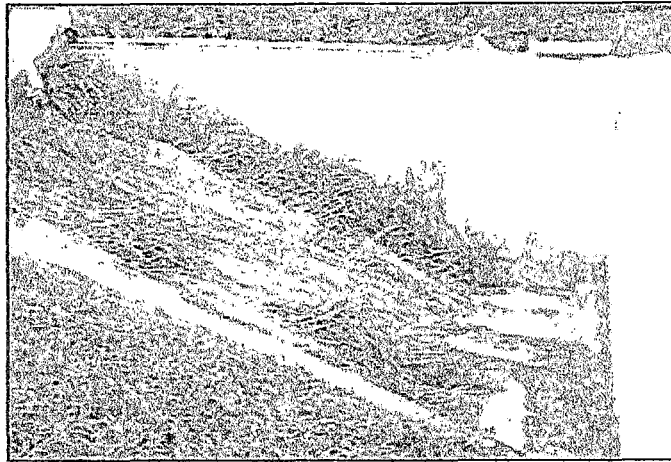
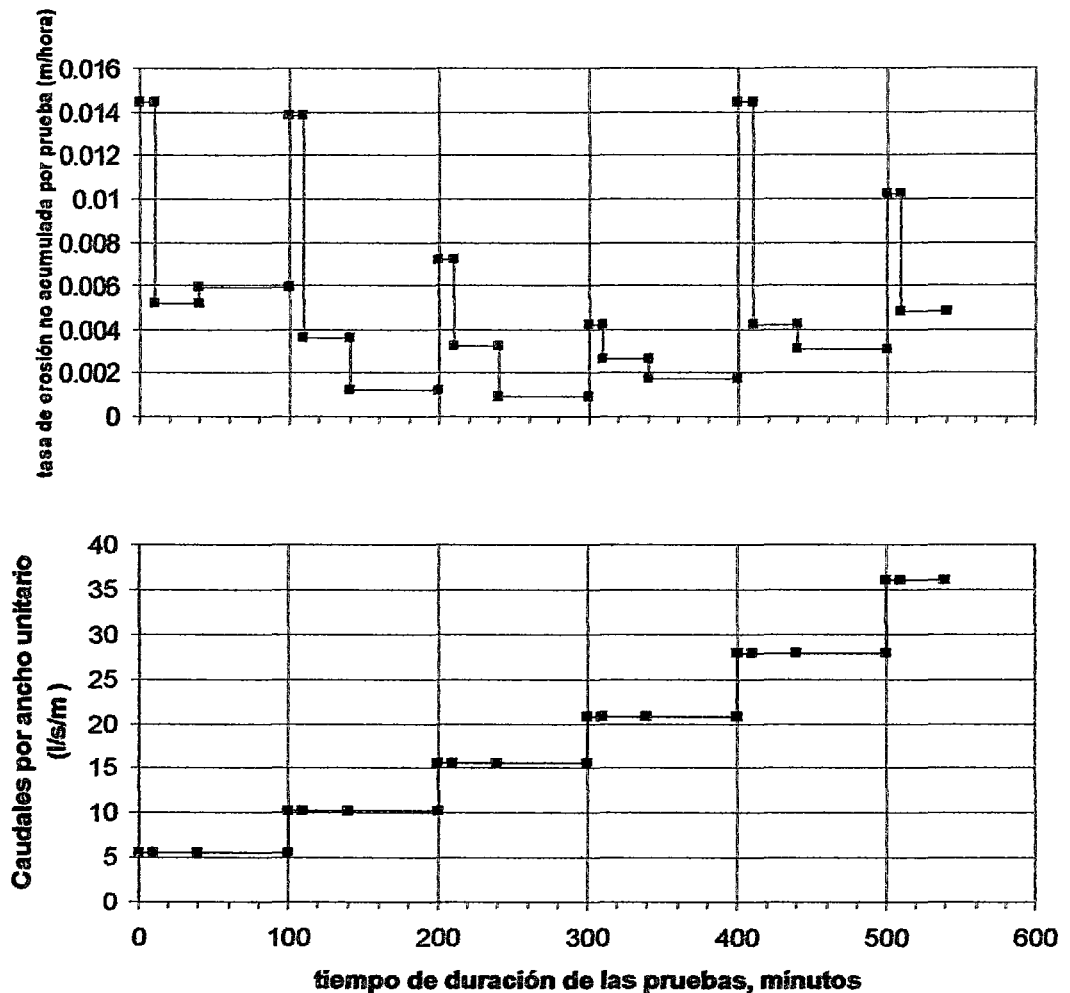


FIGURA 5-7. Tasa de erosión no acumulada para cada prueba de la Fase II.



Discusión de resultados de las Fase II (Cobertura de pasto Kikuyo)

Se observó que las pérdidas de suelo son minúsculas para cada prueba, pues la profundidad para cada una de ellas están en el orden de 0.07 a 0.59 cm, pero para un mejor análisis comentaremos la tasa de erosión por prueba (metros/hora) vs. Tiempo de duración de prueba, correspondiente a la FIGURA 5-7. En la cual se tiene el caudal unitario para realizar un mejor análisis.

– Analizando independientemente la tasa de erosión para cada caudal

Se nota que la tasa de erosión para un mismo caudal disminuye a través del tiempo, lo que se observa para casi todos los caudales unitarios exceptuando el caudal unitario de 5 l/s/m, donde para los tiempos de 30 minutos y 60 minutos la tasa de erosión es casi constante.

– Analizando la tasa de erosión para todos los caudales

Se observa la tendencia a disminuir para los caudales de 5,10,15,20 l/s/m conforme aumenta la profundidad de erosión y el tiempo de prueba, pero para los caudales de 25 l/s/m y 35 l/s/m se observa que la tasa de erosión para los 10 primeros minutos aumenta a un valor de 0.0144 m/hora y 0.0102 m/hora respectivamente, en el caso del caudal de 25 l/s/m la tasa de erosión se incrementa debido a que la velocidad del flujo varía en forma abrupta hasta alcanzar la velocidad de 2.49 m/s; esto debido a que el pasto se dobla totalmente para esta prueba, generándose menor interferencia al flujo y una condición más crítica de erosión.(FOTOGRAFIA 5-6)

Del párrafo anterior se puede decir, que la erosionabilidad del terreno fue disminuyendo inicialmente hasta que las zonas de debilidad ubicadas entre cespedón y cespedón empezaron a erosionarse en mayor cuantía, situación que fue observada en campo para los caudales de 25 l/s/m y 35 l/s/m, esto conlleva a que la tasa de erosión vuelva a incrementarse tal y como sucedió para el caudal de 25 l/s/m.

Al igual que para la cobertura de geoceldas (Fase I), en la Fase II se notó una elevada tasa de erosión para la prueba II-1, debido a que inicialmente existía en la superficie material suelto, producto del crecimiento del pasto y la biodiversidad de animales existentes.

FOTOGRAFIA 5-6 Se observa el talud sometido a la prueba II-13, con caudal unitario = 25 l/s/m, nótese que el Pasto ya se dobló totalmente y ofrece poca resistencia al flujo.



– **Falla de la cobertura de pasto Kikuyo (Prueba II-17)**

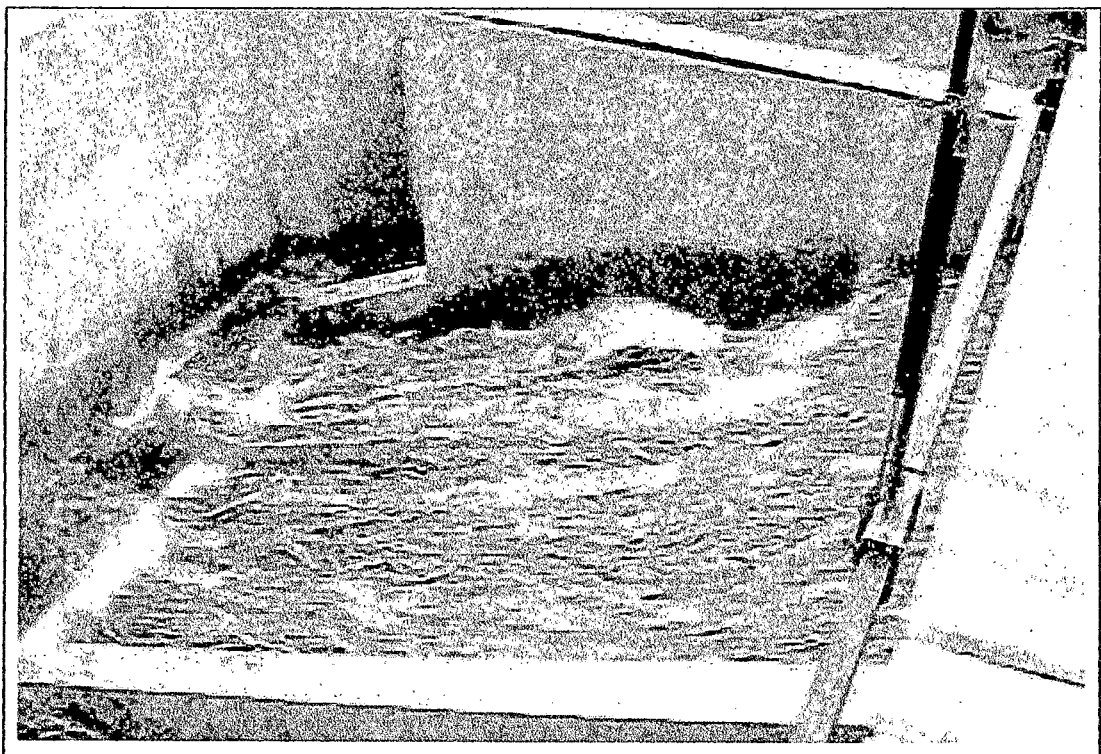
Es importante señalar que en la prueba II-17, para un caudal de 30 l/s/m y tiempo de prueba igual a 38 minutos, se produjo la falla de la cobertura de pasto Kikuyo, a una profundidad aproximada de 0.064 m, valor que se aproxima al dado por Temple, 1987; que es de 0.06 m, el cual nos indica la profundidad de erosión, en la que se inicia la falla de la cobertura y consecuentemente la pérdida total de la capacidad protectora de la cobertura de pasto en la zona de falla.

El mecanismo de falla se inició ó fue originado por una zona de debilidad, ubicada en el contacto de 2 bloques de cespedón, esta zona ubicada de forma perpendicular al flujo de velocidad = 2.81 m/s empezó a recibir de forma directa toda la carga hidrodinámica, produciéndose una zona de presiones muy

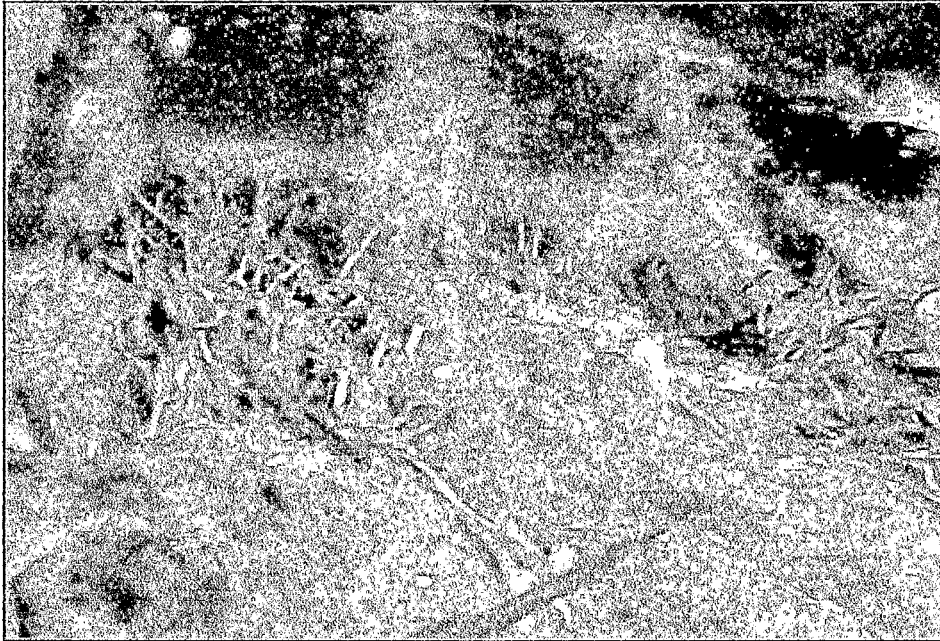
diferenciadas, lo que obligó al compuesto (suelo – raíces – estolones – rizomas) a levantarse y ser volteado como se ve en la FOTOGRAFÍA 5-7 ,para luego ser el suelo lavado al estar expuesto de forma directa al flujo, esto nos dice que se debe tener especial cuidado en el manejo de cespedones, pues se deben evitar zonas de debilidad, sobre todo en flujos supercríticos donde la singularidades que presente el canal, pueden crear zonas de elevada turbulencia, que es nuestro caso y puede observarse en la FOTOGRAFÍA 5-8.

Otra de las razones por los cuales se produjo la falla en este talud, es debido al crecimiento del esfuerzo cortante efectivo conforme iban aumentando los caudales y el tiempo (FIGURA 5-1), pues se nota un crecimiento lineal del esfuerzo efectivo para cada caudal, este debido a la disminución del número de Manning y disminución del factor C_{ft} para el sector de la falla.

FOTOGRAFÍA 5-7 Se observa la FALLA del Talud para la prueba II-17, nótese la porción de cespedón volteada.



FOTOGRAFÍA 5-8 Toma cercana del flujo para la prueba II-17, en donde se nota la marcada turbulencia del flujo.



Análisis y Discusión de las Fases I y II

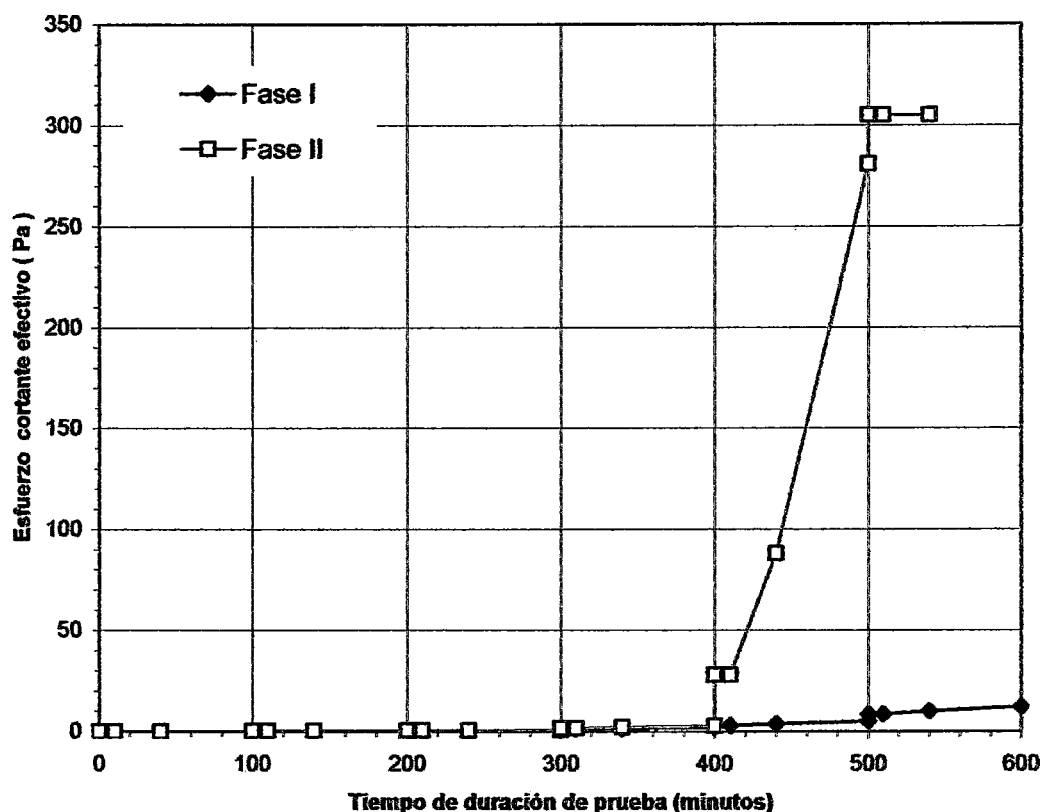
– Esfuerzo cortante

De la FIGURA 5-1 el esfuerzo cortante (τ_0) para la fase I y fase II tiene tendencia a variar poco para caudales mayores a 20 l/s/m, que es el caudal bajo el cual algunas partes de la cobertura de pasto Kikuyo presenta tallos doblados y acostados, influyendo así en el tirante de flujo, que al tener menos obstrucciones, tiende a aumentar en menor cuantía que la velocidad, lo cual influye en el cálculo de los esfuerzos cortantes totales.

Con respecto al esfuerzo efectivo (τ_e) de la FIGURA 5-1 observamos una tendencia lineal de crecimiento del τ_e , para cada caudal, la cual va acentuándose mucho más conforme van aumentándose los caudales y transcurriendo el tiempo, este crecimiento lineal del τ_e para cada caudal se debe a la debilitación de la cobertura de pasto Kikuyo la cual es expresada con la constante CF_t (coeficiente de vegetación).

Se observa que el esfuerzo total (τ_0) es similar tanto para la Fase I y II, caso contrario al esfuerzo cortante efectivo (τ_e), ahora daremos una serie de razones por las cuales el τ_e para el área de falla en la Fase II (cobertura de pasto Kikuyo) es mucho mayor que para la Fase I (cobertura de Geoweb con pasto Kikuyo), en el cual no se produjo falla (Ver FIGURA 5-8).

FIGURA 5-8 Esfuerzo efectivo para la Fase I y para el sector del área de falla en la Fase II



Número de Manning (n): De la FIGURA 5-2 el número de Manning para la fase II es mucho menor que para la fase I, esto es porque la densidad (M) y altura (h) del pasto Kikuyo son menores para la fase II, esto debido a que la tasa de crecimiento fue mucho más rápida para la Fase I y por razones que se darán en el ítem 5.3.2.

Coficiente de vegetación (Cft): Razón principal, por la cual el esfuerzo efectivo para la cobertura de Fase II es mayor, pues Cft para la Fase II

disminuye con mayor rapidez que para la fase I, debido a que la cobertura de pasto Kikuyo sufrió daños (en el sector de la junta ubicada entre cespedón y cespedón).

Al haber fallado la cobertura de pasto Kikuyo para la prueba II-17, el esfuerzo efectivo (τ_e) alcanzó su máximo valor ($\tau_e = 305$ Pa), pues el principio de falla es definida como la pérdida total de la capacidad protectora de la cobertura de pasto; siendo para este caso $CF_t = 0$.

Veamos la ecuación del esfuerzo efectivo τ_e :

$$\tau_e = \gamma R S \left(\frac{n'}{n_f} \right)^2 (1 - CF_t)$$

De donde se observa que para $CF_t = 1$, $\tau_e = 0$ que es el caso en el que la cobertura vegetal protege totalmente el suelo, en nuestro caso, CF_t inicial es 0.9 según Gray y Sotir, 1996; este valor es igual inicialmente para las fases I y II, pero luego decrecer en mayor cuantía para la fase II, lo cual se debió a que el sector donde se produjo la falla empezó a sufrir daños en la zona de las juntas ubicadas entre cespedón y cespedon.

– Factores que indujeron la falla en la Fase II:

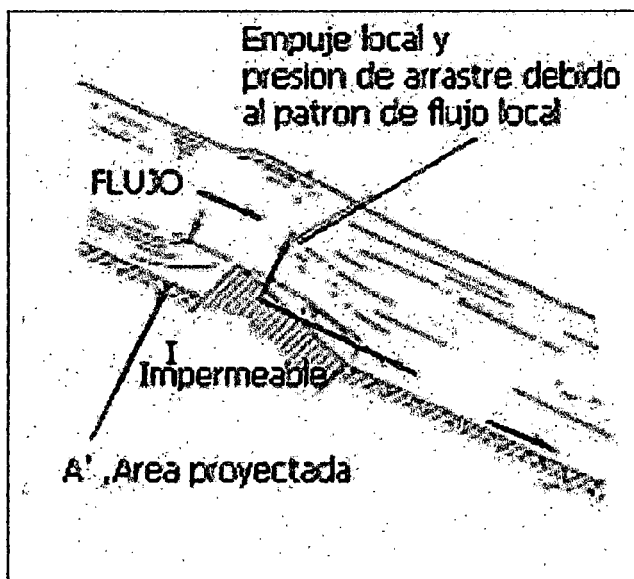
Fuerzas hidrodinámicas: Este factor se presentó al ser el flujo de velocidad elevada ($V = 2.8$ m/s) y de presentar ciertas irregularidades en el talud, las cuales eran juntas ubicadas entre cespedón y cespedón, que al ser colocados incorrectamente formaron zonas de presión muy diferenciadas, produciendo así la falla de la cobertura de pasto Kikuyo.

Técnica de sembrado: Este factor se manifiesta de 2 formas:

1. La primera expresada en una zona de debilidad en la junta ubicada entre 2 cespedones del sector izquierdo del talud, esta junta dispuesta

en forma perpendicular al flujo, fue creciendo en profundidad hasta alcanzar los 0.06 m con un ancho de 1 a 0.5 cm y longitud perpendicular al flujo de 0.10 m (Prueba II-15), luego para las pruebas II-16 y II-17 se observa que esta pequeña abertura continuó creciendo en dirección al flujo, quedando descubierta cierta porción de sección transversal de cespedón bajo la cual se ejerció una fuerza axial producto del choque del flujo (Fuerza Hidrodinámica) (VER FIGURA 5-9).

FIGURA 5-9 Se observa la acción del flujo sobre una porción de terreno expuesta de forma frontal al flujo, condicionándolo a ser volteado.



2. La segunda expresada en otra zona de debilidad ubicada entre la base del cespedón (sector compuesto de raíces y suelo) y la superficie del Talud sin revestir, esta zona de debilidad fue la que desencadena la falla de una gran porción de cobertura, claro esta que fue originada por la presencia de la primera zona de debilidad.

Luego que el flujo ejerciera una fuerza axial sobre la sección expuesta del cespedón, este fue empujado aguas abajo del canal, lo que creo un plano de falla entre la base del cespedón y la capa inferior del talud, lo cual condujo al volteo de cierta porción trapezoidal de cespedón ($b_{\text{menor}} = 0.2$ m, $b_{\text{mayor}} = 0.45$, $h = 0.66$ m) (FOTOGRAFÍA 5-7), siendo así expuesto al flujo: El suelo, raíces y rizomas del pasto Kikuyo.

Cabe señalar que este plano de falla entre el cespedón y la capa inferior del talud se debe a la mala conjunción del cespedón de Kikuyo al terreno y por ende al mal enraizamiento.

Esfuerzo cortante efectivo: El cual fue mayor para la Fase II que para la Fase I, esto se debió a que la vegetación era de menor altura y rigidez, lo que origina un "n" de Manning menor, produciéndose además un flujo más veloz.

Es importante señalar que a pesar de que la erosión en la Fase I fue mayor que en la Fase II, la cobertura usada en la Fase I no falló debido a la confinación que las geoceldas dieron al conjunto de raíces y rizomas del pasto kikuyo; lo que pudo originar la mayor erosión para la Fase I, se deben a las singularidades que se presentan por la presencia de las paredes de la geocelda, originando mayor cantidad de turbulencia y en consecuencia mayor erosión.

Entonces se puede decir que las geoceldas en sí no protegen directamente al terreno del esfuerzo cortante, sino lo que hace es confinar el suelo y la vegetación, conformando un compuesto suelo-pasto-geocelda, el cual sí funciona como protector de la erosión, además de ayudar a la vegetación a desarrollarse más rápidamente.

Cabe señalar que al ser nuestra pendiente para los 2 taludes igual a 0.52 y caudales mayores a 5 l/s/m, se observó que para las pruebas de 15, 20, 27.5, y 35 l/s/m el flujo es supercrítico, lo que condiciona a dar importancia a las turbulencias originadas por cualquier singularidad del canal.

5.3.2 Análisis Y discusión del comportamiento de los pastos Kikuyo y Tanzania de acuerdo a la técnica de bioingeniería.

Por ser el pasto Kikuyo una planta, tiene diferentes propiedades y comportamientos según las condiciones en la que se establezca, tales condiciones o factores pueden ser la temperatura, altitud y humedad.

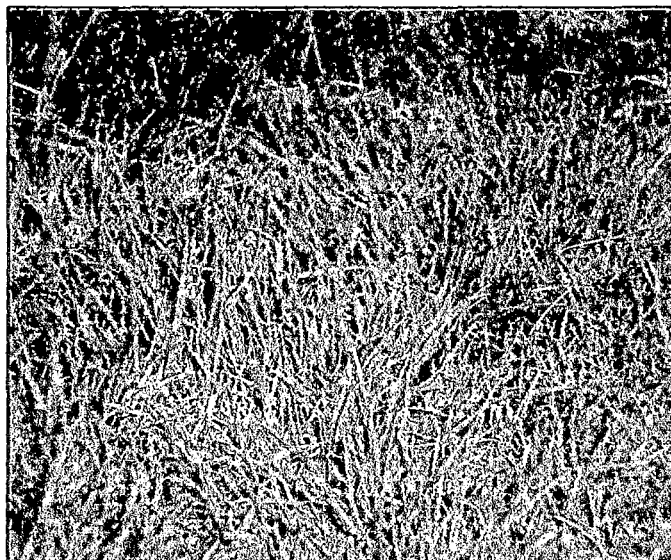
Esto se visualiza en la TABLA 5-20, FOTOGRAFÍAS 5-9 y 5-10.

TABLA 5-20 Altura y Densidad del pasto Kikuyo en Juliaca (Lugar desde el cual fue traído el pasto) y Lima.

Locación	Temperatura promedio	Altitud	Altura del Pasto (h)	Densidad del Pasto (M)	Clima
	°	m.s.n.m	cm	Tallos/m ²	
Juliaca-Puno	10	3814	1 - 2.5	5400	Frio-seco
Lima	20	30	20 - 25	880	cálido-húmedo

Estos resultados nos indican que para efecto de diseño, es importante determinar el comportamiento de cada especie vegetal bajo condiciones específicas de trabajo.

FOTOGRAFÍA 5-9 Toma del pasto Kikuyo en las afueras de la ciudad de Juliaca (pasto Kikuyo de 1 a 2.5 cm de altura).



FOTOGRAFÍA 5-10 Pasto Kikuyo establecido en el modelo, nótese el cambio en tamaño y densidad (pasto Kikuyo de 20-25 cm de altura).

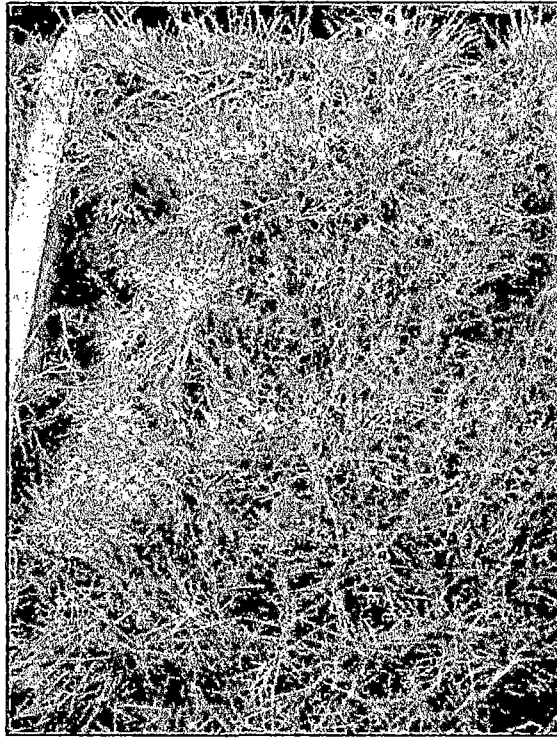
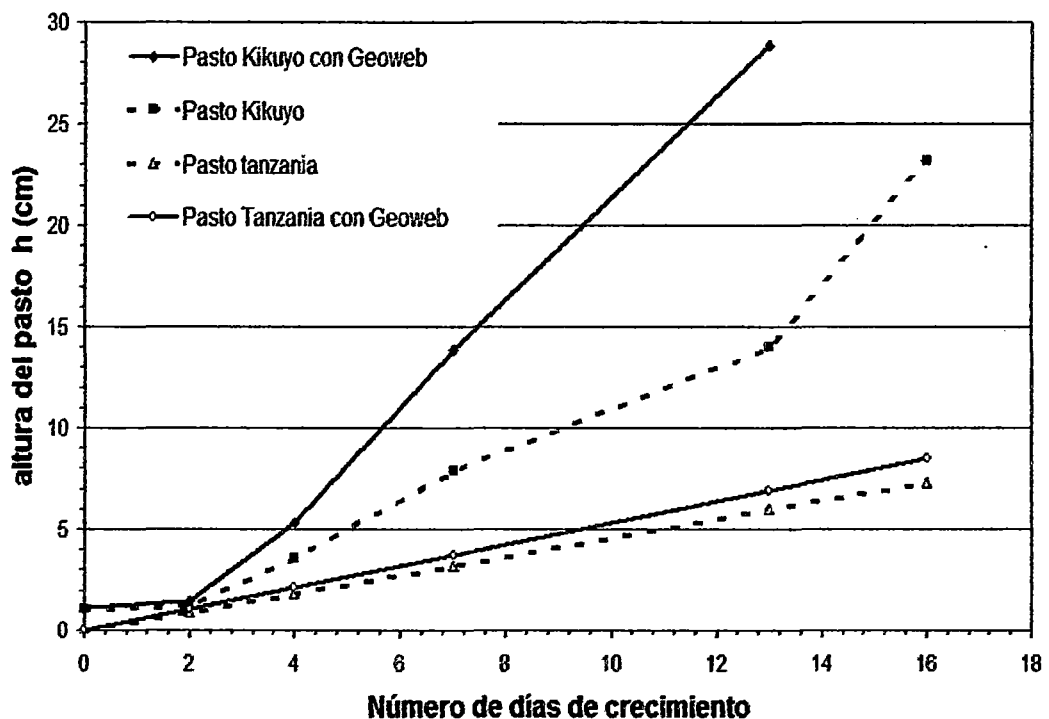


FIGURA 5-10 la altura de crecimiento del pasto Kikuyo y Tanzania vs. Tiempo en días.



Altura de crecimiento

La FIGURA 5-10 muestra la altura de crecimiento del pasto Kikuyo vs. Tiempo en días en los fases I y II, conjuntamente con la altura de crecimiento del pasto Tanzania, siendo esta última obtenida de las Fases II y III de la tesis del Ingeniero Luis Alberto de la Cruz (2005).

En la FIGURA 5-10, se observa que la **cobertura de Geoweb** con pasto Kikuyo o Tanzania, según sea el caso, denota una tasa de crecimiento mucho mayor que en el caso de usar solo una cobertura de pasto Kikuyo o Tanzania; esto nos indica que las geoceldas del Geoweb permiten retener el agua, lo cual ayuda a que las plantas se desarrollen con mayor rapidez; además las geoceldas permiten el drenaje por sus perforaciones, evitando la elevada acumulación de agua en estas, para evitar que las raíces de la vegetación se descompongan por exceso de agua.

Al comparar la altura de crecimiento del pasto Kikuyo con el pasto Tanzania, se observa un crecimiento más rápido del pasto Kikuyo que del pasto Tanzania, lo cual se debe a 2 factores:

1.-Tipo de especie: Que en el caso del pasto Kikuyo se nota una tendencia natural al crecimiento veloz de cada uno de sus componentes en comparación con el pasto Tanzania, otra particularidad del pasto Kikuyo que es muy flexible lo cual lo hace resistente al pisoteo a agresión física, caso contrario al pasto Tanzania que tiene una rigidez considerable.

2.-Técnica de sembrado: El pasto Kikuyo fue sembrado mediante cespedones y esquejes, de lo cual se puede decir que el pasto Kikuyo ya tenía cierto grado de desarrollo al momento del sembrado, caso contrario al pasto Tanzania que fue sembrado con semillas.

Siendo este último factor la razón principal del porque el pasto Kikuyo creció con mayor rapidez.

Densidad del pasto Kikuyo

TABLA 5-21 Densidad de los pastos Kikuyo y Tanzania con Geoweb y sin éste.

Técnica de Bioingeniería	Densidad de tallos promedio (Tallos/m²)
Pasto Kikuyo (Fase II)	878
Pasto Kikuyo con Geoweb (Fase I)	896
Pasto Tanzania (Fase II)	2814
Pasto Tanzania con Geoweb (Fase III)	4050

El TABLA 5-21 muestra la densidad del pasto Kikuyo en las Fases I y II así como la densidad del pasto Tanzania en las Fases II y III.

Se observa que la densidad del pasto Kikuyo no varía para la Fase I ni Fase II, esto quiere decir que la densidad del pasto Kikuyo no está sujeto a la cantidad de agua retenida; caso contrario al pasto Tanzania, el cual si tiene variación en su densidad , pues para la fase III (cobertura de Geoweb) $M = 4050$ tallos/m² y para la fase II(cobertura de Pasto Tanzania) $M = 2814$ tallos / m² ,lo que nos indica que cada especie interactúa de diferente manera ante una misma situación.

Cabe señalar que el pasto Kikuyo estuvo sujeto en forma continúa al flujo, lo que supondría la debilitación de hojas y tallos de este; pero se observó una respuesta óptima pues no se detectó desprendimiento ni debilitación de las hojas y tallos.

Otra característica del pasto Kikuyo que se puede resaltar, es que este crece en condiciones normales al haber exceso de agua en el suelo en el que se ha establecido; lo anteriormente dicho se pudo observar al finalizar las (35 pruebas que se realizaron en los taludes).

Se observó que el pasto Kikuyo ubicado en las geoceldas (Fase I) continúa creciendo mientras las pruebas eran llevadas a cabo, pero en el caso de la cobertura de solo pasto Kikuyo (Fase II), esto no ocurrió, pues el pasto prosiguió del mismo tamaño, esto se debe a que las geoceldas ayudan a la vegetación a que tenga un mejor desarrollo y desempeño.

Comportamiento de las raíces del pasto Kikuyo

En la FOTOGRAFÍA 5-11 se observa una buena interacción entre el pasto Kikuyo y la cubierta de geoceldas, debido a que las raíces del pasto Kikuyo han penetrado en los orificios que contienen las geoceldas, generando zonas de anclaje entre el pasto y el Geoweb. También se tiene del TABLA 5-22, que la tasa de crecimiento en profundidad de la raíz del pasto Kikuyo es elevada, pues bordea $2.1 \frac{\text{cm}}{\text{día}}$, pero su resistencia es muy baja en comparación con las

raíces del pasto Tanzania. De todo este se puede decir que la protección que ofrece el pasto Kikuyo al suelo es en mayor cuantía superficial, esto desde la superficie del suelo hasta 10 cm de profundidad, sector donde se encuentran los tallos, estolones y rizomas, que son los principales componentes protectores del suelo una vez que los tallos y estolones (componentes superficiales del pasto Kikuyo) han sido dañados.

FOTOGRAFÍA 5-11 Se observa el desarrollo de las raíces del pasto Kikuyo a través de los orificios de las geoceldas

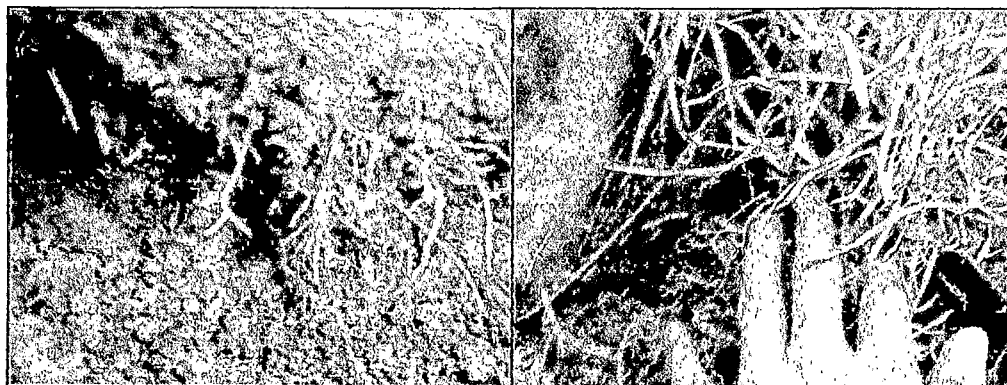


TABLA 5-22 Tasa de crecimiento en profundidad de la raíz del pasto Kikuyo.

Fecha de Medición	Nro. De Días	Tasa de crecimiento en profundidad de la raíz (cm/día)			
		botella de altura de 5 cm	botella de altura de 11 cm	botella de altura de 18 cm	botella de altura de 20 cm
11/07/2005	0	0	0	0	0
14/07/2005	3	1.7	1.8	1.7	2
17/07/2005	6	—	1.9	1.7	2
18/07/2005	7	—	—	2	1
20/07/2005	9	—	—	3	3.5

Falla de la cobertura en la fase II

En la FOTOGRAFÍA 5-7 se observa la falla del talud para la Fase I, que se dio para un caudal del 35 l/s, después de 38 minutos de haber iniciado la prueba con dicho caudal, esta falla se inicio en una junta ubicada entre 2 cespedones consecutivos, para luego extenderse aguas abajo del canal; esto sucedió debido a que la masa del suelo + raíces de pasto fue removida de forma violenta, de modo que $\frac{1}{2}$ cespedón fue levantado y volteado y en consecuencia erosionado más rápidamente, lo cual conlleva a que el compuesto raíces-suelo del cespedón este directamente expuesto al flujo.

El origen de la falla es la zona de debilidad que se encuentra entre cespedón y cespedón, esto quiere decir que el pasto Kikuyo no tuvo una buena expansión radial de raíces evitando así la unificación entre cespedones, así como tampoco hubo buen enraizamiento al terraplén. Todo esto nos indica que para caudales mayores iguales que 35 l/s/m es necesaria otra técnica de sembrado, en nuestro caso sería recomendable el sembrado utilizando semillas, así se evitarían las zonas de debilidad de presiones, que para flujos supercríticos son peligrosas, debido a la alta variabilidad de presiones por fuerzas hidrodinámicas.

Efecto del tiempo de prueba

Se observó un comportamiento óptimo de la vegetación, a pesar de estar sumergida bajo un flujo de agua durante 600 minutos y 540 minutos para la fase I y II respectivamente, pues se noto que el pasto Kikuyo permaneció

inalterable sin presentar signos de marchitamiento ni desprendimiento, lo que lo hace una especie muy útil en zonas de inundación.

5.3.3 Relación entre la técnica de bioingeniería, caudal y el tiempo de prueba.

En las TABLAS 5-23, 5-24, 5-25 Y 5-26 se tiene las mediciones cuantitativas y cualitativas de la erosión en las coberturas de pasto Kikuyo y Kikuyo reforzado con Geoweb, contrastadas con las obtenidas para las coberturas de pasto Tanzania, Tanzania reforzado con Geoweb y Tanzania reforzado con Macmat, obtenidas de Del la Cruz (2005); mostrándonos la efectividad del pasto Kikuyo como herramienta en el control de erosión hídrica.

TABLA 5-23 Medición de la profundidad de erosión por prueba, para la coberturas de pasto Kikuyo y Tanzania.

Caudal Unitario	Tiempo de	<i>Pasto Kikuyo</i>		<i>Sin cobertura</i>	<i>Pasto Tanzania</i>		
		FASE I Geoweb	FASE II Pasto Kikuyo	FASE I suelo desnudo	FASE II Pasto Tanzania	FASE III Geoweb	FASE IV Macmat
l/s/m	Escorrentía minutos	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.
0.5	10'			3.2			
1	10'			5	0	0	0
2	10'			8	0.1	0.04	0.08
3	10'			16	0.26	0.08	0.16
5	10'	0.35	0.24		0.36		
	30'	0.38	0.26				
	60'	0.42	0.59				
7.5	10'				0.4	0.14	0.16
10	10'	0.33	0.23				
	30'	0.25	0.18				
	60'	0.17	0.12				
15	10'	0.22	0.12			0.22	0.24
	30'	0.33	0.16				
	60'	0.22	0.09				
20	10'	0.17	0.07		0.68		
	30'	0.19	0.13				
	60'	0.33	0.17				
27.5	10'	0.18	0.24			0.41	0.48
	30'	0.21	0.21				
	60'	0.39	0.31				
35	10	0.17	0.17				
	30	0.14	0.24				
	60	0.16	El Talud Falló				

TABLA 5-24 Medición cualitativa de erosión por prueba para cada técnica de bioingeniería.

Caudal Unitario	Tiempo de	<i>Pasto Kikuyo</i>		<i>Sin cobertura</i>	<i>Pasto Tanzania</i>		
		FASE I Geoweb	FASE II Pasto Kikuyo	FASE I suelo desnudo	FASE II Pasto Tanzania	FASE III Geoweb	FASE IV Macmat
l/s/m	Escorrentía minutos	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.
0.6	10'			Erosión por surcos			
1	10'			Erosión por surcos	Pérdidas Imperceptibles	Pérdidas Imperceptibles	Pérdidas Imperceptibles
2	10'			Severa erosión por surcos	Pérdidas Imperceptibles	Pérdidas Imperceptibles	Pérdidas Imperceptibles
3	10'			Muy severa erosión por surcos	Formación de microsurcos	Pérdidas Imperceptibles	Pérdidas Imperceptibles
5	10'	Pérdidas Imperceptibles de material orgánico superficial	Pérdidas Imperceptibles de materia l orgánico superficial		Formación de microsurcos		
	30'	Pérdidas Imperceptibles de material orgánico superficial	Pérdidas Imperceptibles de material orgánico superficial				
	60'	Pérdida total de material Orgánico superficial	Pérdida total de material orgánico superficial				
7.5	10'				Muy leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos	Pérdidas imperceptibles	Formación de microsurcos

TABLA 5-25 Medición cualitativa de erosión por prueba para cada técnica de bioingeniería.

Caudal Unitario	Tiempo de Escorrentía minutos	<i>Pasto Kikuyo</i>		<i>Sin cobertura</i>	<i>Pasto Tanzania</i>		
		FASE I Geoweb	FASE II Pasto Kikuyo	FASE I suelo desnudo	FASE II Pasto Tanzania	FASE III Geoweb	FASE IV Macmat
l/s/m		Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.
10	10'	Formación de microsurcos	Formación de microsurcos				
	30'	Formación de microsurcos	Formación de microsurcos				
	60'	Muy leves pérdidas por erosión laminar poca turbulencia en las paredes de las geoceldas	Muy leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos.				
15	10'	Muy leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos	Muy leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos			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
	30'	leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos	leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos				
	60'	pérdidas por erosión laminar formación de pequeños huecos en la parte inferior del talud	Leves pérdidas por erosión laminar y turbulencia en la base de los tallos			Leves pérdidas de Pasto por esfuerzo hidráulico elevado, lo que originó erosión local en las zonas afectada	
20	30'	micro socavación individual en cada tallo de pasto	micro socavación individuales cada tallo de pasto				
	60'						

TABLA 5-26 Medición cualitativa de erosión por prueba para cada técnica de bioingeniería.

Caudal Unitario	Tiempo de	<i>Pasto Kikuyo</i>		<i>Sin cobertura</i>		<i>Pasto Tanzania</i>	
		FASE I Geoweb	FASE II Pasto Kikuyo	FASE I suelo desnudo	FASE II Pasto Tanzania	FASE III Geoweb	FASE IV Macmat
l/s/m	Escorrentía minutos	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.	Erosión cm.
27.5	10'	Socavación individual en cada tallo del pasto	Socavación individual en cada tallo del pasto			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
	30'	inicio de erosión de las paredes superiores de las geoceldas	pasto del sector central e izquierdo presenta debilitamiento en hojas.				
	60'	inicio de erosión de las paredes superiores de las geoceldas	Regueros y pequeños surcos en algunas de las juntas de los cespedones				
35	10	Parte central y superior de las geoceldas erosionadas en mayor cuantía, se logran observar pequeños huecos	Formación de surcos en algunas juntas ubicadas entre cespedones				
	30	Raíces de los estolones que han quedado expuestas. No se ha observado pérdida de tallos ni estolones	Parte del cespedón volteado, originándose la falla de la cobertura, a 28 minutos de prueba.				
	60	Se observa las raíces de algunos estolones y algunos rizomas que han sido expuestos en la pared inferior del talud					

5.3.4 Predicción de la profundidad de erosión

Tanto para la fase I y II se ajustaron los datos con las ecuaciones dadas por Temple (1987), debido a que son las únicas que toman cuenta los efectos que la vegetación ejerce sobre el esfuerzo efectivo y por ende en la erosión.

De las ecuaciones dadas en el ítem 3.3.1 se tiene:

$$\Delta E_N = \kappa \sum_{i=1}^N \tau_i^a \Delta t_i \dots\dots\dots (3-8)$$

Donde las constantes desconocidas: "K" factor de erosionabilidad y el factor "a" de la cobertura vegetal son halladas del sistema de ecuaciones (α) tal y como se describió en el ítem 3.3.1:

$$(\alpha) \begin{cases} \Delta E_1 = \kappa \tau_1^a \Delta t_1 \\ \Delta E_2 = \kappa (\tau_1^a \Delta t_1 + \tau_2^a \Delta t_2) \\ \vdots \\ \Delta E_N = \kappa (\tau_1^a \Delta t_1 + \dots + \tau_N^a \Delta t_N) \end{cases}$$

Obteniéndose los valores de "K" y "a" tal y como se muestran en la TABLA (5-27):

TABLA 5-27 Valores de la constante "K" de erosionabilidad del suelo y el factor "a" de la cobertura vegetal.

Fase I (Kikuyo con Geoweb)		Fase II (Kikuyo)	
K	a	K	a
(m/h)		(m/h)	
0.005432161	-0.157254	0.004356	-0.02619

Conocidas las constantes "K" y "a" se calcula la profundidad de erosión acumulada para cada prueba utilizando la ecuación (3-8), contrastándola con la profundidad de erosión hallada en campo como se muestra en el TABLA 5-28.

TABLA 5-28. Profundidades de erosión calculadas con las ecuaciones de Temple (ΔE_N calculado) y halladas en el laboratorio (ΔE_N de laboratorio), tanto para la fase I y II.

Profundidad de erosión (ΔEN)				
Tiempo de prueba (minutos)	Fase I		Fase II	
	ΔEN calculado (m)	ΔEN de laboratorio (m)	ΔEN calculado (m)	ΔEN de laboratorio (m)
0	0	0	0	0
10	0.0013	0.0035	0.0008	0.0024
40	0.0053	0.0073	0.0031	0.005
100	0.0131	0.0115	0.0077	0.0109
110	0.0143	0.0148	0.0085	0.0132
140	0.0179	0.0173	0.0108	0.015
200	0.0248	0.019	0.0153	0.0162
210	0.0259	0.0212	0.016	0.0174
240	0.0288	0.0245	0.0183	0.019
300	0.0347	0.0267	0.0227	0.0199
310	0.0356	0.0284	0.0234	0.0206
340	0.0381	0.0303	0.0256	0.0219
400	0.0431	0.0336	0.03	0.0236
410	0.0438	0.0354	0.0307	0.026
440	0.046	0.0375	0.0328	0.0281
500	0.0502	0.0414	0.0371	0.0312
510	0.0509	0.0431	0.0378	0.0329
540	0.0528	0.0445	0.0399	0.0353
600	0.0564	0.0461	Talud Falló	Talud Falló

De donde para hallar la bondad de ajuste se realizarán los gráficos de ΔEN de laboratorio Vs. ΔEN calculado, obteniéndose las FIGURAS 5-11 y 5-12, siendo la bondad de ajuste mostrada en la TABLA 5-29.

FIGURA 5-11 Gráfica de la erosión experimental Vs la erosión calculada para la fase I

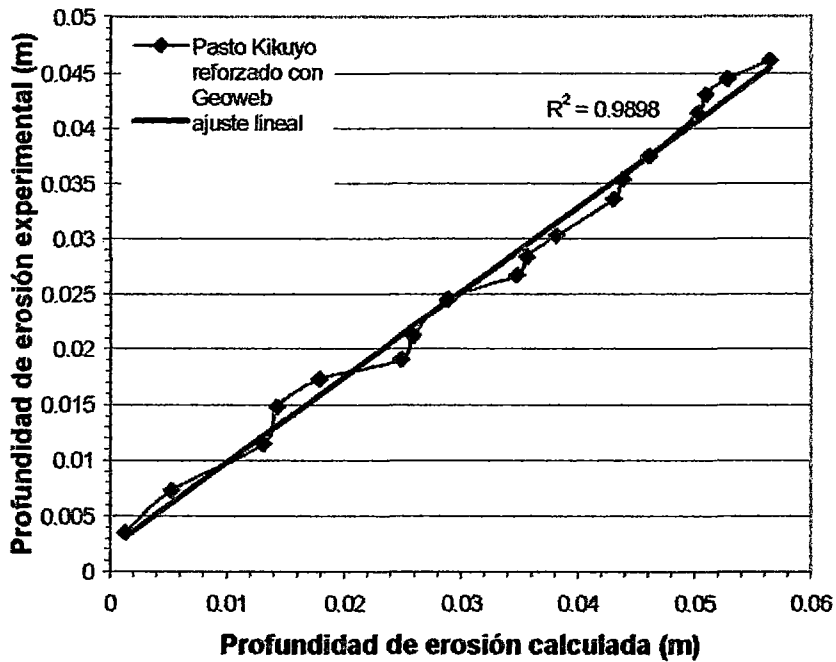


FIGURA 5-12 Gráfica de la erosión experimental Vs la erosión calculada para la fase II.

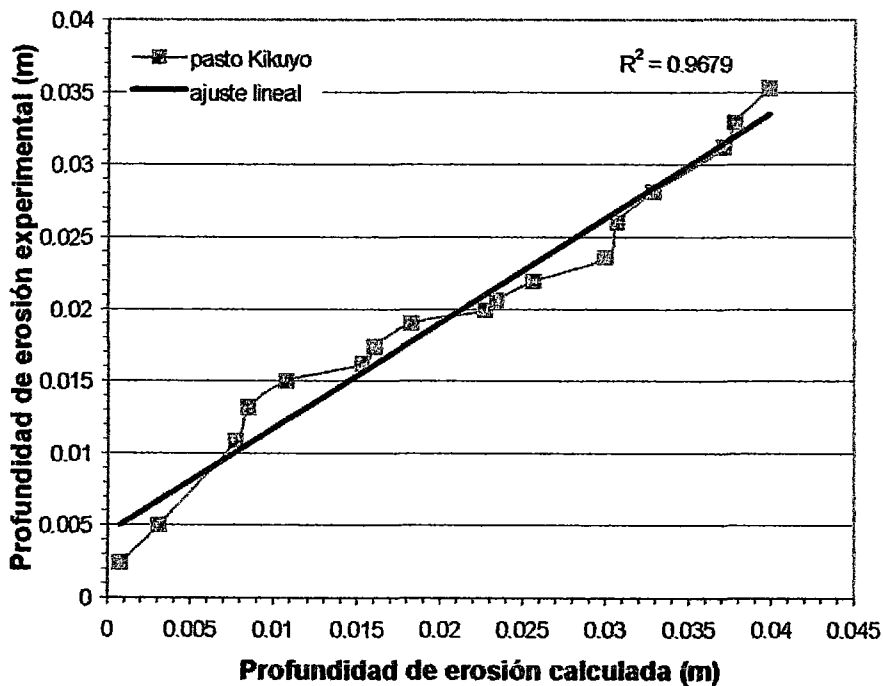


TABLA 5-29 Resumen de resultados según la bondad de ajuste

Protección	Ecuación de Temple
Pasto Kikuyo	0.99 Buen ajuste
Pasto Kikuyo reforzado con Geoweb	0.98 Buen ajuste

De todo esto se puede decir que las ecuaciones dadas por Temple son muy útiles para la predicción de la erosión en esta clase de coberturas, ya sean de pasto Kikuyo o pasto Kikuyo reforzado con Geoweb.

CAPITULO 6.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta parte de la tesis se realiza un resumen de los resultados de esta investigación y de los aspectos asimilados durante y después de realizar la tesis. En la parte final se explican los posibles aspectos que se podrían mejorar o implementar en esta investigación con la finalidad de ampliarla.

6.1 CONCLUSIONES

Es importante señalar que las conclusiones dadas a continuación están basadas en 18 pruebas para cada fase (I y II), en las cuales se varió los caudales unitarios de 5 l/s/m a 35 l/s/m y con tiempos de prueba de 10, 30 y 60 minutos para cada caudal, el suelo utilizado fue una arcilla limosa de baja plasticidad (CL-ML), siendo las coberturas de parto Kikuyo ($M = 878$ tallos/m² y $h = 0.2$ m) y de pasto Kikuyo reforzado con Geoweb ($M = 896$ tallos/m² y $h = 0.25$ m).

- La erosionabilidad tanto para la cobertura de pasto Kikuyo como para la cobertura de pasto Kikuyo reforzado con Geoweb, tiene la tendencia a disminuir conforme va transcurriendo el tiempo para un mismo caudal y conforme se va aumentando la carga hidráulica, de lo cual se concluye que la erosionabilidad de un terraplén de suelo recubierto con pasto Kikuyo o con Kikuyo reforzado con Geoweb, no depende de propiedades del suelo tales como gradación y plasticidad, sino también de otros factores como densidad y estructura del suelo, siendo este último factor el que denota este comportamiento menos erosionable a mayor profundidad del suelo, debido a la presencia de raíces y rizomas (tallos subterráneos), que hacen que el suelo sea más resistente a mayor profundidad del erosión, hasta donde se encuentren principalmente rizomas, que en el caso del pasto Kikuyo es hasta una profundidad aproximadamente de 10 cm, además cabe resaltar que la condición más erosionable de la superficie de la capa protectora de espesor aproximado 1-2 cm es la presencia de material orgánico suelto, lo cual no es motivo de debilidad de la cobertura por ser de carácter superficial.
- A pesar que la profundidad de erosión total para la cobertura de pasto Kikuyo reforzada con Geoweb ($\Delta E_n = 0.0445$ m) fue mayor que para la cobertura de pasto Kikuyo ($\Delta E_n = 0.0353$ m), ambas para un tiempo de prueba de 540 minutos; se concluye que la cobertura de pasto Kikuyo con Geoweb fue más efectiva que la cobertura de pasto Kikuyo para el control de la erosión hídrica, en el sentido en que está no falló y se mantuvo hasta el final de las pruebas, caso contrario a la cobertura de pasto Kikuyo, la cual falló en la prueba II-17 a una velocidad = 2.81 m/s y esfuerzo efectivo para el área de falla = 305 Pa, después de 538 minutos de pruebas; la falla se

manifestó con el desprendimiento de un sector de cespedón debido a las fuerzas hidrodinámicas que se acentúan en flujos supercríticos y ante la presencia de singularidades, cabe resaltar que si se hubieran realizado pruebas adicionales después de 538 minutos en el talud que fallo, el efecto de la erosión y de la falla hubiera sido mas marcado. Además se puede agregar que la cobertura de Geoweb por sí sola no controla directamente la erosión, debido a las paredes de las geoceldas que hacen que se genere mayor turbulencia y por lo tanto mayor arrastre de partículas del suelo (sobre todo en flujos supercríticos), la verdadera función del Geoweb es la de confinar el terreno, raíces y rizomas del pasto Kikuyo, generándose un compuesto que a la larga es mas durable y estable en comparación a la cobertura de pasto Kikuyo sin reforzar, otra de las ventajas de la cobertura de Geoweb es que esta confina cualquier falla o erosión dada en el talud ya sean en surcos, cárcavas, grietas o cualquier zona de debilidad; evitando que se desarrollen o progresen aguas arriba o abajo según sea el caso.

- La protección del pasto Kikuyo es aproximadamente hasta una profundidad de 10 cm. sector en el que se encuentran los estolones, raíces y rizomas (tallos subterráneos), a mayor profundidad se presentan las raíces, las cuales no presentan una estructura fuerte a pesar de su alta tasa de crecimiento en profundidad, lo que se observo en la falla del talud de cobertura de pasto Kikuyo (Fase II), donde el cespedón en su mayor parte conformado por estolones y rizomas de pasto Kikuyo fue volteado y expuesto al flujo, debido a que las raíces no soportaron la alta carga hidrodinámica ejercida sobre éstas.
- En flujos supercríticos, que se dieron en 24 de las 36 pruebas, se debe tener especial cuidado con la rigidez del tallo del pasto o material vegetal, debido a que en sectores en donde el pasto Kikuyo se dobló el flujo fue mucho más veloz que en aquellos en donde no se dobló, condicionando la mayor erosión del suelo, de lo anteriormente descrito se recomienda el uso de especies de pastos que sean rígidos en el tallo para evitar que se flexionen y así evitar los flujos localizados que incrementan la erosión.

Con respecto al comportamiento de la cobertura del pasto Kikuyo reforzado con Geoweb se obtuvo las siguientes conclusiones:

- La adición de geoceldas a la cobertura de pasto Kikuyo (Fase I) incrementó ligeramente la rugosidad hidráulica que para el caso de la cobertura de pasto Kikuyo (Fase II), lo que nos hace concluir que se puede obviar la adición de Geoweb para el cálculo la rugosidad hidráulica por ser la variación del orden del 0 al 6%, lo anteriormente dicho es importante debido a que la rugosidad hidráulica afecta el esfuerzo efectivo y consecuentemente la erosión. Además se probó la validez de las fórmulas para el cálculo del “n” de Manning dadas por Temple, donde se toma el efecto del caudal unitario (q) y de la vegetación expresada en dos parámetros (H, M); en contraposición a lo dado por Gray y Sotir que muestra un “n” de Manning igual a 0.02 constante para pendientes mayores a 1/3.
- Las geoceldas o el Geoweb ayudan a incrementar la tasa de crecimiento de las plantas debido al incremento de la humedad, esto se ve reflejado de acuerdo a la especie y método de siembra, ya sea en tasa de crecimiento del tallo, raíz; densidad de raíces, tallos y resistencia de tallos y raíces. En esta investigación la presencia de Geoweb acrecentó la **“tasa de crecimiento del tallo”** del pasto Kikuyo siendo este de 2.1 cm/día y 1.4 cm/día para la cobertura sin Geoweb, en cambio la **“densidad de tallos”** por unidad de área se mantuvo casi constante siendo esta igual a 878 tallos/m² para la cobertura de pasto Kikuyo y 896 tallos/m² para el pasto Kikuyo reforzado con Geoweb. En la investigación realizada por De la Cruz (2005), con pasto Tanzania también se tuvo una **“tasa de crecimiento de tallo”** mayor para la cobertura de pasto con Geoweb (0.6 cm/día) que sin este (0.5 cm/día) y a la vez se obtuvo una **“densidad de tallos”** mayor siendo esta igual a 4050 tallos/m² y 2814 tallos/m² para la cobertura de Geoweb y sin esta respectivamente. De donde es imperiosa la necesidad de saber, el desempeño de cada especie ante la adición de geosintéticos o algún otro material inerte que entre en conjunción con las plantas.

- El desempeño del refuerzo de Geoweb para el control de erosión hídrica en una cobertura de pasto dada, es variable según la especie de pasto utilizada y en todo caso por el material que se emplace en cada geocelda sea este un material inerte o vegetal; en el caso de pasto Kikuyo, la adición del refuerzo de Geoweb ocasiona una mayor tasa de erosión que en la cobertura de solo Kikuyo, este debido a las singularidades expresadas en las paredes de las geoceldas y a que la densidad de tallos fue la misma para la cobertura de pasto Kikuyo reforzado con Geoweb y sin reforzar; en el caso del pasto Tanzania la adición de Geoweb a la cobertura de pasto Tanzania disminuye la tasa de erosión en comparación a la cobertura de solo Tanzania, y esto se debe a una mayor densidad de pasto, la cual fue casi el doble, lo que originó que la cobertura sea más densa y eficaz, minimizando los efectos de las paredes de las geoceldas. De lo dicho anteriormente se realza la necesidad de determinar el comportamiento de cada especie de pasto en conjunción con cada geosintético y/o material inerte.

Con respecto a las Técnicas de implantación se tiene la siguiente conclusión:

- La importancia de la técnica de implantación de la especie, influye el desempeño de la cobertura ante el proceso de erosión hídrica. La técnica de implantación mediante cespedones de Kikuyo tiene sus ventajas y desventajas las cuales son dadas a continuación:
 - Debido a que en el momento de la instalación del cespedón este ya posee pasto desarrollado, esta cobertura no necesita de cuidados especiales y ya puede ser sometida a flujos subcríticos momentos después de su instalación, esta ventaja no puede ser lograda para situaciones en las que se siembra mediante semillas y estolones, donde un posible flujo eventual podría destruir la capa vegetal.
 - En contraparte se debe tener especial consideración en caso en que esta cobertura este sujeta a flujos supercríticos, que aumenten la erosión sobre todo en zonas de debilidad o zonas que presenten singularidades, esto pudo ser observado en el proceso de falla de la cobertura de pasto

Kikuyo, que tuvo su génesis en las zonas de debilidad ubicadas entre cespedón y cespedón, y entre el cespedón con la superficie del talud sin revestir.

- Para evitar las zonas de debilidad debidas a la técnica implantación por cespedones, se logra una mejor cobertura utilizando la implantación mediante semillas o estolones, a pesar que tiene un desarrollo lento en cubrir todo el talud en comparación al pasto implantado por cespedones, a largo plazo es mucho mas durable debido a que en esta cobertura no se tienen las zonas de debilidad ubicadas en las juntas de los cespedones.
- Una zona potencial de falla existe entre la base del manto suelo raíz particularmente si hay algún vacío o fisura presente, en el caso del Kikuyo implantado con cespedones esta zona potencial esta ubicada entre las juntas de los cespedones y la base del cespedón y el suelo sin revestir. Ante la adición de Geoweb esta zona potencia de falla queda confinada, suprimiéndola y logrando un mejor desempeño.

De los cuadros comparativos con el suelo desnudo y el pasto Tanzania se probó la efectividad del pasto Kikuyo como herramienta para el control de la erosión hídrica. Además se recomienda el uso de pasto Kikuyo como herramienta el control de erosión hídrica, debido a que está difundido por la sierra de nuestro país y es mas barato de manejar y mantener dentro de esta zona, en comparación a otros pastos foráneos y materiales convencionales, además que no afecta el ecosistema reinante de la zona. No se aconseja el uso de cobertura de pasto Kikuyo implantada mediante cespedones en canales con flujo supercrítico con periodo prolongado de exposición al flujo, debido a las posibles fallas que pueda presentar esta, producto de las singularidades presentes, por lo que se recomienda que la cobertura de pasto sea sembrada mediante semillas o estolones, a pesar de que la implantación de esta manera sea más lenta. En coberturas en las que existe la posibilidad de formación de surcos o cárcavas, es recomendable la instalación de Geoweb para evitar la progresión y desarrollo de estas, y consecuentemente evitar la concentración de flujo que a la larga puede ser fatal para la estabilidad de la cobertura.

6.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuras investigaciones, realizar pruebas aumentando el tiempo de prueba para evaluar los efectos de estas en cobertura de pasto Kikuyo para tener un mayor margen de datos.
- Se recomienda realizar mayor cantidad de investigaciones variando parámetros tales como la técnica de bioingeniería, biotecnología, la pendiente del talud, el tipo de suelo y el agente erosivo, el cual podría ser el impacto de las gotas de lluvia.
- Implementar sistemas de medición de resistencia de suelos con raíces, en plantas utilizadas para el control de la erosión para así determinar la resistencia a diversas profundidades de las raíces de plantas nativas y hallar el aporte que estas hacen ante las posibles fallas superficiales o deslizamientos superficiales.
- Se deben realizar mayor cantidad de investigaciones sobre los efectos de las fuerzas hidrodinámicas y sus efectos sobre la vegetación sobre todo en flujos supercríticos, así como formular modelos matemáticos para describir esta condición.
- Debido a la variabilidad de la erosionabilidad según el tipo de suelo, estructura y pendiente del terreno, se deben realizar mayor cantidad de investigaciones variando los parámetros antes mencionados y su interacción con diferentes tipos de cobertura, señalando su comportamiento, pues como se observó en esta tesis, cada especie vegetal interacciona de diferente forma con el medio que lo rodea, generándose así diferentes rendimientos de diferentes especies vegetales bajo las mismas condiciones de trabajo.
- En el caso de sembrar pasto Kikuyo mediante la técnica de cespedones se debe tener especial cuidado en las juntas ubicadas entre estos, que son zonas probables de falla de la cobertura., por lo cual se debe tecnificar y

realizar mas investigaciones respecto a las técnicas de sembrado y su ingerencia en el rendimiento de las coberturas en el control de erosión.

- Para futuras investigaciones se deben realizar ensayos en coberturas sembradas con semillas o estolones, para ver la manera de controlar la erosión hídrica producto de la lluvia y de la escorrentía superficial en coberturas que estén recién sembradas, condición que es la más crítica ante la erosión hídrica y la más difícil de controlar en taludes vegetados, ante esto se puede recomendar le uso de mantos biodegradables para cualificar y cuantificar su desempeño en la protección del terreno recién sembrado, debido a que no se conoce muy a fondo su comportamiento. También podría verse la factibilidad del uso de material orgánico para la protección del terreno recién sembrado, en el caso de la sierra podría usarse "Ichu "(paja) cortada, el cual podría servir como manto protector contra el impacto de las gotas de lluvia.
- Si se desea tener un caudal de flujo en los taludes mayor a 70 l/s se recomienda mejorar y modificar las compuertas del modelo, para que este pueda conducir un mayor volumen de agua y así obtenerse condiciones de prueba más críticas

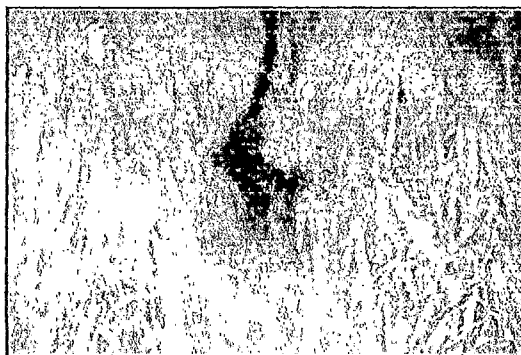
ANEXO A

ANEXO A

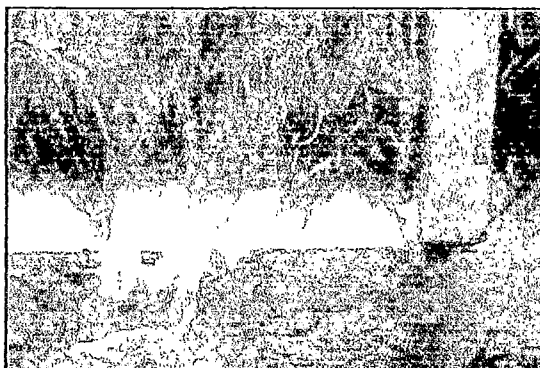
Este anexo comprende la secuencia como se realizaron las mediciones de las velocidades, mostradas de forma visual mediante fotografías.

FOTOGRAFÍAS N.-1 Se tuvo que hacer un acercamiento especial a cada toma para lograr visualizar mejor la caída inicial del permanganato al flujo y luego cuando este pasara por sobre el punto de control final (muro blanco).

(a)



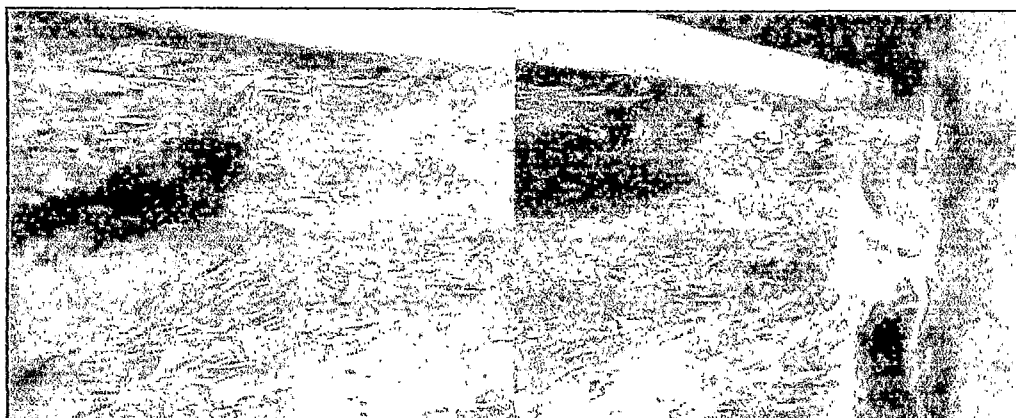
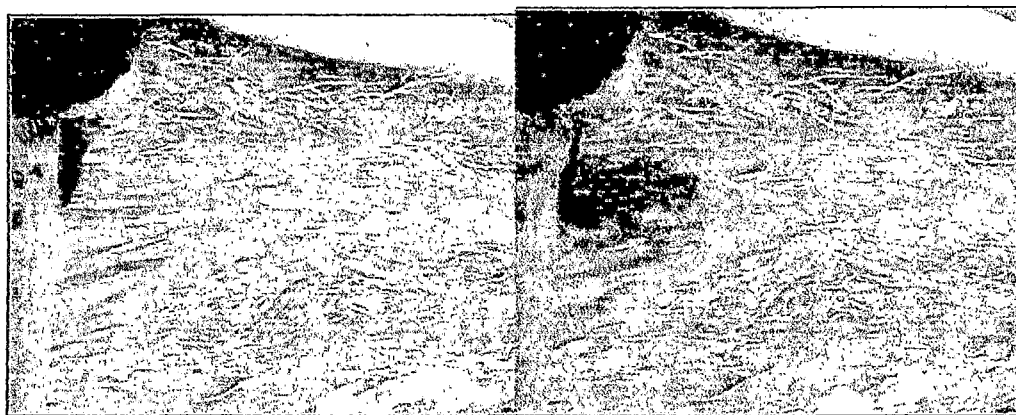
(b)



(c)



FOTOGRAFÍAS N.- 2 Se observa la secuencia como el trazador fluye a través del canal para una prueba con caudal 70 l/s, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo



ANEXO B

FOTOGRAFÍAS N.-3 Se observa la secuencia de la medición de la velocidad en la cual se usaron pelotitas. Se tomo el tiempo desde el momento en que caen las pelotitas al flujo de agua hasta que pasan por el muro blanco al final del talud.

(a)



(b)



(c)



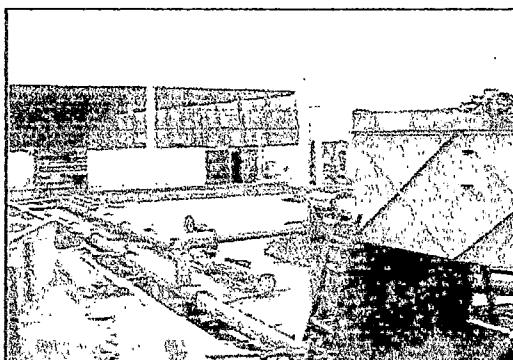
FOTOGRAFÍA N.-4 Se observó que para caudales desde 20 l/s a 55 l/s el pasto se dobla en algunos sectores generando zonas de flujo muy diferenciado, y consecuentemente velocidades, tirantes y erosión diferenciada.



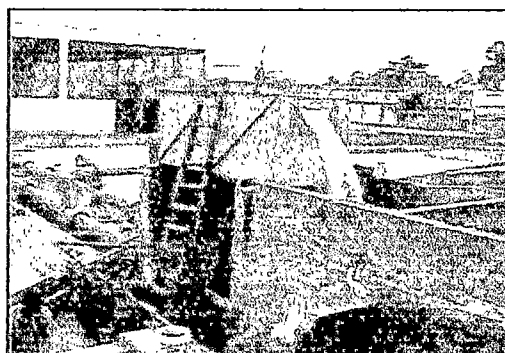
ANEXO B

Comprende la descripción de todas las partes que comprende el modelo.

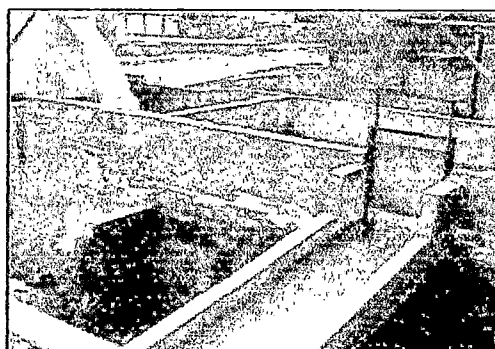
FOTOGRAFÍA B-1 Se observa el LNH en donde se encuentran las bombas que alimentan el tanque elevado de donde proviene la tubería de alimentación al vertedero.



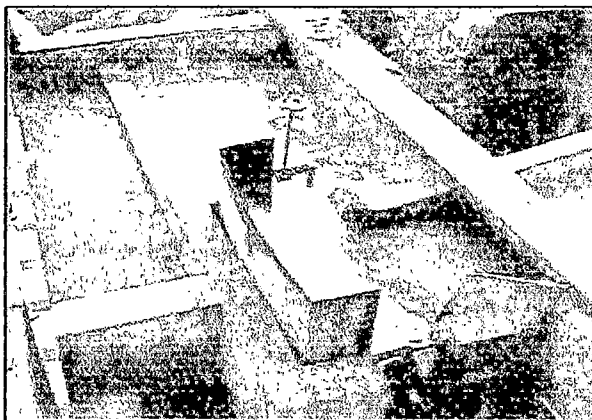
FOTOGRAFÍA B-2 Se observa el vertedero en donde se hicieron trabajos de mantenimiento



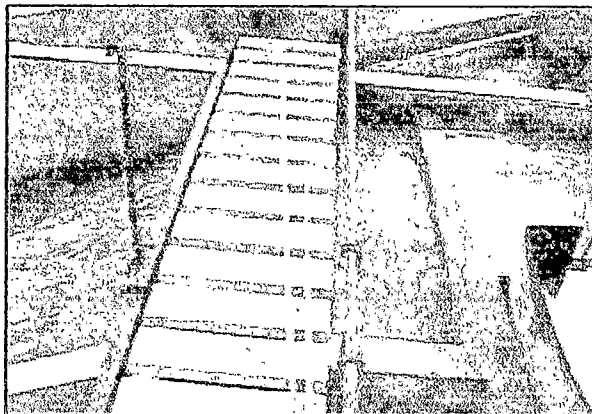
FOTOGRAFÍA B-3 Se observa la poza disipadora de donde sale en canal para alimentar al modelo



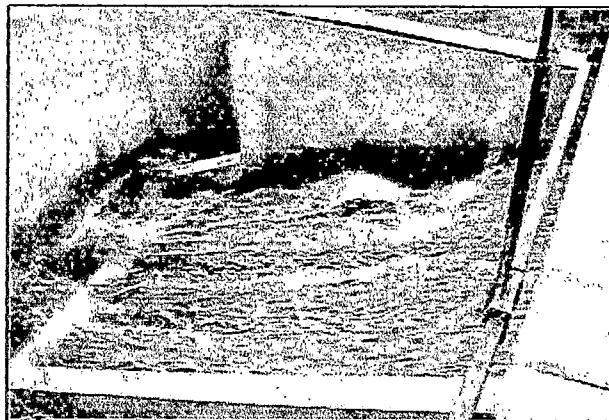
FOTOGRAFÍA B-4 El canal o rápida desemboca en la poza disipadora que contiene dos compuertas para alimentar el terraplén derecho o izquierdo según sea el caso.



FOTOGRAFÍA B-5 Se observa el puente móvil que sirvió para la medición de tirantes.



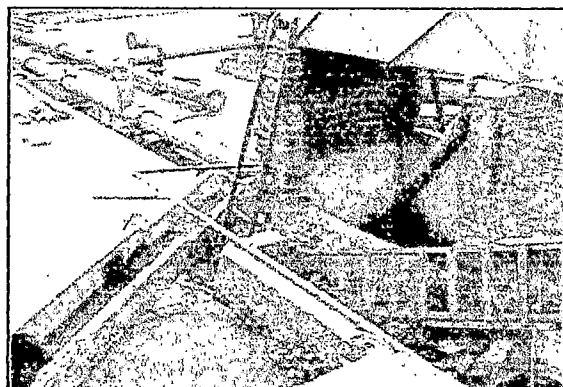
FOTOGRAFÍA B-6 El terraplén en plena prueba.



FOTOGRAFÍA B-7 Se encuentra la poza disipadora y el canal de salida



FOTOGRAFÍA B-8 El canal de salida que desemboca en la red de canales principales del laboratorio para la recirculación del agua.



ANEXO C

ANEXO C

TABLA C-1 Resumen de Especificaciones para el Comportamiento y el Material de los Sistemas Geoweb de la Serie V

	PROPIEDAD	VALOR			METODO DE PRUEBA		
MATERIAL DE BASE	Composición del Material	Poliémero - Polietileno de 0.935 - 0.965 g/cm ³ (58.4 - 60.2 lb/pe 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 -6% +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 sílicea #40 con 100% de densidad relativa no sea menor del 85% del ángulo de fricción máximo de la arena sílicea aislada, ensayado con el método de corte directo bajo norma ASTM D 5321. Las perforaciones reserán 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 (0.76 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 por m ² (yd ²)	Área Referencial ±1%	
			Longitud	Ancho			
		GW20V	75 mm (3 pulg)	224 mm (8.8 pulg)	259 mm (10.2 pulg)	34.6 (28.8)	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 (8.8)	1208 cm ² (187.0 pulg ²)	
	200 mm (8 pulg)						
	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 64°C (130°F). La temperatura ambiente en la habitación se registrá 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 registrá por la norma ASTM E41.						
PROPIEDADES DE LA SECCION	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)				

ANEXO D

ANEXO D

Que consta de un resumen de unos experimentos realizados por la Universidad Católica del Oriente de Colombia en el talud del variante aeropuerto–las palmas (Julio 1996), y de los resultados que se obtuvieron de estos experimentos, a continuación se presentara y detallara lo hecho en la locación antes mencionada.

TALUD VARIANTE AEROPUERTO – LAS PALMAS

Los tratamientos al talud aplicados fueron los siguientes:

- Agrotexil solo
- Agrotexil + semilla de grama con abono
- Agrotexil con semilla de grama sin abono
- Agrotexil + cespedón de kikuyo
- Agrotexil + cespedón de grama
- Biomanto solo
- Biomanto + semilla de grama con abono
- Biomanto + semilla de grama sin abono
- Biomanto + cespedón de kikuyo
- Biomanto + cespedón de grama
- Suelo + semilla de grama con abono
- Suelo + semilla de grama sin abono
- Suelo + cespedón de grama
- Suelo + cespedón de kikuyo
- Suelo desnudo

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El talud donde se instaló el experimento se localiza aproximadamente a un kilómetro después de la glorieta donde se inicia la variante, en dirección Rionegro - Las Palmas, sobre la margen izquierda de la vía. La zona se encuentra a 2.200 msnm con una temperatura de 17 a 20 °C y corresponde a un bosque húmedo montano bajo (bh-MB) según la clasificación de Holdridge. Este

talud está conformado por taludes escalonados con subniveles que conforman terrazas. Presenta un área de 1.595 m².

Planimétricamente el talud fue hecho de forma cóncava, lo que favorece su estabilidad. Los niveles de descanso presentan pendiente hacia la pata del talud, lo que permite que las aguas originadas en la parte alta de cada talud, drenen libremente. No se observa deterioro del material por efectos de las lluvias.

ESTRATIGRAFÍA

Se observa un perfil en material saprolítico conformado por una capa de material orgánico delgada en superficie, seguida por una capa delgada de material arcilloso. Hacia profundidad se presenta material limo-arenoso de color rojizo, incrementándose el tamaño de grano hacia profundidad.

Esporádicamente se observan zonas de material rocoso intensamente diaclasado con relleno de fisuras con material limo y limo-arenoso. El material es de origen ígneo de color moteado con minerales claros y oscuros. Localmente se observan bandas de origen metamórfico.

CARACTERÍSTICAS

Talud inferior:

Tiene una pendiente promedio de 72%. Se observa buena disposición del material. El nivel de descanso encima de este talud, presenta una pendiente de 10% hacia la pata del talud intermedio con el fin de facilitar la libre circulación del agua lluvia.

Talud intermedio:

Presenta una pendiente promedio de 158%. El nivel de descanso encima de este talud tiene una pendiente del 4% hacia la pata del talud superior, permitiendo la libre circulación de las aguas lluvias y de escorrentía originadas en el talud superior.

Talud superior:

Tiene una pendiente promedio de 160%. La corona del talud se encuentra con pasto y arborización en los alrededores.

EVALUACIÓN CUANTITATIVA

Pendiente entre 72% y 160%. Las mediciones de cobertura se presentan hasta noviembre, a partir de diciembre ésta no varió. LA TABLA C-1, 2, 3 y 4 y las FOTOGRAFÍAS C-1, C-2 y C-3 presentan el porcentaje de cobertura para cada uno de los tratamientos en las cuatro repeticiones.

TABLA C-1 Porcentaje de cobertura para cada tratamiento para cuatro sectores y por cada mes.

Tratamiento (datos en porcentaje)					
Agromantos	Cobertura	Agosto			
		S1	S2	S3	S4
Agrotexil	Solo	0	0	0	0
	Semilla de grama + abono	50	40	50	40
	Semilla de grama sin abono	2	2	2	2
	Cespedón de kikuyo	100	100	100	100
	Cespedón de grama	100	100	100	100
Biomanto	Solo	0	0	0	0
	Semilla de grama + abono	20	25	25	30
	Semilla de grama sin abono	10	10	5	15
	Cespedón de kikuyo	100	100	100	100

TABLA C-2 Porcentaje de cobertura para cada tratamiento para cuatro sectores y por cada mes.

Tratamiento (datos en porcentaje)					
Agromantos	Cobertura	Septiembre			
		S1	S2	S3	S4
Agrotexil	Solo	0	0	0	0
	Semilla de grama + abono	100	100	90	90
	Semilla de grama sin abono	90	70	70	90
	Cespedón de kikuyo	85	80	90	85
	Cespedón de grama	100	95	95	82
Biomanto	Solo	0	0	0	0
	Semilla de grama + abono	85	90	90	55
	Semilla de grama sin abono	90	75	80	55
	Cespedón de kikuyo	100	95	80	53

TABLA C-3 Porcentaje de cobertura para cada tratamiento para cuatro sectores y por cada mes.

Tratamiento (datos en porcentaje)					
Agromantos	Cobertura	Octubre			
		S1	S2	S3	S4
Agrotexil	Solo	0	0	0	0
	Semilla de grama + abono	100	100	100	92
	Semilla de grama sin abono	90	90	60	80
	Cespedón de kikuyo	70	75	65	70
	Cespedón de grama	90	80	70	80
Biomanto	Solo	0	0	0	0
	Semilla de grama + abono	80	70	80	90
	Semilla de grama sin abono	75	70	65	70
	Cespedón de kikuyo	75	-		

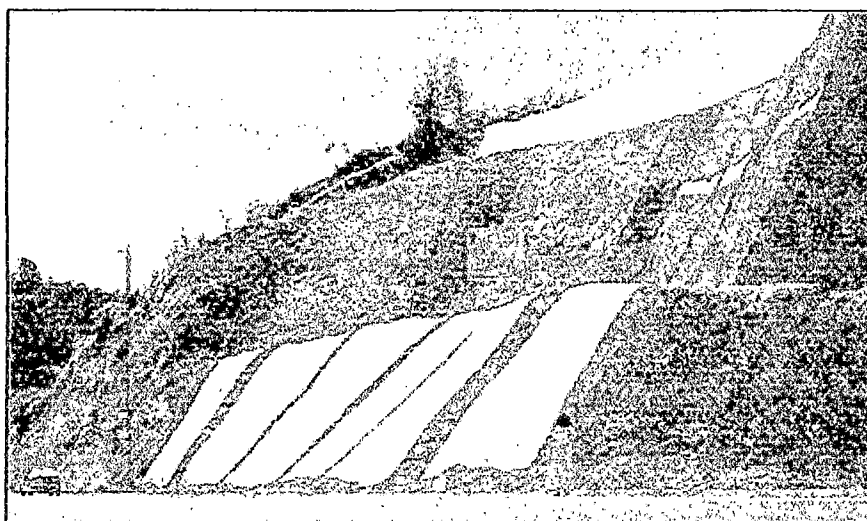
TABLA C-4 Porcentaje de cobertura para cada tratamiento para cuatro sectores y por cada mes.

Tratamiento (datos en porcentaje)					
Agromantos	Cobertura	Noviembre			
		S1	S2	S3	S4
Agrotexil	Solo	0	0	0	0
	Semilla de grama + abono	100	90	80	90
	Semilla de grama sin abono	70	65	70	75
	Cespedón de kikuyo	60	50	45	45
	Cespedón de grama	80	60	65	83
Biomanto	Solo	0	0	0	0
	Semilla de grama + abono	60	55	55	30
	Semilla de grama sin abono	60	50	50	60
	Cespedón de kikuyo				

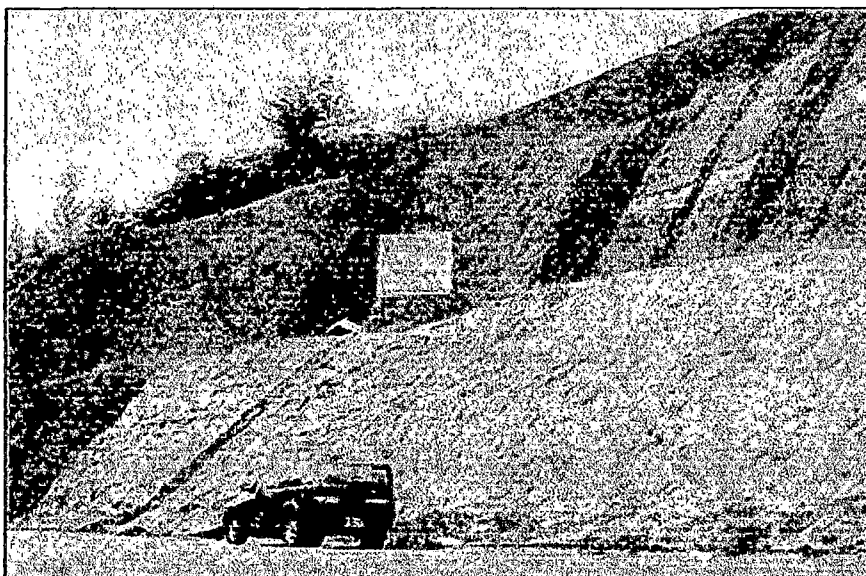
FOTOGRAFÍA C-1 Se observa el talud antes de ser tratado



FOTOGRAFÍA C-2 Se observa la instalación de los agrotexiles y los biomantos.



FOTOGRAFÍA C-3 Se observa el sector sembrado con agromanto y biomanto con los cespedones de Kikuyo empiezan tornarse amarillentos en contraposición a los sectores que fueron sembrados con semilla, de lo que en el cuerpo de la tesis se optó por no usar Macmat por ser este de la misma naturaleza que de los agromantos y biomantos



ANEXO E

ANEXO E

En este anexo se presentan los análisis que se realizaron al suelo utilizado en esta investigación.

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACIÓN ASTM-D422

Diámetro Corregido	(%) 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
Arcillas y coloide (%)	:	11.7
Arenas (%)	:	37.3

LÍMITES DE CONSISTENCIA

LL	:	21.5
LP	:	16.5
IP	:	5

ANEXO F

ANEXO F

TABLA F-1 Tirantes para la fase I, hallados a partir de la diferencia entre la cota de la superficie del agua y de la superficie del terreno.

		Q=10 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	116.6	118.5	116.9	116.5	115.9	114.9	113	112.9	115	114.6	113.6	114	114	112.3	111.3	113.3	111.5
	B	126.1	124.5	125.5	122.9	121.4	121.2	121.6	122.3	122.5	122	121.9	120.9	120.9	122.1	120.3	121.2	121.9
	H	171.5	167.4	169.5	171.1	168	168.8	167.2	165.5	164.5	164.2	163.2	164.9	163.2	165.4	164.5	164.8	166.9
	M	212.1	210.1	208.2	207.9	206.8	206.2	208.1	205.9	203.4	203.6	205.4	207.2	209	208	210.1	207.3	206.7
h agua	A	113.4	115.8	114.3	113.6	112.8	111.7	109.4	110.2	111.6	111	109.6	109.5	110.5	110.1	108.5	110.3	108.4
	B	122.7	121.7	122.5	119.8	118.4	118.1	118.2	119.3	119.2	118.6	118.1	116.7	117.8	119.5	117.7	118.1	118.7
	H	168.3	164.5	166.3	168.1	164.8	165.6	163.6	162.3	161.7	160.7	159	161.3	159.6	162.4	162.1	162.3	164.1
	M	209.3	206.5	203.7	203.9	203.2	202.8	205.3	202.9	200.1	200.2	201.9	204.3	205.6	205.2	207.2	204.3	203.6
tirantes	A	3.2	2.7	2.6	2.9	3.1	3.2	3.6	2.7	3.4	3.6	4	4.5	3.5	2.2	2.8	3	3.1
	B	3.4	2.8	3	3.1	3	3.1	3.4	3	3.3	3.4	3.8	4.2	3.1	2.6	2.6	3.1	3.2
	H	3.2	2.9	3.2	3	3.2	3.2	3.6	3.2	2.8	3.5	4.2	3.6	3.6	3	2.4	2.5	2.8
	M	2.8	3.6	4.5	4	3.6	3.4	2.8	3	3.3	3.4	3.5	2.9	3.4	2.8	2.9	3	3.1
		Q=20 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	117.1	118.5	118	115.6	116.5	116.3	113.1	114.6	115	115.1	113.5	114.5	115.4	113	112.7	113.9	112.2
	B	127.3	125.8	127.4	124.6	124.3	124.2	124.3	124.5	122.5	124.2	125.3	121.9	123.2	122.6	120.8	122.2	121
	H	170.6	167.5	168.1	170	170.3	167.6	166.7	165.8	165.1	164.9	163.8	163.9	163	163.6	164.1	164.1	166.6
	M	214.2	211	208	209.7	207.1	207.8	209.6	209.2	203.9	205.5	207.8	208.2	208.5	209.1	211	207	206.4
h agua	A	111.9	112.7	111.8	110.5	111	112.7	108.7	108.3	109.5	109.7	107.8	108.4	108.8	106.9	106.8	109.3	108.7
	B	121.9	120.1	121.5	119	120.2	120	119.7	118.5	116.4	118.6	119.6	116.5	117.3	116.6	115	116.5	116.1
	H	164.5	162	162.7	165.6	165.2	162.7	161	159.8	160.1	159.2	158.8	158.3	157.9	158.4	160	158.5	160.7
	M	208.7	205	202.8	204.2	201.5	202.7	204.8	204.6	198.9	201	202.3	202.4	202.4	203.3	205.9	202.2	201.8
tirantes	A	5.2	5.8	6.2	5.1	5.5	3.6	4.4	6.3	5.5	5.4	5.7	6.1	6.6	6.1	5.9	4.6	3.5
	B	5.4	5.7	5.9	5.6	4.1	4.2	4.6	6	6.1	5.6	5.7	5.4	5.9	6	5.8	5.7	4.9
	H	6.1	5.5	5.4	4.4	5.1	4.9	5.7	6	5	5.7	5	5.6	5.1	5.2	4.1	5.6	5.9
	M	5.5	6	5.2	5.5	5.6	5.1	4.8	4.6	5	4.5	5.5	5.8	6.1	5.8	5.1	4.8	4.6

TABLA F-2 Tirantes para la fase I, hallados a partir de la diferencia entre la cota de la superficie del agua y de la superficie del terreno.

		Q=30 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	107.8	107.8	110.6	109	107	108.9	107	106.3	106.4	107	106.8	105.4	107.6	105.8	104.1	105.1	105.4
	B	118.5	118.3	119.1	116.6	114.5	114.2	114.5	116	113	116.3	119.3	114.4	115	114.5	114.4	114.3	112
	H	163.1	160.2	158.8	162	159.2	159.5	156.5	157.8	156.6	156.1	156	156.3	154.8	155.8	154.8	156.3	156.8
	M	210.5	202.6	201.1	203.8	198.5	198.2	196	206.1	197.7	197.4	205	204.1	209	204.6	206.1	201.2	201.5
h agua	A	100	100.4	102.1	100.9	102.7	101.2	98.4	100.9	98.2	98.2	100.1	100.5	100.5	100	100.8	98.5	98.5
	B	111	111.8	112.1	109	109.5	106.4	107	111.5	106	108.8	111.5	108.6	107	108	109.8	108.5	104.2
	H	156.8	155.1	152.8	155.2	151.4	153.1	150	151	149.1	149.6	148.4	149.8	147.4	149	147.9	149.5	148.9
	M	203.6	194.8	193.6	197.4	190.5	192.4	188.5	199.3	190.9	191.6	197.7	197	202.2	196.7	200.4	194.3	195.5
tirantes	A	7.8	7.45	8.5	8.1	4.3	7.7	8.6	5.4	8.2	8.8	6.7	4.9	7.1	5.8	3.34	6.6	6.9
	B	7.5	6.5	7	7.6	5	7.8	7.5	4.5	7	7.5	7.8	5.8	8	6.5	4.6	5.8	7.8
	H	6.3	5.1	6	6.8	7.8	6.4	6.5	6.8	7.5	6.5	7.6	6.5	7.4	6.8	6.9	6.8	7.9
	M	6.9	7.8	7.5	6.4	8	5.8	7.5	6.8	6.8	5.8	7.3	7.1	6.8	7.9	5.7	6.9	6
		Q=40 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	108.2	111	110	109.9	108.5	108.6	106.9	105.5	107.5	108	107	108	109.1	106.7	108.5	106	105.6
	B	118.8	118.6	119.8	118	114.9	115.8	115.5	116.8	113.7	117.1	120.2	114.4	115.5	114.8	115.4	115.2	112.2
	F	147.5	150.4	149.2	145.9	146.7	146.6	145.3	149.8	143	143.2	143.2	144.9	142.6	142.7	142.5	145.6	144.8
	L	195	189.8	189	190.2	189.9	187	186.6	191.4	189.3	188.8	188.5	192.2	192.4	189.6	191.1	191.2	190.2
h agua	A	101	99.1	101.3	101.6	101.5	100.7	98.9	96.4	97.2	98.2	99.6	102.5	100.5	97.5	97.9	97.4	98.3
	B	110.6	109.7	112.9	108.8	106.3	106.9	106.5	108.2	106.1	109.2	110.4	105.8	106.7	105.8	107	107.4	102.8
	F	139.5	140.6	139.2	139.2	139.1	137.9	135.6	138.3	135.2	136.2	136.1	136.4	134	133.9	133	135.9	136.1
	L	183.6	182.6	181.9	182.3	180.4	180.1	180	181	180.5	180.2	181.3	182	182.5	181	181.6	183.5	184.8
tirantes	A	7.2	11.9	8.7	8.3	7	7.9	8	9.1	10.3	9.8	7.4	5.5	8.6	9.2	10.6	8.6	7.3
	B	8.2	8.9	6.9	9.2	8.6	8.9	9	8.6	7.6	7.9	9.8	8.6	8.8	9	8.4	7.8	9.4
	F	8	9.8	10	6.7	7.6	8.7	9.7	11.5	7.8	7	7.1	8.5	8.6	8.8	9.5	9.7	8.7
	L	11.4	7.2	7.1	7.9	9.5	6.9	6.6	10.4	8.8	8.4	7.2	10.2	9.9	8.6	9.5	7.7	5.4

TABLA F-3 Tirantes para la fase I, hallados a partir de la diferencia entre la cota de la superficie del agua y de la superficie del terreno.

		Q=55 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	106.6	107.6	107.2	106	107.5	108.7	106.9	104.1	104.9	109.2	105.9	108.1	108.1	105	103.5	104.8	101.6
	B	117.5	117	118.2	113.8	113.4	113.9	114	116.6	112	115.8	112.8	113.7	114.6	111.8	113.2	112.2	111
	C	128.3	124.4	124.9	129	122.7	122	125.1	124.4	121.6	122.7	122.2	120	120.5	120.4	122.6	117.7	119.3
	H	160.5	157.5	159.2	157.5	156.5	159	156.6	154.5	154.6	153.5	154.4	156.4	153.5	154	154.8	155.2	155.8
h agua	A	100.7	98.4	100	98.6	100.3	100.1	97.9	96.4	95.3	94.3	99.1	100.7	99.4	95.7	95.6	94.6	92.1
	B	108.8	106.3	106.8	103.6	106.1	105.2	104.9	102.9	104.8	104	105.2	107.3	106.4	103.2	105.6	105.1	103.4
	C	119.8	114.8	114.9	118.9	114.5	112.5	116.7	114.1	113.3	112.4	115.7	114.1	111.6	111.9	113.7	109.3	110.5
	H	150.3	147.9	149.9	150.9	150.5	149.4	148.2	148	146.8	144.5	145.2	145.5	145.7	145.7	145.5	146.2	147.9
tirantes	A	5.9	9.2	7.2	7.4	7.2	8.6	9	7.7	9.6	14.9	6.8	7.4	8.7	9.3	7.9	10.2	9.5
	B	8.7	10.7	11.4	10.2	7.3	8.7	9.1	13.7	7.2	11.8	7.6	6.4	8.2	8.6	7.6	7.1	7.6
	C	8.5	9.6	10	10.1	8.2	9.5	8.4	10.3	8.3	10.3	6.5	5.9	8.9	8.5	8.9	8.4	8.8
	H	10.2	9.6	9.3	6.6	6	9.6	8.4	6.5	7.8	9	9.2	10.9	7.8	8.3	9.3	9	7.9
		Q=70 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	106.6	108.7	107.8	106.4	108.3	109.5	106.7	104.5	104.6	109.4	106.5	108.1	108.1	104.9	103.8	105.4	102.1
	B	118.4	117.2	118.8	113.7	113.6	114.3	114.5	116.6	112.1	116.6	113	115.7	114.8	112.2	114.2	112.1	111.1
	C	128.4	124.5	125.5	129.5	123	122.5	125.8	124.7	121.6	123	122.1	120.5	120.5	120.1	122.7	118.1	119.8
	H	161.2	157.5	159.4	158.2	157	160.3	157.2	155	154.4	153.8	154.3	156.7	154	154	155.6	156.3	156.4
h agua	A	99.5	98.2	99.6	99.1	99.4	100	96.5	96.6	96.4	97.2	97.5	99.8	97.5	95.3	97.1	96.6	96.4
	B	109.2	106.6	106.8	105.8	105	103.1	105.6	103.9	105.3	105.8	104.7	105.1	105.5	103.9	104.9	105.6	104.5
	C	115.6	116.9	115	112.8	112.9	110.7	113.5	113.4	114.2	113.9	113.7	112.1	111.8	111.9	112.2	111.1	111.9
	H	150.3	147.9	149.1	149.6	149.2	148.5	146	146.8	146.4	146.5	146.2	145.5	147.7	147.7	145.5	147.2	148
tirantes	A	7.1	10.5	8.2	7.3	8.9	9.5	10.2	7.9	8.2	12.2	9	8.3	10.6	9.6	6.7	8.8	5.7
	B	9.2	10.6	12	7.9	8.6	11.2	8.9	12.7	6.8	10.8	8.3	10.6	9.3	8.3	9.3	6.5	6.6
	C	12.8	7.6	10.5	16.7	10.1	11.8	12.3	11.3	7.4	9.1	8.4	8.4	8.7	8.2	10.5	7	7.9
	H	10.9	9.6	10.3	8.6	7.8	11.8	11.2	8.2	8	7.3	8.1	11.2	6.3	6.3	10.1	9.1	8.4

TABLA F-4 Tirantes para la fase II, hallados a partir de la diferencia entre la cota de la superficie del agua y de la superficie del terreno.

		Q=10 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	106.5	107.9	103.4	104.4	103.9	103.1	102.8	104.1	103.8	105.1	103	106.3	103.8	105.4	104.5	103.6	102.5
	B	112.3	113.3	113	111.5	111.5	110.8	110.7	111.7	111.2	110.9	111	110.6	110.2	110.5	113	110.2	110.4
	H	163.2	160.9	158.6	160	158	156.8	158	159.8	159.6	160.7	158.4	155.9	156.9	155.1	156.1	158.5	156.6
	M	198.7	198.7	198.4	198.1	199.6	198.5	200	198	195.2	196.6	199.3	199	197.8	196.2	195.2	197	199.2
h agua	A	104	103.7	100.8	100.3	100	100.7	101	100.7	100.3	100.4	100.4	101.9	101.2	101.9	102.3	100.9	100
	B	109.5	110.8	110	107.7	107.9	107.5	108.2	108.1	107.4	106.9	108.2	106.8	107.2	107.9	110.6	107.4	107.4
	H	160.2	158	155	157	154.6	154	154.4	156.7	155.6	156.9	155.2	152.3	154.1	152.5	152.3	155.6	153
	M	194.9	194.8	194.9	194.5	196.8	195.5	196.7	194.4	192.4	193.5	196.9	195.7	194.9	193.1	192.1	194	196.1
tirantes	A	2.5	4.2	2.6	4.1	3.9	2.4	1.8	3.4	3.5	4.7	2.6	4.4	2.6	3.5	2.2	2.7	2.5
	B	2.8	2.5	3	3.8	3.6	3.3	2.5	3.6	3.8	4	2.8	3.8	3	2.6	2.4	2.8	3
	H	3	2.9	3.6	3	3.4	2.8	3.6	3.1	4	3.8	3.2	3.6	2.8	2.6	3.8	2.9	2.6
	M	3.8	3.9	3.5	3.6	2.8	3	3.3	3.6	2.8	3.1	2.4	3.3	2.9	3.1	3.1	3	3.1
		Q=20 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	107.8	108.8	108.2	105.2	104.8	104	103.8	106.3	104.5	105.6	104.2	106.6	105.6	105.5	105.7	104	104.5
	B	112.9	114.5	115.8	112.2	113	111.3	111.3	114.3	112.2	112.4	111.8	111.3	111.1	111.1	113.5	110.5	111
	H	163.5	161.4	158.8	160.5	158.6	158	159	160.1	161.1	161.1	160	156.3	157.2	156.5	156.3	159.1	155.9
	M	199.5	199.3	199.4	198.5	201	201.7	201	198.1	195.4	196.9	199.1	199.2	198	197.5	195.6	198	199
h agua	A	102.9	102.7	100.5	100	99	100.8	100.8	100.8	99.1	100.5	99.2	98	99.1	100.8	101.8	100.7	99.8
	B	107.7	108	107.2	107.6	106.9	107.4	106.9	107	106.7	106.5	106	104.8	105.3	105.3	106.7	106.3	107
	H	158.7	155.6	151.7	154.7	152.5	153.8	155.6	154.6	155.7	156	156	149.5	151.5	150.5	150.1	153.3	151.1
	M	194.5	193.5	194.6	192	194	196.3	195.2	193	190	192.3	193.5	195	193.2	192.4	190.2	192	193.5
tirantes	A	4.9	6.1	7.7	5.2	5.8	3.2	3	5.5	5.4	5.1	5	8.6	6.5	4.7	3.9	3.3	4.7
	B	5.2	6.5	8.6	4.6	6.1	3.9	4.4	7.3	5.5	5.9	5.8	6.5	5.8	5.8	6.8	2.2	4
	H	4.8	5.8	7.1	5.8	6.1	4.2	3.4	5.5	5.4	5.1	4	6.8	5.7	6	6.2	5.8	4.8
	M	5	5.8	4.8	6.5	7	5.4	5.8	5.1	5.4	4.6	5.6	4.2	4.8	5.1	5.4	6	5.5

TABLA F-5 Tirantes para la fase II, hallados a partir de la diferencia entre la cota de la superficie del agua y de la superficie del terreno.

		Q=30 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	108.1	109.7	109	105.9	105.8	104.4	104.1	105.7	104.3	105.4	104.6	106.9	105.6	106	105.5	104.5	105.5
	B	113.5	114.5	115.7	113	112.8	111.7	111	114.4	112.2	112.3	111.9	111.9	111.4	110.4	112.9	110.8	111.5
	H	164	162	159.6	161.2	159	160.1	159.3	160.6	161	161.8	159.7	156.3	157.8	156.3	156.4	159.7	157
	M	199.3	199.3	199.6	198.8	201.1	202	201	198.3	195.7	196.9	199.1	199.1	198.7	197.5	195.8	198	199
h agua	A	101.6	101.6	100.5	98.7	98.9	99.4	100	100	99.6	99.3	95	97	98.8	99.5	101	100.8	99.6
	B	106	106	106.4	107.2	104.4	106.3	106	106	105.8	103.2	103.5	102.8	102.6	103	105.6	107.3	106.8
	H	157.2	153.8	151.1	152.6	154.1	152.3	152.5	152.8	153.1	154.3	153.3	147.7	150.7	149.7	149.6	153.7	152.2
	M	192.5	192.7	194	192	193.6	193.2	193.4	191.8	189.9	189.1	192.7	193.6	193.6	190	189.5	191.9	194
tirantes	A	6.5	8.1	8.5	7.2	6.9	5	4.1	5.7	4.7	6.1	9.6	9.9	6.8	6.5	4.5	3.7	5.9
	B	7.5	8.5	9.3	5.8	8.4	5.4	5	8.4	6.4	9.1	8.4	9.1	8.8	7.4	7.3	3.5	4.7
	H	6.8	8.2	8.5	8.6	4.9	7.8	6.8	7.8	7.9	7.5	6.4	8.6	7.1	6.6	6.8	6	4.8
	M	6.8	6.6	5.6	6.8	7.5	8.8	7.6	6.5	5.8	7.8	6.4	5.5	5.1	7.5	6.3	6.1	5
		Q=40 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	108.8	109.5	106.5	105.5	105.8	104.3	104.2	105.6	104.6	105.7	104.5	106.8	105.2	106.1	105.1	104.5	105.2
	B	114.6	115.3	114.4	113	112.8	111.9	111.4	114	111.8	112.4	111.7	111.8	111.3	110.3	113.2	110.7	111.7
	C	121.3	120.9	120.2	120.9	120.6	120.3	121.1	121.9	121.5	122.2	120.7	118	119.6	120.3	122	119.8	119.1
	L	192.6	190.4	190.6	190.2	189.4	191.4	191.7	190.5	192.8	192.1	191.8	190.8	190.4	187.9	188.1	188	188
h agua	A	100.5	99.2	98	97.6	95.4	97.8	97.4	98.9	97.5	97.6	95.4	96	97.1	97.7	96.4	96.6	92.7
	B	106	106.5	104.5	104.6	103	101.4	104.3	103.5	103.2	103	101.7	100.8	102.3	102.3	103.5	104.4	102.2
	C	114.6	114.6	112.3	112.1	111	113.8	114.8	110.5	112.6	111.4	108.9	108.3	109	110	110.9	111.5	110.8
	L	186.1	182.9	182.6	181.6	180.4	183.9	183.1	180.9	184.3	184	181.8	181.2	181.7	178.7	178.1	179.6	179.1
tirantes	A	8.3	10.3	8.5	7.9	10.4	6.5	6.8	6.7	7.1	8.1	9.1	10.8	8.1	8.4	8.7	7.9	12.5
	B	8.6	8.8	9.9	8.4	9.8	10.5	7.1	10.5	8.6	9.4	10	11	9	8	9.7	6.3	9.5
	C	6.7	6.3	7.9	8.8	9.6	6.5	6.3	11.4	8.9	10.8	11.8	9.7	10.6	10.3	11.1	8.3	8.3
	L	6.5	7.5	8	8.6	9	7.5	8.6	9.6	8.5	8.1	10	9.6	8.7	9.2	10	8.4	8.9

TABLA F-6 Tirantes para la fase II, hallados a partir de la diferencia entre la cota de la superficie del agua y de la superficie del terreno.

		Q=55 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	109	109.5	106.6	105.8	106	104.5	104.1	105.9	104.7	105.9	105.5	107.3	105.5	106.4	105.2	105.1	105.4
	B	114.8	115.7	115	113.3	112.8	112	111.7	113.8	112.2	112.4	111.9	111.8	111	110.2	113.4	110.8	111.7
	C	121.5	121.5	120	121.1	121	120.5	121	121.5	122.1	122.4	121	118.3	119.8	123.3	121.9	120.5	119
	H	164	161.7	160.5	161.6	161.1	159.5	159.4	160.2	161	162.2	158.5	157.4	157.8	157	157.5	161	161
h agua	A	97.1	98.6	97	96.9	96.5	96.6	96.9	97.4	95.6	97	97.1	96.7	97.1	96.5	97.1	97.5	96.2
	B	106.1	106.4	105.2	104	103	102.7	101.9	103.6	102	102.5	102.2	100.9	101.9	101.3	102.9	103.2	103.6
	C	112.7	113.3	111.3	112.3	112.3	109.4	112	112	112.3	112.3	111.7	109.3	110.1	111.9	111.4	113.7	109.4
	H	153	152.7	151.7	151.1	151.4	150.2	151.5	153.7	152	151.8	150.1	148.1	147.9	147.9	148.9	150.7	150.7
tirantes	A	11.9	10.9	9.6	8.9	9.5	7.9	7.2	8.5	9.1	8.9	8.4	10.6	8.4	9.9	8.1	7.6	9.2
	B	8.7	9.3	9.8	9.3	9.8	9.3	9.8	10.2	10.2	9.9	9.7	10.9	9.1	8.9	10.5	7.6	8.1
	C	8.8	8.2	8.7	8.8	8.7	11.1	9	9.5	9.8	10.1	9.3	9	9.7	11.4	10.5	6.8	9.6
	H	11	9	8.8	10.5	9.7	9.3	7.9	6.5	9	10.4	8.4	9.3	9.9	9.1	8.6	10.3	10.3
		Q=70 l/s																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
nivel terreno	A	109.5	109.7	106.8	105.9	105.8	104.6	104.3	105.8	104.8	106.4	105.7	107.4	105.5	106.3	105.4	105	105.3
	B	114.8	115.5	115.1	114	112.6	112	111.8	113.6	112.6	112.3	112	111.9	110.9	110.8	113.8	111	111.9
	C	121.5	121.5	120	121.9	120.9	120.5	121	121.6	122.7	122.5	121.1	118.8	119.6	123.2	122	121.2	119.1
	H	167.4	160.2	160.5	161.8	161	160.8	159.5	160.1	160.9	162	158.5	157.3	157.8	156.8	157	160.5	158
h agua	A	98.6	99.4	97.2	96.3	97.1	95.6	95.9	95.8	95.2	95.9	95.6	95.8	95.9	95.5	97.1	97	93
	B	105.3	105.5	103.9	104.4	102.7	100.7	101.5	104	102.8	101.4	101.5	102.1	101.7	101.7	103.3	101.2	101
	C	113.5	113.3	111	112.8	109.7	109.8	111.2	111.3	112.6	111.2	112.7	109.2	108.6	110.8	111	110.8	110.5
	H	157.2	150.7	150.7	151.2	151.4	149	149.9	150.6	151.1	151.6	149	147.2	147.7	147.4	147.2	150.4	148.5
tirantes	A	10.9	10.3	9.6	9.6	8.7	9	8.4	10	9.6	10.5	10.1	11.6	9.6	10.8	8.3	8	12.3
	B	9.5	10	11.2	9.6	9.9	11.3	10.3	9.6	9.8	10.9	10.5	9.8	9.2	9.1	10.5	9.8	10.9
	C	8	8.2	9	9.1	11.2	10.7	9.8	10.3	10.1	11.3	8.4	9.6	11	12.4	11	10.4	8.6
	H	10.2	9.5	9.8	10.6	9.6	11.8	9.6	9.5	9.8	10.4	9.5	10.1	10.1	9.4	9.8	10.1	9.5

TABLA F-7 Número de Manning para la fase I, hallado con las fórmulas de Temple, 1987.

Tiempo (t) (minutos)	Altura de Pasto(h) (m)	Número de tallos(M) (tallos/m ²)	Coefficiente de Retardanza(CI)	Caudal Unitario(q) (m ³ /m)	Constante para Manning(cu)	q/cu	0.0025CI ^{2.5}	Número de Manning(n)
0	0.2	896	4.539	0.005	0.093	0.057	0.11	0.21
10	0.2	896	4.539	0.005	0.093	0.057	0.11	0.21
40	0.2	896	4.539	0.005	0.093	0.057	0.11	0.21
100	0.2	896	4.539	0.005	0.093	0.057	0.11	0.21
110	0.2	896	4.539	0.01	0.093	0.111	0.11	0.21
140	0.21	896	4.614	0.01	0.093	0.111	0.114	0.213
200	0.21	896	4.614	0.01	0.093	0.111	0.114	0.213
210	0.21	896	4.614	0.016	0.093	0.167	0.114	0.164
240	0.21	896	4.614	0.016	0.093	0.167	0.114	0.164
300	0.22	896	4.686	0.016	0.093	0.167	0.119	0.17
310	0.22	896	4.686	0.021	0.093	0.224	0.119	0.141
340	0.22	896	4.686	0.021	0.093	0.224	0.119	0.141
400	0.225	896	4.721	0.021	0.093	0.224	0.121	0.143
410	0.23	896	4.756	0.027	0.093	0.295	0.123	0.123
440	0.23	896	4.756	0.027	0.093	0.295	0.123	0.123
500	0.24	896	4.824	0.027	0.093	0.295	0.128	0.126
510	0.25	896	4.89	0.036	0.093	0.383	0.132	0.111
540	0.25	896	4.89	0.036	0.093	0.383	0.132	0.111
600	0.25	896	4.89	0.036	0.093	0.383	0.132	0.111

TABLA F-8 Número de Manning para la fase II, hallado con las fórmulas de Temple, 1987.

Tiempo (t) (minutos)	Altura de Pasto (h) (m)	Número de Tallos (M) (tallos/m ²)	Coefficiente de Retardanza(CI)	Caudal Unitario(q) (m ³ /m)	Constante para Manning (cu)	q/cu	0.0025CI ^{2.5}	Número de Manning(n)
0	0.19	878	4.447	0.006	0.093	0.059	0.104	0.206
10	0.19	878	4.447	0.006	0.093	0.059	0.104	0.206
40	0.19	878	4.447	0.006	0.093	0.059	0.104	0.206
100	0.19	878	4.447	0.006	0.093	0.059	0.104	0.206
110	0.19	878	4.447	0.01	0.093	0.11	0.104	0.199
140	0.19	878	4.447	0.01	0.093	0.11	0.104	0.199
200	0.19	878	4.447	0.01	0.093	0.11	0.104	0.199
210	0.2	878	4.524	0.016	0.093	0.167	0.109	0.157
240	0.2	878	4.524	0.016	0.093	0.167	0.109	0.157
300	0.2	878	4.524	0.016	0.093	0.167	0.109	0.157
310	0.2	878	4.524	0.021	0.093	0.223	0.109	0.131
340	0.2	878	4.524	0.021	0.093	0.223	0.109	0.131
400	0.21	878	4.598	0.021	0.093	0.223	0.113	0.136
410	0.21	878	4.598	0.028	0.093	0.299	0.113	0.113
440	0.21	878	4.598	0.028	0.093	0.299	0.113	0.113
500	0.21	878	4.598	0.028	0.093	0.299	0.113	0.113
510	0.21	878	4.598	0.036	0.093	0.388	0.113	0.098
540	0.21	878	4.598	0.036	0.093	0.388	0.113	0.098

TABLA F-9 Número de Manning del Laboratorio para la fase I, hallado con la fórmula de Manning.

Tiempo (t) (minutos)	Tirante (d) (m)	Radio Hidráulico (R) (m)	Pendiente (Sf) (m/m)	Velocidad (V) (m/s)	Número de Manning del Laboratorio (n)
0	0.032	0.031	0.517	0.39	0.182
10	0.032	0.031	0.517	0.39	0.182
40	0.032	0.031	0.517	0.39	0.182
100	0.032	0.031	0.517	0.39	0.182
110	0.054	0.051	0.517	0.55	0.18
140	0.054	0.051	0.517	0.55	0.18
200	0.054	0.051	0.517	0.55	0.18
210	0.068	0.064	0.517	0.75	0.153
240	0.068	0.064	0.517	0.75	0.153
300	0.068	0.064	0.517	0.75	0.153
310	0.086	0.079	0.517	1.35	0.098
340	0.086	0.079	0.517	1.35	0.098
400	0.086	0.079	0.517	1.35	0.098
410	0.088	0.081	0.517	2.04	0.066
440	0.088	0.081	0.517	2.04	0.066
500	0.088	0.081	0.517	2.04	0.066
510	0.095	0.087	0.517	2.8	0.05
540	0.095	0.087	0.517	2.8	0.05
600	0.095	0.087	0.517	2.8	0.05

TABLA F-10 Número de Manning del Laboratorio para la fase II, hallado con la fórmula de Manning.

Tiempo (t) (minutos)	Tirante (d) (m)	Radio Hidráulico (R) (m)	Pendiente (Sf) (m/m)	Velocidad (V) (m/s)	Número de Manning del Laboratorio (n)
0	0.032	0.031	0.512	0.44	0.16
10	0.032	0.031	0.512	0.44	0.16
40	0.032	0.031	0.512	0.44	0.16
100	0.032	0.031	0.512	0.44	0.16
110	0.054	0.051	0.512	0.62	0.159
140	0.054	0.051	0.512	0.62	0.159
200	0.054	0.051	0.512	0.62	0.159
210	0.068	0.064	0.512	0.79	0.144
240	0.068	0.064	0.512	0.79	0.144
300	0.068	0.064	0.512	0.79	0.144
310	0.088	0.081	0.512	1.29	0.104
340	0.088	0.081	0.512	1.29	0.104
400	0.088	0.081	0.512	1.29	0.104
410	0.092	0.084	0.512	2.49	0.055
440	0.092	0.084	0.512	2.49	0.055
500	0.092	0.084	0.512	2.49	0.055
510	0.0999	0.091	0.512	2.81	0.051
540	0.0999	0.091	0.512	2.81	0.051

TABLA F-11 Cálculo del Factor "Cf" y de "nf" para su posterior utilización en el cálculo del esfuerzo cortante efectivo para la fase I.

Tiempo acumulado (minutos)	Factor de Cobertura Vegetal(CF)	Profundidad de Erosión (e) (m)	Profundidad de erosión de falla (e1) (m)	Coefficiente de Vegetacion Removida(b)	Coefficiente de Manning para el área de Falla(nf)	Factor de cobertura Vegetal para el Área de Falla (CfF)
0	0.9	0	0.06	3	0.21	0.9
10	0.9	0.0035	0.06	3	0.2099	0.8998
40	0.9	0.0073	0.06	3	0.2096	0.8984
100	0.9	0.0115	0.06	3	0.2086	0.8937
110	0.9	0.0148	0.06	3	0.2071	0.8865
140	0.9	0.0173	0.06	3	0.2082	0.8784
200	0.9	0.019	0.06	3	0.2067	0.8714
210	0.9	0.0212	0.06	3	0.1578	0.8603
240	0.9	0.0245	0.06	3	0.1544	0.8387
300	0.9	0.0267	0.06	3	0.1571	0.8207
310	0.9	0.0284	0.06	3	0.1279	0.8046
340	0.9	0.0303	0.06	3	0.1252	0.7841
400	0.9	0.0336	0.06	3	0.1215	0.7419
410	0.9	0.0354	0.06	3	0.1015	0.7152
440	0.9	0.0375	0.06	3	0.0975	0.6803
500	0.9	0.0414	0.06	3	0.0913	0.6043
510	0.9	0.0431	0.06	3	0.0772	0.5664
540	0.9	0.0445	0.06	3	0.0738	0.5328
600	0.9	0.0461	0.06	3	0.0696	0.4918

TABLA F-12 Cálculo del Factor "Cft" y de "nf" para su posterior utilización en el cálculo del esfuerzo cortante efectivo para la fase II.

Tiempo acumulado (minutos)	Factor de Cobertura Vegetal(CF)	Profundidad de Erosión (e) (m)	Profundidad de erosión de falla (e1) (m)	Coefficiente de Vegetacion Removida(b)	Coefficiente de Manning para el área de Falla(nf)	Factor de cobertura Vegetal para el Aárea de Falla (CfF)
0	0.9	0	0.06	3	0.2063	0.9
10	0.9	0.0024	0.06	3	0.2063	0.8999
40	0.9	0.005	0.06	3	0.2062	0.8995
100	0.9	0.0109	0.06	3	0.2052	0.8946
110	0.9	0.0132	0.06	3	0.1973	0.8904
140	0.9	0.015	0.06	3	0.1964	0.8859
200	0.9	0.0162	0.06	3	0.1957	0.8823
210	0.9	0.0174	0.06	3	0.1539	0.878
240	0.9	0.019	0.06	3	0.1529	0.8714
300	0.9	0.0199	0.06	3	0.1522	0.8672
310	0.9	0.0206	0.06	3	0.1264	0.8636
340	0.9	0.0219	0.06	3	0.1255	0.8562
400	0.9	0.0236	0.06	3	0.1285	0.8452
410	0.9	0.026	0.06	3	0.1059	0.8268
440	0.9	0.0281	0.06	3	0.1039	0.8075
500	0.9	0.0312	0.06	3	0.1003	0.7735
510	0.9	0.0329	0.06	3	0.085	0.7516
540	0.9	0.0353	0.06	3	0.082	0.7167

ANEXO G

ANEXO G

TABLA G-1 Velocidades promedio para la cobertura de pasto Kikuyo reforzado con Geoweb (fase I) calculadas para cada caudal y sector del talud, donde T_i es el tiempo inicial y T_f es el tiempo final y $T=(T_f-T_i)$, que es el tiempo en que recorre el trazador una distancia de 2.76m.

Q=10(l/s) derecha							Q=20(l/s) derecha						
Ti	40.5	6.68	28.9	25.7	52	14.1	Ti	21.4	40.5	10.8	40.4	55.7	46.5
Tf	48.1	14.2	36.2	33.3	59.5	21.5	Tf	27.6	46.8	16.8	46.7	62.1	53.1
T(s)	7.59	7.54	7.31	7.68	7.53	7.37	T(s)	6.16	6.36	6.03	6.33	6.37	6.6
V(m/s)	0.36	0.37	0.38	0.36	0.37	0.37	V(m/s)	0.45	0.43	0.46	0.44	0.43	0.42
Vpromedio(m/s)	0.37						0.44						
Q=10(l/s) centro							Q=20(l/s) centro						
Ti	47.3	41.6	33.7	50.4	8.21	26.8	Ti	37.4	7.66	57.3	40.3	9.89	30.6
Tf	54.4	48.8	40.7	57.6	15.4	33.9	Tf	43.3	13.6	63	46	15.6	35.2
T(s)	7.12	7.2	7.01	7.19	7.21	7.17	T(s)	5.86	5.95	5.62	5.61	5.69	4.61
V(m/s)	0.39	0.38	0.39	0.38	0.38	0.38	V(m/s)	0.47	0.46	0.49	0.49	0.49	0.6
Vpromedio(m/s)	0.39						0.5						
Q=10(l/s) izquierda							Q=20(l/s) izquierda						
Ti	36.4	48.4	20	12.5	17.4	6.67	Ti	4.67	21.1	27.3	40.9	3.68	23.9
Tf	43.3	55.3	26.9	19.4	24.3	13.6	Tf	8.92	25.5	31.5	45	7.61	28
T(s)	6.9	6.89	6.87	6.86	6.88	6.88	T(s)	4.25	4.37	4.23	4.15	3.93	4.11
V(m/s)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	V(m/s)	0.65	0.63	0.65	0.67	0.7	0.67
Vpromedio(m/s)	0.4						0.66						
Q=30(l/s) derecha							Q=40(l/s) derecha						
Ti	7.07	16.2	37.2	7.19	39.7	16	Ti	20.6	8.85	48.8	47.6	31.6	18
Tf	12.3	21.4	42.6	12.3	45	21.2	Tf	24.2	12.3	52.3	51.1	35.1	21.6
T(s)	5.23	5.12	5.32	5.14	5.26	5.21	T(s)	3.58	3.45	3.52	3.55	3.51	3.55
V(m/s)	0.53	0.54	0.52	0.54	0.52	0.53	V(m/s)	0.77	0.8	0.78	0.78	0.79	0.78
Vpromedio(m/s)	0.53						0.78						

TABLA G-2 Velocidades promedio para la cobertura de pasto Kikuyo reforzado con Geoweb (fase I) calculadas para cada caudal y sector del talud, donde T_i es el tiempo inicial y T_f es el tiempo final y $T=(T_f-T_i)$, que es el tiempo en que recorre el trazador una distancia de 2.76m.

Q=30(l/s) centro							Q=40(l/s) centro						
T _i	40.8	58	48.3	13.4	31.1	16	T _i	56.2	13.4	28.4	39.9	12.8	11.2
T _f	44.9	62.1	52.6	17.6	35	20	T _f	58.4	15.5	30.4	42.1	14.8	13.3
T(s)	4.13	4.13	4.36	4.15	3.94	4	T(s)	2.22	2.14	2.02	2.19	2.04	2.1
V(m/s)	0.67	0.67	0.63	0.67	0.7	0.69	V(m/s)	1.24	1.29	1.37	1.26	1.35	1.31
Vpromedio(m/s)	0.67						1.3						
Q=30(l/s) izquierda							Q=40(l/s) izquierda						
T _i	18.9	35.4	49.5	6.16	27.4	48	T _i	47.5	6.28	25.6	40.3	54	20.5
T _f	21.3	37.9	52.5	9.03	30.1	50.5	T _f	49	7.65	27	41.7	55.4	21.9
T(s)	2.46	2.47	2.92	2.87	2.79	2.46	T(s)	1.47	1.37	1.37	1.39	1.4	1.41
V(m/s)	1.12	1.12	0.95	0.96	0.99	1.12	V(m/s)	1.88	2.01	2.01	1.99	1.97	1.96
Vpromedio(m/s)	1.04						1.97						
Q=55(l/s) derecha							Q=70(l/s) derecha						
T _i	38.8	51.3	4.5	43.5	30.9	43	T _i	11.7	27.1	11.3	57.8	20.3	20.5
T _f	40.5	53.1	6.06	45.2	32.6	44.8	T _f	12.9	28.2	12.5	59	21.4	21.7
T(s)	1.71	1.78	1.56	1.7	1.75	1.8	T(s)	1.19	1.14	1.16	1.17	1.15	1.17
V(m/s)	1.61	1.55	1.77	1.62	1.56	1.53	V(m/s)	2.32	2.42	2.38	2.36	2.4	2.36
Vpromedio(m/s)	1.61						2.37						
Q=55(l/s) centro							Q=70(l/s) centro						
T _i	50.8	3.06	22.6	2.89	23.6	53.9	T _i	48.2	58.1	40.4	23.5	11.9	18.9
T _f	52.1	4.38	24	4.24	24.9	55.3	T _f	49.3	59	41.4	24.5	12.9	19.9
T(s)	1.28	1.32	1.42	1.35	1.33	1.33	T(s)	1.08	0.99	1.06	0.99	1.01	1.03
V(m/s)	2.16	2.09	1.94	2.04	2.06	2.08	V(m/s)	2.56	2.79	2.6	2.79	2.73	2.68
Vpromedio(m/s)	2.06						2.69						

TABLA G-3 Velocidades promedio para la cobertura de pasto Kikuyo reforzado con Geoweb (fase I) calculadas para cada caudal y sector del talud, donde T_i es el tiempo inicial y T_f es el tiempo final y $T=(T_f-T_i)$, que es el tiempo en que recorre el trazador una distancia de 2.76m.

Q=55(l/s) izquierda						Q=70(l/s) izquierda								
T_i	44.1	58.9	27.2	39.3	11.5	13.7	T_i	24.5	34.6	35.5	33.3	32.7	36	
T_f	45.2	60	28.3	40.4	12.6	14.9	T_f	25.3	35.5	36.4	34.1	33.5	36.8	
T(s)	1.14	1.08	1.14	1.15	1.1	1.17	T(s)	0.8	0.88	0.84	0.81	0.82	0.8	
V(m/s)	2.42	2.56	2.42	2.4	2.51	2.36	V(m/s)	3.45	3.14	3.29	3.41	3.37	3.45	
Vpromedio(m/s)	2.44								3.35					

TABLA G-4 Velocidades promedio para la cobertura de pasto Kikuyo (fase II) calculadas para cada caudal y sector del talud, donde T_i es el tiempo inicial y T_f es el tiempo final y $T=(T_f-T_i)$, que es el tiempo en que recorre el trazador una distancia de 2.76m.

Q=10(l/s) derecha					Q=20(l/s) derecha				
Ti	46.05	1.02	20.3	7.32	Ti	42.09	8.94	38.7	50.4
Tf	50.92	6.77	25.3	12.4	Tf	45.77	12.6	42.3	54.1
T(s)	4.87	5.75	5	5.1	T	3.68	3.66	3.65	3.67
V(m/s)	0.5667	0.48	0.55	0.54	V(m/s)	0.75	0.75	0.76	0.75
Vpromedio (m/s)	0.53				0.75				
Q=10(l/s) centro					Q=20(l/s) centro				
Ti	22.43	41.8	6.85	44.6	Ti	32.79	52.2	11	45
Tf	29.01	48.6	14.1	51.8	Tf	37.05	56.4	15.1	49.3
T(s)	6.58	6.82	7.24	7.16	T	4.26	4.16	4.01	4.29
V(m/s)	0.4195	0.4	0.38	0.39	V(m/s)	0.6479	0.66	0.69	0.64
Vpromedio (m/s)	0.39				0.66				
Q=10(l/s) izquierda					Q=20(l/s) izquierda				
Ti	6.96	27.4	21.3	4.32	Ti	6.03	24.1	3.45	6.8
Tf	15	35.3	27.8	11.6	Tf	12.05	30.2	9.45	12.9
T(s)	8.04	7.82	6.5	7.27	T	6.02	6.16	6	6.08
V(m/s)	0.3433	0.35	0.42	0.38	V(m/s)	0.4585	0.45	0.46	0.45
Vpromedio (m/s)	0.37				0.45				
Q=30(l/s) derecha					Q=40(l/s) derecha				
Ti	23.17	37.7	53.6	39.9	Ti	22.84	36.9	36.4	15.4
Tf	26	40.8	56.7	42.8	Tf	25.06	39	38.3	17.3
T	2.83	3.05	3.02	2.9	T	2.22	2.05	1.91	1.98
V(m/s)	0.9753	0.9	0.91	0.95	V(m/s)	1.2432	1.35	1.45	1.39
Vpromedio (m/s)	0.93				1.35				
Q=30(l/s) centro					Q=40(l/s) centro				
Ti	7.36	25.8	8.71	12.5	Ti	47.15	2.42	19.9	19.8
Tf	11.1	29.5	12.5	16.2	Tf	49.17	4.56	22.1	21.9
T	3.74	3.76	3.74	3.73	T	2.02	2.14	2.28	2.09
V(m/s)	0.738	0.73	0.74	0.74	V(m/s)	1.3663	1.29	1.21	1.32
Vpromedio (m/s)	0.73				1.29				
Q=30(l/s) izquierda					Q=40(l/s) izquierda				
Ti	39.91	54.4	10.9	25.6	Ti	19.1	30.3	9.99	20.8
Tf	43.84	58.5	14.9	29.6	Tf	21.42	32.5	12.3	23
T	3.93	4.07	3.98	3.99	T	2.32	2.22	2.31	2.21
V(m/s)	0.7023	0.68	0.69	0.69	V(m/s)	1.1897	1.24	1.19	1.25
Vpromedio (m/s)	0.69				1.21				

TABLA G-5 Velocidades promedio para la cobertura de pasto Kikuyo (fase II) calculadas para cada caudal y sector del talud, donde T_i es el tiempo inicial y T_f es el tiempo final y $T=(T_f-T_i)$, que es el tiempo en que recorre el trazador una distancia de 2.76m.

Q=55(l/s) derecha					Q=70(l/s) derecha				
Ti	10.3	30.2	34.9	13.8	Ti	24.46	32.7	40.3	11.8
Tf	11.4	31.3	36	14.9	Tf	25.54	33.7	41.3	12.8
T	1.1	1.13	1.07	1.09	T	1.08	0.99	0.98	0.97
V(m/s)	2.5091	2.44	2.58	2.53	V(m/s)	2.5556	2.79	2.82	2.85
Vpromedio (m/s)	2.51				2.75				
Q=55(l/s) centro					Q=70(l/s) centro				
Ti	41.76	57.3	57.9	15.9	Ti	57.6	5.78	57.9	44.1
Tf	43.13	58.6	59	17.1	Tf	58.66	6.79	58.9	45.1
T	1.37	1.26	1.14	1.17	T	1.06	1.01	1	1.04
V(m/s)	2.0146	2.19	2.42	2.36	V(m/s)	2.6038	2.73	2.76	2.65
Vpromedio (m/s)	2.24				2.68				
Q=55(l/s) izquierda					Q=70(l/s) izquierda				
Ti	9.29	22.7	8.58	57.5	Ti	38.2	47	53.3	37.9
Tf	10.32	23.7	9.58	58.5	Tf	39.13	47.9	54.2	38.8
T	1.03	1.04	1	1.01	T	0.93	0.94	0.91	0.9
V(m/s)	2.6796	2.65	2.76	2.73	V(m/s)	2.9677	2.94	3.03	3.07
Vpromedio (m/s)	2.70				3.00				

ANEXO H

ANEXO H

TABLA H-1 Profundidad de erosión en la fase I para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=10 l/s T=10 min	A	-0.1	-0.9	-0.8	-0.7	-1.2	-1	-0.6	-0.1	-1.3	0	0	-0.3	-0.8	-1.8	-1	-0.8	-1.5
	B	0.1	-0.4	-0.9	-1.1	-0.5	0.1	-0.1	0	-0.4	0	0	0	0.1	-0.5	-0.6	-0.1	-0.9
	C	-0.1	0	0	-0.1	0	-0.7	-0.2	-1	-0.9	-0.8	-0.6	-0.7	-0.9	-0.7	-0.2	-0.3	0.2
	D	-0.3	0.2	0.1	0	0	0.1	0.3	0	-0.2	0.1	-0.9	-0.2	-0.1	-0.2	-0.7	0.1	-0.9
	E	-0.4	0.1	0.2	-0.8	0.2	0.1	-0.4	-0.9	-0.1	-0.5	0.1	-0.9	-0.4	-0.6	-0.7	-0.7	0
	F	0.1	0	-0.4	0	-0.5	-0.6	-0.8	0.2	0.1	0.2	-0.9	0	-0.8	0	0.1	0	-1
	G	-0.4	-0.4	-0.8	0	-0.6	-0.5	0	0.3	-0.1	0	0.1	0	-0.6	0.4	-0.2	0.2	0.2
	H	-0.2	0.2	0	-0.5	-0.6	-0.9	0	0.2	-0.7	-2.8	0	-0.1	-1.4	-0.6	0.1	-0.1	0.2
	I	0.3	-0.2	-1.2	-1.9	0.2	0	0.2	-0.6	-0.6	0.2	0	0	0	0	-1.2	-0.4	-0.9
	J	-0.7	0	-0.3	-0.2	-0.5	-0.7	-1	-1.3	-0.8	-0.8	-0.8	-0.4	-0.7	-0.9	-1.2	-0.9	0
	K	-0.1	0	-0.8	-0.1	0	-0.4	-0.9	0.1	-0.2	-0.8	-0.4	-0.4	0.1	-1.2	-0.5	-0.2	-0.8
	L	-0.6	0	0	-0.2	0.2	-0.3	0.2	0	0	-0.6	-0.1	0.2	-0.9	0.3	0	-0.8	0
	M	-0.6	-0.4	-0.4	-0.1	-0.3	0.1	-0.1	0.2	0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.7	-1	0.2	-0.4	0
Q=10 l/s T=30 min	A	-0.2	-0.8	-0.7	-0.4	-0.6	-0.4	-0.1	-0.5	-0.5	0	-0.6	-0.5	-0.5	-0.9	-0.8	-0.7	0
	B	-0.6	-0.7	-0.5	-0.8	-0.5	-0.4	-0.8	-0.6	-0.5	-0.6	-1.2	-0.1	-0.9	-1.3	-0.5	-0.3	-0.6
	C	-0.7	-0.1	-0.5	-0.8	0.2	-0.7	-0.6	-0.5	-0.9	-0.8	-1.4	-0.9	-0.7	-0.7	-0.8	-0.4	-0.6
	D	0	0.6	-0.2	0.2	-0.1	-0.6	-0.4	-0.3	-0.7	-0.8	-0.8	0.2	-0.4	-0.4	-0.5	-0.9	-0.5
	E	-0.1	-0.4	-0.4	-0.4	-0.9	-0.3	-0.5	0	-0.9	0	-0.5	-0.1	-0.5	-0.1	-0.2	-0.6	0
	F	-0.3	-0.6	-0.4	0.1	-1	0	-0.9	-0.6	-0.7	-0.8	0.7	0.1	0	-0.7	-0.1	0.3	0
	G	-0.1	-0.5	-0.4	-0.7	-0.3	-0.4	-0.7	0.1	-0.5	-0.9	-0.5	-0.5	-0.8	-0.7	-0.4	-2	-0.8
	H	-0.2	-0.2	-0.7	-0.7	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	0	-0.3	0.3	0.1	-0.7	0	0	0.2	-0.5
	I	-0.3	-0.4	-0.5	-0.2	-0.1	-0.6	-0.2	-1	-0.9	-0.6	0.1	-0.9	-0.8	-0.1	-0.5	-0.4	0
	J	-1	0	-0.5	0.1	0	-0.4	0.2	0	-0.1	0.4	-0.1	-0.2	0.3	-0.1	0	0	0
	K	0.2	0	0	-0.4	-0.5	-0.4	0	-0.8	-0.5	-0.9	-0.8	-0.8	0	0	-0.6	-0.5	0
	L	-0.2	-0.8	-0.4	-0.3	-0.1	0	-0.7	-0.4	-0.5	0	-0.5	-1.1	-0.1	0.4	-0.7	-0.1	0
	M	-0.5	-0.2	0.3	0.2	0	0	-0.9	0	0	0	-0.3	-0.2	0	0	-0.9	-0.4	0.1

TABLA H-2 Profundidad de erosión en la fase I para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=10 l/s T=60 min	A	0	-0.1	0.3	-0.1	0.1	-0.3	-2.2	-0.5	0	-0.2	-0.1	0	0.2	-0.2	0	0.1	-0.9
	B	0.2	-0.2	0.1	0.1	0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.5	-0.1	-0.1	-0.6	0	-0.1	-0.5	0.1	-0.1
	C	0.2	0.1	-0.2	0.1	-0.1	0.2	-0.1	-0.4	-1.8	0	0.4	0.2	-1.4	-2.8	-1.1	-1.4	-0.4
	D	-0.1	-1.5	-0.1	0.1	0	-0.2	0.2	-0.2	0	-1	-0.1	0.1	0	0	-0.1	0	0.4
	E	0.2	0.1	-0.2	0.2	-0.1	-1	0.2	-0.1	-1	-0.9	-2.1	0.2	-1.1	-0.4	-0.2	-1.9	-0.7
	F	-0.2	0.1	-0.2	-0.8	0.2	-0.4	-0.3	0.1	0.2	-0.2	0	-0.5	-0.1	-0.4	-1.5	0	-0.1
	G	0.1	0	-3.2	-0.6	-0.4	-1	0.4	-0.3	0	-0.1	0.2	-1	0.1	-0.6	-0.2	-0.1	0.2
	H	0.2	-0.1	0.1	0.2	-0.1	-0.1	-0.2	0	-0.6	-0.2	0.2	0	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-0.1
	I	0.2	0.2	-0.2	0	-0.1	0.2	-0.1	-1	0	-0.1	-0.2	0.2	-2.8	-0.1	-0.8	-0.1	0.3
	J	0.1	-1.5	-0.6	-0.5	-1.1	0.1	-0.1	-1.6	0	-0.2	0	0	-0.7	-0.1	-0.4	0.2	-0.5
	K	0.1	-2.8	0	-0.1	-0.7	-1	-0.1	-0.5	-0.4	-0.8	0	-0.1	-0.1	-0.7	-1.1	-0.9	0.1
	L	0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	0	-0.8	-1	-1	-0.9	0.1	-0.5	-0.8	-0.1	-1	-0.1
	M	-3.5	-2	-1.6	-1.9	-0.6	-3	-0.9	-3.1	-2.8	-2.5	-3.1	0	0.1	-0.7	-0.3	-0.6	-1.1
Q=20 l/s T=10 min	A	-0.3	0.3	-1.4	0.2	-0.1	-0.1	0	-0.5	-1.6	-0.9	-0.1	-0.1	-0.8	-0.1	-0.6	-0.1	-0.6
	B	0.3	-0.4	-1.6	-0.1	-0.7	0.2	-0.1	0.2	-1.4	-0.4	0	0	-0.7	0	-0.2	-0.7	-0.9
	C	-0.2	-0.2	-1.2	0	-0.3	-0.8	0	-0.1	0	0	0	-0.1	0	-0.3	-1.1	0.1	0
	D	0.2	-0.2	0	-0.1	-0.4	-0.2	-0.2	-0.6	-0.4	-0.1	-0.4	-0.8	-0.5	-0.3	-1.2	-0.4	-0.4
	E	-0.6	0.1	-0.1	-1.3	-0.6	0	-1.2	-0.1	0	-0.3	-0.6	0	0	-0.1	0	-0.5	-0.4
	F	0	-0.1	0	-0.4	-0.5	0.2	0	-1	-0.6	0.2	-0.3	-0.2	0	-0.3	-0.1	0.3	0.1
	G	-0.2	0	-0.4	-1.3	-0.4	-0.2	-0.1	0	-0.3	0.2	-0.9	-0.3	0	-0.2	-0.1	-0.8	0
	H	-0.5	-0.3	-0.1	-0.4	-0.8	0.2	-0.5	-0.3	-0.2	0	-0.1	-1	-0.6	0	-0.5	0.2	-0.1
	I	0	-0.1	-0.1	-0.6	-0.5	-0.1	-0.7	-0.4	-0.5	-0.1	-0.9	0	-0.1	-0.3	-0.4	-1.2	-1
	J	0	-0.1	-0.3	-0.6	-0.5	-0.6	0	0	-0.1	-0.4	-0.6	-0.4	-0.5	-0.2	-0.5	-0.5	0.2
	K	-0.9	0	-0.3	-0.5	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.6	-1.5	-0.5	-0.7	-0.4	-1	0	-0.5	0.1
	L	-0.4	0	-0.4	0	-0.8	-0.6	-0.3	-0.9	-0.4	0.1	0	-0.8	-0.4	-0.8	-0.1	-0.4	0.1
	M	0.5	0	0	-0.6	-0.2	-0.3	-0.4	-0.9	-0.1	-0.2	-0.6	-0.5	0	0.1	-0.8	0	-0.6

TABLA H-3 Profundidad de erosión en la fase I para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=20 l/s T=30 min	A	0	0	0.3	0.2	0.3	0	0	0	0	-0.2	-0.3	0.1	0	-0.4	0	0.3	0
	B	0.3	0.1	0.1	-0.2	-1.1	0.1	0.1	-0.9	-0.1	-0.6	0	0	-0.4	0.2	0.2	-0.1	-0.2
	C	-0.1	-3.1	-0.6	0.1	0.1	0.1	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.6	0	-0.2	0.1	-0.7	-0.2	-0.1
	D	0	0	0.2	-0.2	-0.5	0	-0.4	0.2	-1.8	0	0	-0.2	-0.4	0.2	-0.1	-0.2	-0.1
	E	-2	-1.2	-1	0	-0.2	0	-0.5	0	-0.2	-1.1	0.1	-0.5	0	0	0	0	-0.5
	F	-0.4	-0.1	-0.4	0.2	0	0.1	0.1	0.3	0	0	-0.3	-0.3	0	0	0.1	0.2	-0.6
	G	0.2	0	0	0	0	0	0	-0.1	-0.1	0	-0.4	0	0	-0.5	0.1	-0.2	-0.8
	H	0	0.3	-0.1	-0.1	-1.4	0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.4	0.2	0.2	0.3	-0.1	-0.5	0.2	0.1
	I	-0.3	-0.9	0.2	-0.2	0.2	-0.2	-1.4	0.1	-0.2	0.3	-0.1	0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.3	0.1
	J	0	-0.2	-0.3	-0.6	0.3	-0.1	0.1	0	-0.1	0	-0.2	0.2	-0.1	0	0	-0.5	0
	K	-1	0	0.2	-0.8	-2	0	-0.5	-0.4	-0.9	-0.4	-0.5	-1.7	-0.9	-0.7	-0.2	-2	0.1
	L	-0.9	0.3	0.1	0	-0.2	0	-0.8	-0.6	-0.1	0	-0.5	-0.9	-0.8	0	-0.2	0.3	0.1
	M	-3.6	-2.1	0	-1	0.1	0.2	-2.2	-1	0	-0.2	0	0.1	-0.8	-0.3	-1	-0.1	0.4
Q=20 l/s T=60 min	A	0.1	0.2	-1.5	0	0.1	0.1	0.1	0.2	-0.3	-0.4	0.2	-1	-0.7	0.2	-0.4	-0.1	-0.1
	B	-0.2	-0.2	-0.3	-1	-0.1	0.2	-0.1	0	0.1	0	0.2	0.2	0.2	0.2	-0.1	0	0.1
	C	0	-0.6	-0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	-0.5	0.2	0.2	-0.3	0	0	0	0.2	0.2	0.2
	D	0.1	0.2	-2.1	-0.9	0.2	0.2	-0.3	-0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0	0	0.1	0.2	0.1
	E	-0.2	0.2	-0.2	-0.4	0.1	0.1	-0.3	0.1	-0.4	0.1	-0.5	0.2	0.2	0.2	-1.4	0.2	0.1
	F	0.2	0.4	0.1	0	0.2	-0.5	0.1	-0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	-1	0	0	0
	G	0	0.2	-0.1	-0.1	0	-0.2	0	-0.3	0.2	-0.1	0.2	0.1	-0.3	0.2	0	0	0.2
	H	0.2	-0.5	-0.4	-2.5	0.2	0	0	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0	0.1	0.2	0.2	-1.1
	I	0.2	0.1	-1.1	0.2	0.1	-0.4	-0.7	0.1	0	-0.9	0.1	0.1	-0.2	0	0.2	-0.1	0
	J	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0	0.2	-0.3	0.2	0.2	0.2	0	0.1	-0.2	0.2	0.1	-0.1
	K	-0.1	0	-1.4	-0.2	-1.4	-1.8	0.1	-1.1	0	0.2	-0.2	0.1	0	-0.1	0	-0.8	-0.4
	L	-0.9	-0.5	-0.5	-0.1	-0.2	-0.1	-0.6	-0.1	-1.1	-2.5	0.1	-0.3	-0.5	0	-2.4	-1.2	-0.7
	M	0.1	-0.5	-0.5	-0.1	-0.6	-1.1	0	-0.4	-2.7	0	-0.3	-0.3	-1	-0.4	0	-0.7	-0.1

TABLA H-4 Profundidad de erosión en la fase I para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=30 l/s T=10 min	A	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.6	-0.2	0	0.1	-0.1	-0.1	0.2
	B	0.1	0.1	0.1	-0.2	0.1	-0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0	0	0.1	0.2	0.1	0.1
	C	0.1	-0.1	-0.7	0.1	-0.3	-0.1	-0.2	-0.3	0.1	-0.6	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	-0.1	0	-0.2
	D	-0.3	0.1	-0.2	-0.6	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	0.1	-0.8	-0.9	0.2	-0.1	-0.1	-0.4	0.1	-0.5
	E	-0.1	0.2	-0.5	0.1	-0.3	-0.1	-0.2	0.2	-0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	-0.1	0.2
	F	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	-0.9	0.1	-0.4	0.1	-0.5	0.1	0.1	-0.4	0.2	0.1	-0.4	-0.2
	G	-0.4	-0.1	0.3	-0.1	-0.1	-0.8	-0.2	-1.1	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.4
	H	-1.4	0.1	0.1	-0.1	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	-0.4	-0.1	0	0.1
	I	-0.1	-0.7	-0.3	-0.5	-0.2	-0.4	0.2	-0.2	-0.1	-0.8	-0.2	-0.6	0	-0.1	-0.1	-0.8	-0.1
	J	0.2	0.1	-0.2	-0.1	0	0.2	0.3	-0.4	-0.8	0.1	-1	0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	-0.5
Q=30 l/s T=30 min	K	-0.1	-0.5	-0.2	-0.4	-0.1	-0.2	-0.2	0.2	0	-0.5	-0.1	-1.3	0.1	-0.1	-1	-0.5	-1.1
	L	-0.9	-0.6	-1	-1.2	-1.5	-1.3	-0.2	-1.6	-1.4	-1.1	-1.2	-1.1	-1.2	-1	-0.1	-1.3	-1.4
	M	-0.7	0.1	0.1	0.1	-0.7	-0.1	-1.3	0.1	0.2	-0.1	-0.8	-0.6	-0.7	0.1	0.1	0.1	-0.7
	N	0.5	0.2	-0.6	-0.5	0	-0.9	-0.1	-0.3	-0.2	0.1	0	0	0.2	-0.5	-0.1	-0.1	-0.6
	O	-0.1	-0.8	-0.1	-0.3	0.2	0.1	-0.1	-0.5	0	0	-0.8	0.1	0.3	0.1	-0.3	-0.8	0.3
	P	-0.6	0	-0.6	-0.4	-0.1	0.2	0	-0.5	-0.3	-0.4	-0.1	-0.7	-0.6	-0.2	-0.7	-0.2	-0.5
	Q	-0.3	0.3	-0.2	0	-0.3	-0.7	-0.3	-0.4	0.1	0	-0.5	-0.8	-0.3	-1.4	-0.9	0	-0.1
	R	0.4	-1	-1.1	0.2	0.2	-0.2	0.1	-0.2	-0.3	-0.6	-0.5	-0.2	-0.2	0	-0.5	-0.3	-0.3
	S	0	0	0.1	0.2	0	-0.2	0	-2	-0.6	-0.5	-0.4	-0.1	-0.3	0.3	0.1	-0.5	-0.4
	T	0	-0.5	0.3	0	-0.7	-0.7	0	-0.5	-0.6	0	-0.9	-0.3	-0.6	-0.1	-0.5	-0.5	-0.7
Q=30 l/s T=30 min	U	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.2	0	0.1	0	-0.1	-0.6	-0.4	-0.9	-0.3	0	-0.8	-0.5	0.4
	V	-0.2	-0.2	-0.5	-0.3	0.2	0.7	-0.3	-0.8	-0.5	0	-0.8	0.3	-0.1	0.1	-2	-0.6	-0.7
	W	-0.2	0.1	0.1	-0.7	-0.1	-0.1	-0.5	-1.2	0.1	-0.5	-0.9	-0.3	0.2	0	-0.4	-0.5	-0.4
	X	0	0.3	0	0.1	0.1	-0.9	-0.8	-0.8	-0.9	-0.6	-0.3	-0.6	-0.3	-0.1	-0.9	0	0.2
	Y	-0.1	0.2	0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.3	-2.4	-0.6	0.1	-0.4	-1.9	-1	-0.8	-1.4	-1.4	-1.5
	Z	-1.5	-0.8	-0.1	-0.8	-0.5	-0.1	0	-2	-0.2	0	-1.5	-0.3	-1.6	-1.1	-0.2	0.2	0

TABLA H-5 Profundidad de erosión en la fase I para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=30 l/s T=60 min	A	0	-0.6	-0.3	-1	-1.6	0.5	0.1	-0.7	-0.6	-0.5	0.2	-2.6	-0.5	-0.7	-1.8	-0.9	0
	B	0	-0.1	0	-0.4	-0.3	-1.8	-0.1	-0.5	-0.4	-0.3	-0.6	-0.1	-0.3	0	-0.4	-0.9	-0.5
	C	-0.1	0.2	-0.1	-0.1	-0.5	-0.1	-1.4	-0.7	-0.2	-0.5	0.1	0	-0.4	-0.2	-0.4	-0.1	-0.7
	D	0	0.1	0.1	-0.7	0.1	0.3	-0.1	-0.3	-0.5	-0.2	-0.2	-0.4	0.2	-0.1	0.1	-0.3	-0.9
	E	-0.9	-0.2	-0.5	0.1	-0.5	0	-0.1	0.2	0.2	-0.4	0	-0.5	-0.1	-0.2	0.1	-0.3	0.2
	F	-0.6	-0.2	0	-0.3	0.2	0.2	-0.5	-0.7	0.2	-1	-0.2	-0.5	-0.1	-0.3	-0.1	-1	0.2
	G	0	0.2	0.2	0	-0.2	-0.3	0.2	0.3	0	0	-0.5	0.1	0.2	0.1	0	0	0
	H	0.1	0.1	0.2	-2	0.2	0	0	-1	-0.4	0.1	0	0	0.1	0.2	-0.7	0.1	-0.1
	I	0	0.1	-0.3	-0.3	-0.4	0.1	0	0.1	-0.1	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	0	-0.2	0
	J	0	-0.1	0.1	0	0	0	0	0	0	-0.1	-0.1	0.1	-0.2	-1.4	-1.1	-0.5	-0.1
	K	-0.7	-0.2	-0.6	0	0	-0.2	0	-0.2	0.1	0	-0.1	-0.1	0	0	0	-0.8	-0.1
	L	0	0	0	-0.4	-1.8	-0.1	0	0	-0.1	0	-0.1	-0.1	0.2	0	-0.1	0	0.1
	M	-1.5	0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.2	-0.2	-0.4	0.1	-0.1	0	0.1	-0.6	0.1	-0.1	-0.2	0
Q=40 l/s T=10 min	A	-0.3	-2.6	0	0.1	0	-0.2	0	0	0	0	0	0	-0.1	-1.6	0	-0.1	
	B	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	0	-1	-0.1	0	-0.1	-0.3	0	0	-0.3	-0.5	0.2	0
	C	0	-0.1	0	0	-0.1	-0.2	-2.6	0	0	-0.2	0	-0.2	-0.2	0	0	-0.4	-0.5
	D	-0.2	-0.4	0	-0.2	-0.3	-0.2	0	0.1	-0.9	-0.5	0	-0.5	-0.2	0.2	0	0	-0.4
	E	-0.1	0.2	0	-0.3	-0.2	0.2	-0.8	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.5	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.3
	F	0	-0.8	-1.4	-0.1	0	0	-0.3	-0.2	0	0	0.1	-0.1	0	-0.1	0	-0.2	-0.2
	G	-0.3	-0.3	-0.2	0.2	0	0	0.1	0	-0.1	-0.2	0	0	0	0	0	-0.3	-0.1
	H	0	-0.1	0	-0.8	0	0	-0.8	0.1	-0.1	-0.1	-0.6	0.3	-0.6	-0.4	0.1	-0.3	-0.3
	I	0	0	0.1	0	0	-0.5	0.3	0	-0.2	0	0.3	-0.2	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4
	J	0	0.1	-0.2	0.2	0.2	-0.1	0	0	0	-0.4	-0.3	-0.3	0	-0.9	-0.2	0	-0.4
	K	-0.6	0	-0.2	-0.4	-0.5	0	-0.1	-0.2	-0.8	-0.1	0	0.1	0.1	-0.4	0.1	0	0
	L	0	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.3	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	0
	M	-0.2	-0.8	0.1	-0.2	0	-0.4	-2.2	0.1	0.2	0	-0.4	-0.1	0.3	0	-1.3	-0.2	0

TABLA H-6 Profundidad de erosión en la fase I para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=40 l/s T=30 min	A	-0.1	0	0.9	0	0.1	0	0	1.5	-0.5	-0.5	-0.4	0	-1	-0.1	-1	0	-0.1
	B	0	0	-0.5	-0.9	0.1	0.2	0.1	-0.2	-0.3	-0.4	0	0.1	-0.2	0	-0.1	-0.2	0.3
	C	-0.6	0	-0.9	-0.4	-0.1	0	-1.6	-0.2	0.1	-0.6	-0.1	0.2	0	-0.5	-0.1	-0.5	0.1
	D	-0.3	-0.4	-1	-0.7	-0.6	-0.1	0	-0.5	-0.5	0	-0.6	0.2	0.1	-0.9	-0.6	-0.7	-0.6
	E	-0.5	-0.1	0	-1	0.2	-0.2	0	-0.5	-0.1	0.2	-0.4	0	-0.5	0.2	-0.8	0	-0.4
	F	0.1	0	-0.8	0	-0.6	-0.1	0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.4	-0.3	-0.2	-0.6	0.1	0.1	-0.8
	G	-0.5	0	-0.6	-0.2	0	0	0	-0.8	0	-0.3	-0.1	-0.2	-0.2	-0.7	-0.1	0.1	0
	H	-0.1	0	-1.4	-0.2	0.2	0.1	-0.2	0.1	-0.1	-0.1	0	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0	-0.6
	I	-0.5	-0.2	-0.1	-0.2	0	0.1	-0.2	-0.3	-0.2	-0.5	-0.6	-0.2	-0.8	0.3	0	-0.3	-0.3
	J	-0.2	0	0.2	0	0.2	0.1	-0.1	-0.3	-0.4	0.2	-1	0	-0.3	-0.8	-0.2	-0.2	-0.1
	K	0.1	-0.7	-0.2	0.1	0	-0.1	0.1	0	0.1	-0.1	-0.2	0	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1
	L	-0.6	0.1	0.1	-0.6	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0	-0.6	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0	-0.1
	M	-0.4	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	-0.6	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1
Q=40 l/s T=60 min	A	-0.8	-0.6	0.2	0.1	0.1	-1	0.3	0	0	-0.8	-0.2	-1	0	-0.1	-0.4	-0.5	-0.1
	B	-0.4	-0.8	-0.2	0.1	-0.4	-0.3	-0.5	-0.7	-0.3	-0.2	-0.3	-0.1	-0.8	-0.4	-0.4	0	0.1
	C	-0.8	-0.7	-0.7	-3.4	-0.8	-0.9	-0.4	-0.9	-0.6	-0.6	0.2	0	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.2
	D	-1.1	-0.2	-1	-0.7	-0.7	-0.4	-0.6	-0.2	0	-0.2	0	-0.9	0	-0.5	0	0.1	-0.5
	E	-0.7	-1.1	-1.1	-0.4	-0.7	-1.1	-0.1	0	-0.4	-0.3	-0.5	-0.4	-0.9	-0.1	-0.3	0	-0.2
	F	0.1	-0.6	-0.1	-0.5	0.1	-1	-0.5	-0.2	-0.7	-0.5	0.5	-0.6	-0.1	-0.6	-0.3	-0.5	-0.4
	G	0.2	-0.2	-0.4	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.6	-0.3	0.3	-0.6	-0.5	-0.3	-0.6	-0.5	-0.5
	H	-0.4	0	-0.1	-0.4	-0.4	0.3	-0.9	-0.7	-0.7	-0.1	0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	-0.2
	I	-0.3	0.2	-0.4	-0.4	-0.8	0.2	-0.5	-0.8	-0.3	-0.1	-0.1	-0.6	0.3	0.1	-0.5	0	0.2
	J	-0.1	-0.8	-0.5	0	-0.9	-0.3	-0.4	-0.6	0.2	-0.8	0.3	-0.2	0.3	0	0.1	-0.6	-0.5
	K	-0.4	-0.1	-0.6	-0.6	-0.2	0.1	-0.1	-0.6	-0.6	0.2	-0.5	0	-0.5	-0.2	-0.6	-0.5	-0.6
	L	0.1	0.1	0.6	-0.1	-0.4	0.1	-0.2	0	-0.1	-0.4	-1	-1	-1	-0.3	-0.5	-0.5	-0.5
	M	0.2	-0.4	-0.6	-0.2	-0.7	0	0.4	-0.5	0	0	-0.2	-0.6	0.1	-0.5	-0.9	-0.4	-0.1

TABLA H-7 Profundidad de erosión en la fase I para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=55 l/s T=10 min	A	0.1	-0.1	0	0.1	0.2	0	0	0	-0.1	0	-0.1	0	-0.4	0	-0.5	-0.4	0.1
	B	0.1	0	-1.8	0.1	0.2	0.1	0	-0.2	0.2	-0.8	0	0.2	0	0.1	-0.5	0.1	0
	C	-0.6	-0.2	0	-0.1	0	-0.4	-0.7	0	0	-0.2	0.1	0	0	-0.4	0.1	0	-0.6
	D	0	0	0.1	-0.1	0.1	0.1	0	-0.1	0	0.1	-0.9	0	0.1	0.1	0.1	-0.3	-0.3
	E	-0.2	-0.3	-0.3	0	-0.1	-0.2	-0.5	-0.3	-0.1	0	0.1	0.1	0.1	-0.2	0.1	0.1	0
	F	-0.5	-0.4	0	0.1	-0.3	-0.8	0	-0.6	-0.1	-0.1	-0.5	-0.4	-0.3	0.1	0.1	-0.7	-0.2
	G	0	-0.4	-0.4	-0.6	-0.4	0	-0.5	-0.1	-0.5	-0.2	-0.3	0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	-0.1
	H	0.2	-0.6	-0.3	-0.3	0	0.1	0.2	0.1	-0.5	-0.1	-0.4	0.2	-0.3	-0.1	-0.3	0.1	0
	I	0	-0.2	0.2	0	0	0.2	-0.6	0	-0.1	-0.3	-0.6	0.1	-0.1	-0.2	-0.1	0	0.1
	J	0	-0.5	-0.3	-0.1	-1.3	-0.3	-0.1	-0.4	0	-0.6	-0.4	0	0.2	-0.4	0.1	0	0
	K	0.1	0.2	0.2	0	-0.5	0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0	-0.7	0.1	-0.4	0	0.1	0.1
	L	-3	-0.2	-0.3	-0.1	0.1	0	-0.7	-0.3	-0.1	-0.5	-0.2	-0.3	0.1	-0.1	-0.1	0	-0.8
	M	-0.6	-0.1	-0.5	-0.1	0	0.1	-0.2	-0.3	-0.1	-0.3	-1.2	-1.8	0.1	-0.7	0.1	-0.3	-0.1
Q=55 l/s T=30 min	A	0	-1.3	-0.3	0.2	-0.5	-0.1	0.1	0.6	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.6	-0.1	-0.3
	B	0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.2	0.1	-0.2	-0.1	-0.2	0	0.1	-0.1	-0.4	0	0.2	0.1	0.2
	C	-1	-0.2	-0.1	0	-0.1	0.1	0.1	-0.9	0.1	0.1	-0.1	-0.2	0	-0.2	0.2	0.1	-0.2
	D	0	-0.1	-0.2	0.2	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0	0	0.1	0.1	-0.1	-3.4	-0.4
	E	-0.1	-0.9	-0.2	-0.2	0	0	0.2	0.1	0	0.2	0	0.1	0.1	-0.1	-0.3	0	0.1
	F	-0.2	-0.4	-0.4	0.1	-2.2	0.1	-0.3	-2.1	0	0	-1.1	0.1	0	0	-0.1	0.2	-0.2
	G	0.2	0	-0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.2	-0.2	-1.1	0.2	0	0	0	0	0.2
	H	-0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	-0.2	-0.4	0.1	0.1	0.1	-1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.4
	I	-0.1	-0.2	0.1	-0.2	0.1	0.1	0.1	-0.5	0.1	-0.1	0	0.1	0	0.1	0.2	-0.2	0.2
	J	-0.3	0	0.3	-0.1	-1.7	-0.1	0	0.3	-0.1	0.1	-0.2	0	0.2	0.1	-0.2	-0.2	-0.5
	K	0	-0.5	0.1	0.1	-0.3	-0.5	0.1	-2	-0.1	0.1	-0.7	-0.8	-0.3	0.2	-1.1	-0.2	-0.1
	L	0	0	-0.2	-0.6	-0.3	0.1	-0.1	-0.5	-0.1	-0.1	-0.8	-0.2	-0.3	0.1	0	0	0.1
	M	-3.1	-0.1	-0.9	-0.1	-0.3	0.1	-3	0	0	0.1	-3.8	-0.8	-0.7	0	-0.4	0.1	-0.1

TABLA H-8 Profundidad de erosión en la fase I para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=55 l/s T=60 min	A	-0.1	0.2	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.2	-0.2	0	-0.9	-0.2	-0.1	0	-0.3	0.1	-0.3	0.3
	B	-0.2	-0.1	0	0.1	0.1	-0.3	0.1	-0.2	0.1	0.1	0	-0.8	-0.3	0.1	-0.1	-0.5	-0.3
	C	-0.3	0.1	0	-0.1	0	-0.2	-2.9	-0.1	0.1	-0.4	-2.2	-0.3	-0.5	0.1	-0.3	-0.1	0
	D	-0.1	-0.6	-0.1	-0.1	-0.2	0	0.1	0.2	-0.7	0.1	-0.3	0	-0.3	-0.4	-0.2	-1.3	-0.7
	E	-1.1	0.6	0.1	-0.5	-0.3	-0.2	-0.2	0	-0.3	-0.3	-0.4	-0.2	-0.3	0.1	-0.3	-0.6	-1.3
	F	-0.4	-0.6	-0.2	-0.4	0.1	0	-0.2	-0.3	-1.9	0.1	-0.2	0.1	-0.2	-0.7	-1.2	-1.5	-0.3
	G	0.1	0	-0.2	0	-0.1	0	-0.2	0	0.2	-0.8	-0.6	-0.3	0.2	0.1	-0.1	-0.3	-0.2
	H	-0.5	-0.2	-1	-0.6	-0.2	-0.4	-1.3	0	0.3	0	0.1	-0.3	0	-0.4	-0.8	-0.9	-0.6
	I	0	-0.3	-0.5	0.1	-0.6	-0.9	0.1	-0.1	-0.7	-0.1	0.2	0.5	-0.6	0	-0.1	-1.6	-1
	J	-0.6	0.1	-0.2	-0.6	-1.8	0.2	-1.5	0.1	-0.4	0.3	-0.1	-0.3	-0.7	-0.9	-0.4	0.2	-1.2
	K	-0.3	-1.2	-0.8	-0.4	-0.4	-0.4	0	-1.2	-0.2	-0.3	0	-0.1	-0.4	-1	-1.7	-1	-0.9
	L	-2.1	0	0	-0.8	-0.7	-0.1	0	-1.1	-0.3	-0.4	-2	-0.6	-0.8	-0.1	0.1	-0.9	-2.3
	M	-1.9	-0.5	0.1	-0.5	-0.7	-0.4	-0.8	-0.2	-0.9	0	-0.5	-0.4	-0.1	-0.6	-0.7	-1.3	-0.8
Q=70 l/s T=10 min	A	0.1	-0.4	-0.3	-0.1	-0.2	-0.3	0	-0.4	0.1	0.2	-0.1	0	0	-0.1	0	0.1	-0.1
	B	-0.1	-0.2	-0.4	0	0.1	-0.2	-0.5	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2	-0.6	-0.2	-0.1
	C	0	-0.3	-0.3	-0.3	-0.1	-0.4	-0.6	-0.6	0	0	0.1	-0.3	0	0.2	-0.4	-0.3	-0.2
	D	-0.4	-0.1	-0.1	0	-0.2	0	-0.3	-0.2	0.1	-0.1	0	-0.4	0.1	-0.3	-0.3	-0.1	-0.3
	E	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	0	0.1	-0.1	0.1	-1	0	-0.2	0.1	-0.2	0	-0.4
	F	0	-0.8	-0.5	0.2	-0.1	-0.3	0	-0.2	-0.5	0.1	-0.2	0.1	0.2	-0.3	0	-1	-0.1
	G	-0.1	0	0.1	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	-0.4	0	0.1	0	-0.2	-0.4	-0.2	0
	H	-0.1	0	-0.4	0	-0.3	-0.3	-0.2	0.1	0.2	-0.2	0.1	-0.6	-0.5	-0.1	0	-0.2	-0.6
	I	-0.1	-0.5	-0.4	-0.4	-0.2	0.2	-0.5	-0.3	-0.1	-0.1	-0.4	-0.2	0.1	0	0	-0.6	-0.4
	J	0	-0.3	0	-0.2	0.1	-0.1	0	0.1	0.1	-0.5	-0.6	0.1	-0.1	-0.2	0.1	0.4	-0.2
	K	-0.3	-0.1	-1.2	-1.5	-1	-0.3	0	-0.3	0.1	-0.2	0	0.1	-0.1	-0.1	-1.1	-0.1	-0.6
	L	0	0.1	-0.1	-0.1	-0.2	0	0.1	0	0	-0.2	-0.1	0.1	-0.2	-0.1	0.1	0.1	-0.1
	M	-0.4	0.1	-0.1	-0.1	-1.3	0	0	0	0.1	0	-0.2	0	0	0	-0.7	0	0

TABLA H-9 Profundidad de erosión en la fase I para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=70 l/s T=30 min	A	0.1	-0.1	0	0	-0.1	-0.3	0.1	0	0.1	-0.5	-0.2	0	0	0	0	0.1	-0.3
	B	-0.4	0	-0.1	0	-0.1	0.1	0.2	0	0.1	0	0.2	-2	0.1	-0.3	-0.2	0.2	0.1
	C	0.1	0.1	0	0.1	0	0	0.1	0.1	0	0.1	-0.1	0	0.1	-0.1	0.2	0	0
	D	0.1	-0.1	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0.2	0.2	0	0.1	0.1	0	0.2	0.1	0.1
	E	-0.1	0.1	0	0.1	0	0	-0.2	-0.1	-0.3	0.1	0.2	0.2	-0.1	0	-0.3	-0.4	-0.5
	F	0.1	-0.7	0	-0.3	-0.1	-0.5	-0.3	-0.7	-0.3	-0.1	-0.1	0.2	-0.2	0	0.2	-0.3	-0.6
	G	-0.9	0.1	-0.4	-0.3	-0.1	0	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	-0.4	0	-0.4	-0.2	0	-0.1	-0.6
	H	-0.7	0.1	0.1	-0.2	0	-0.4	-0.2	-0.7	-0.1	0	-0.2	0.2	0.1	0	-0.4	-0.1	0
	I	0.1	0	-0.8	-0.3	-0.6	-0.1	-0.3	-0.3	-0.1	-2.8	-0.8	-0.9	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1
	J	0.1	-0.1	-0.3	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0	-0.1	-1.6	0.1	-0.1	0.1	0	-0.1	-1	0.1
	K	0.1	-1.4	-0.5	0	0	0	-0.3	0.1	0.1	-0.3	0	-0.1	-0.3	-0.7	-1.4	-0.3	-0.5
	L	-0.1	0.1	-0.1	0	0	0.1	0.2	0.1	-0.5	0.1	0	0.2	-0.3	-0.1	0	0	-0.4
	M	0	-0.2	0.1	0.1	-0.9	0	-1.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.4	-0.1	-0.1	-0.1
Q=70 l/s T=60 min	A	-0.2	-0.6	-0.3	-0.3	-0.5	-0.2	0.1	0	0.1	0.1	-0.3	0	0	0.2	-0.3	-0.8	-0.1
	B	-0.4	0	-0.1	0.1	-0.2	-0.3	-0.2	0	-0.1	-0.7	-0.3	0.2	0	0.1	-0.2	0.1	-0.1
	C	-0.2	0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	0	-0.4	0.1	-0.2	-0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.3
	D	0.1	0	-0.2	-0.5	-0.2	-0.1	0.1	-0.2	-0.1	0	0.1	0.1	-0.2	-0.3	-0.6	-0.4	0.2
	E	0	-0.4	-1.5	-0.1	-0.3	0	0	-0.3	0.1	0.1	0.2	0	-0.2	-0.3	-0.2	-0.8	-0.1
	F	-0.1	-1.4	0	-0.4	0.2	-0.4	0.1	0.2	0.1	-0.1	-0.3	0.3	0	0.2	-0.2	-0.7	-0.3
	G	-0.2	-0.9	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.2	-0.1	-0.1	0	-0.2	-0.2	-0.4	-0.2
	H	0.1	-0.1	0.1	-0.5	-0.2	-0.6	-0.2	0.1	0.1	-0.1	0.2	0.1	-0.1	0.1	-0.4	-0.8	0
	I	0.1	0	-0.8	-0.1	0.2	-0.9	0	-0.1	-0.1	0	0.3	-0.1	0	-0.3	0.1	0.2	0.1
	J	-0.1	-0.8	-0.5	-0.3	0.2	-0.1	0.2	-0.1	0.1	-0.9	0	-0.3	-0.5	-1.4	0	-1	-0.2
	K	0.1	0.2	-0.5	0	-0.4	-0.1	0.1	-0.3	0.2	-0.1	-0.1	-1	0	-0.1	0.1	-0.1	-1
	L	-0.2	-0.1	0	0.1	0	0	0.1	0.1	-0.3	0.1	0.1	0.1	0.2	-0.2	-0.1	-0.7	0.1
	M	0	0	0	-0.3	-0.8	-0.3	-0.3	-0.5	0	-0.5	-1.1	-0.5	-0.1	-1	0	-0.1	-0.1

TABLA H-10 Profundidad de erosión en la fase II para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=10 l/s T=10 min	A	-0.5	-1.8	0	0	0	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.3	-0.4	0.1	0.1	-0.1	0	0	-0.1
	B	-0.6	-0.6	-1.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.8	0	0	0.1	-0.1	-0.1	-0.2	0.1	0	-0.1
	C	-0.7	-1.2	0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.4	-0.5	0.4	0	-0.5	0	0	0	-0.1	0.1	-0.1
	D	-0.1	-0.2	-1.3	-1.7	-0.4	-0.4	0	0	-0.7	0	-0.3	-0.2	0	0	-0.1	-0.1	-0.1
	E	-0.4	0	-0.9	-0.5	-1.4	-0.5	-0.2	-0.3	0	-0.1	0	-0.3	0	0	0	-0.2	-0.1
	F	0	0.1	-0.1	-0.2	-0.7	-0.2	-0.4	-0.8	-0.1	-0.75	-0.4	0.08	-0.4	-0.8	-0.2	0	-0.3
	G	-2.4	0	-0.7	-0.2	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.1	-0.4	0	-0.5	-0.7	0	0	-0.6
	H	-0.3	0	0	-0.1	0	0	0	0	-0.1	-0.2	0	-0.1	0	0.1	0	0	0
	I	-0.5	-0.1	0	-1.5	0.1	0	0	-0.22	0	-0.3	0.2	-0.2	-3	0.1	0.1	-0.1	0
	J	0	-0.4	0	0	-1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	-0.1	0	-1	-0.3	-0.2	-0.3	-1.1	0.1
	K	-0.4	0	0	0	0	0	-0.1	0.1	0.1	0	-0.1	0.1	0.1	0	0	0	-0.2
	L	-0.9	-0.5	-0.3	-0.8	-0.2	-0.3	-0.6	-0.1	-1.3	-0.6	-0.9	0	-0.3	-0.2	-0.2	0	0
	M	-1.4	0	-0.1	0	-0.6	-0.1	-0.2	0	-0.3	0	-0.1	-0.5	-0.9	-0.2	-0.1	-1.1	-0.2
Q=10 l/s T=30 min	A	0	-0.1	0	-0.2	0	0	-0.2	0	-0.4	0.2	0	-0.5	-0.1	-0.2	0	0	0.1
	B	-0.3	0.1	0	0	0	0	-0.3	0.1	-0.3	0.1	0	0	-0.1	-0.6	-0.2	0	-0.3
	C	-0.5	-0.1	0.1	0.1	-0.3	0.1	-0.3	0.1	-0.5	0	-0.5	-0.5	-0.1	0	-0.2	0.1	-0.4
	D	0	-0.3	-0.6	-0.4	0	-0.2	-1	-0.3	-0.1	0.1	0	-0.1	-0.5	-0.1	0	-0.7	-0.2
	E	-0.1	-0.5	-0.3	0	-0.2	-0.5	-0.1	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	0	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5
	F	0.1	-0.5	-0.5	-0.2	-0.2	0	-0.5	-0.8	-0.4	-0.8	0	0.1	-0.3	-0.6	-0.7	0.1	-0.2
	G	0	-0.1	0.4	0.2	0.1	-0.1	0	-0.1	-1.4	-0.1	-0.5	0	0	0	-0.3	-0.6	-0.6
	H	0.1	-0.9	-0.1	0	-0.5	0.2	0	-0.7	-0.8	-0.2	0	0	0.1	0.1	-0.6	0	-0.2
	I	-0.1	-0.1	-0.4	-0.8	-0.4	-0.2	0	-0.3	-0.5	-0.4	-0.9	-0.3	-1	-0.9	-0.6	0.1	-0.2
	J	-0.1	0	-0.5	-0.4	0	-0.1	-0.2	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	0	-0.4	0.1	-0.2	0	-0.4
	K	-0.1	0	0	-0.1	-0.6	0	-1.2	-1.1	-0.5	-0.1	0	0.3	0	-1.3	0	-0.3	-1.1
	L	-0.1	-0.2	-0.1	-0.5	0	-0.3	-0.6	-0.5	-0.4	0	-0.7	0	-1.8	-0.4	-0.5	-0.2	-0.3
	M	-0.3	-0.1	-0.2	-0.1	-0.8	0	-0.6	0	-0.3	-0.5	-0.3	0	-1.3	0.2	-0.1	-1.4	-0.1

TABLA H-11 Profundidad de erosión en la fase II para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=10 l/s T=60 min	A	0	-0.7	-3.6	-0.2	0	-0.9	-0.7	-1.6	-0.6	0.2	-1	-0.2	-0.8	-0.3	-0.6	-0.2	-1
	B	-0.5	-0.5	-1.1	0	-1.2	0	-1	-1.4	-1.1	-1	-0.2	-0.4	-0.5	-1.2	-0.2	-0.2	-0.8
	C	-0.9	-0.9	0.1	-0.4	-0.3	-0.5	-0.4	0.1	-1	-0.1	-1.4	-0.9	-0.6	-0.5	-0.65	0	-0.4
	D	-0.4	-0.8	-0.6	-1.1	-0.5	-0.5	-1.9	-0.5	-0.4	-0.5	-0.9	-0.6	-0.6	-0.1	-0.5	-0.7	-1.3
	E	-0.3	-1	-1.2	-0.5	-0.9	-0.5	-0.1	-0.2	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.6	-1.1	-1
	F	0	-0.5	-1.2	-0.5	-0.6	-0.2	-0.8	-1	-1.6	-1.4	-0.1	-0.4	-0.6	-0.8	-0.8	0.2	-0.6
	G	-0.1	-0.1	-0.4	-0.3	0	-0.2	-0.2	0	-1.3	-0.5	-0.7	-0.3	0	-0.5	-0.7	-0.6	-0.6
	H	-0.2	-1.1	-0.1	-0.3	-1	0.2	-0.3	-0.7	-0.8	-0.3	-1.1	0	0	-0.8	-0.6	0	-0.2
	I	0	-0.1	-0.9	-0.8	-0.5	-0.2	0	-0.4	-0.6	-0.4	-1.4	-0.7	-1	-0.9	-0.5	-0.2	-0.7
	J	-0.2	-0.1	-0.3	-0.8	-1.3	-0.4	-0.4	-0.6	-0.9	0.2	-0.6	-1.1	-0.2	0.2	-0.2	-2.6	-0.3
	K	-0.6	-0.1	-0.4	-0.3	-0.6	0	-2.2	-1.1	-1	-0.1	-0.3	0.3	-0.8	-1.3	-0.1	-0.9	-0.7
	L	-0.7	-0.4	-0.4	-0.6	0	-0.3	-0.4	-1	-1.3	-0.7	-0.7	0	-3.2	-0.3	-0.5	-0.1	-0.4
	M	-1.6	-0.4	-0.6	-0.3	-1	-0.4	-0.9	0	-0.3	-0.5	-0.2	0.1	-2.6	-0.5	-0.4	-2.4	0
Q=20 l/s T=10 min	A	-0.7	-0.2	-1.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	0.2	0	0.2	0	-0.4	-0.5	0	-0.2	-0.1	-0.3
	B	-0.5	0	-0.6	-0.8	0	-0.2	0.1	-0.9	-0.1	-0.3	-0.1	-0.3	-0.6	0.1	-0.2	-0.1	-0.2
	C	-0.2	-0.2	-0.2	0	-0.1	0.1	-0.1	-0.7	-0.2	0	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	0.1	0.1	-0.1
	D	0.1	-0.4	-0.9	-0.1	-0.7	-0.2	0	-0.1	-0.7	0	-1.3	-0.7	-0.6	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2
	E	-0.4	0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.1	-0.5	-0.1	0.1	0.1	-0.6	-0.3	0	-0.3	-0.1	-0.2	-2
	F	-0.4	0	-0.6	-0.2	0	-0.8	-0.1	-0.4	-0.4	-0.2	-0.4	0	-0.4	-0.1	-0.1	0	0
	G	0	0	-0.1	0	-0.4	-0.1	0	-0.2	0	0.1	-1	0	-0.2	-0.1	0.1	-0.2	0
	H	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	0	-0.2	-0.7	0	-0.7	-0.3	-0.2	-0.9	0	-0.3	-0.3	-0.6	-0.3
	I	-0.2	-0.4	0	-0.2	-0.1	0.1	0.1	0.1	0	-0.1	0.1	-0.4	-0.3	-0.1	-0.1	0	-1.1
	J	0	0	0	0	-0.5	0	0.1	-0.4	0	0	0	-0.7	-0.1	-1.2	0	0.1	1.3
	K	-0.4	-0.1	0	0.1	-0.1	-0.2	-0.5	-0.5	0.1	-0.5	0.1	0	-0.1	-0.3	0	-0.1	0
	L	-0.2	-0.3	0	-0.3	0	-0.1	-0.2	0	-0.7	0	0.1	-0.4	-0.4	-0.4	0	0	-0.3
	M	0.4	-0.2	-0.6	0	-2.2	-1.3	-0.9	-0.1	0	0	0.2	-0.1	0	-0.5	0	-0.1	0.1

TABLA H-12 Profundidad de erosión en la fase II para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=20 l/s T=30 min	A	-0.6	-0.1	0	-0.7	-0.8	0.1	-0.3	-0.8	-0.5	-0.7	-0.2	-0.2	-0.6	0	-0.4	-0.1	-0.6
	B	0.1	-0.6	-1.1	0.1	-0.3	-0.3	0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.5	0	0.1	-0.1	-0.3	0	0.1
	C	-0.4	0	-0.4	0.1	-0.6	-0.3	-0.5	-0.2	-0.8	-0.1	-0.3	0	-0.2	-0.5	-0.5	-0.3	-0.3
	D	0	-0.9	-0.1	-0.8	-0.4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0	-0.2	-0.1	-2.3	-0.4	0	-0.4	0
	E	-0.4	-0.5	-0.5	0	-0.1	-0.4	0	0	0	0.1	0	0.1	-0.2	0.3	-0.1	-1	-1.8
	F	0	0	0	-0.1	-0.1	0.1	0.1	-0.1	-0.9	-0.1	0	0.1	0	0.1	-0.1	-0.1	-0.6
	G	-0.3	0	-0.2	0	0	-0.1	-0.1	0	0.1	-0.2	0.2	0	-0.3	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1
	H	0.1	-0.2	0	0	-0.1	-1	0	-0.3	-0.8	0	-0.3	0	-0.2	-0.2	0.1	0	0
	I	0	0	0	-0.8	0.1	-0.2	0.2	0	-0.3	-0.1	-0.1	-0.3	0	0.1	0.1	-0.3	0
	J	0.1	0	0	0.2	-0.2	-0.1	0	-0.6	0.1	0.1	-0.1	0.1	0	-0.3	-0.2	0	-2.3
Q=20 l/s T=60 min	K	0	0	0	-0.2	0.1	0	-0.1	0	0	-0.1	-0.1	-0.6	0.1	-0.1	0.1	0.1	0
	L	-0.5	0.1	0	0	-0.4	0.2	0	-0.1	0	-0.1	-0.4	-0.2	0	-0.1	0	-0.1	-0.1
	M	0.1	-0.1	0	-0.2	0	-1.5	0.2	0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2	1	-0.1	-0.1	0.1	0
	A	-0.2	-0.2	0	-0.1	-0.2	0	-0.2	0	0.1	0.1	0.1	-0.5	0.3	-0.3	0.1	-0.2	-0.5
	B	-0.1	-0.1	0	-0.5	0	-0.2	0.2	-0.1	0	-0.1	-0.2	-0.5	0	0	0.2	-0.3	-0.4
	C	0	0	-0.1	0	-0.1	0	0.1	-1	0	-0.2	0	0.1	0.1	-0.2	0	-0.2	0.1
	D	0.1	-0.1	-0.5	-0.4	-1.3	0.1	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	0	-0.1	-2.4	0	0.1	0.1	-0.1
	E	-0.2	0.1	0	-0.5	0.1	-0.1	-0.5	0	0	-0.1	0.1	-0.6	0.1	-0.6	-0.1	0	-0.2
	F	-0.1	-0.1	-0.3	0	-0.3	0.1	-0.6	-0.3	0	0	0.1	0.1	0	0	0	0	-0.5
	G	0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	0	0.1	0	0	0	0	0	0	-0.3	0.1	-0.2
Q=20 l/s T=60 min	H	0	-0.1	-0.1	0	-0.2	-1	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0	0.1	-0.1	0.1	0	0	-0.3
	I	-0.7	0	-0.7	-0.2	-0.3	-0.1	-0.1	0.1	-0.2	-0.6	0.1	0.1	0	-0.2	0.1	0	-0.1
	J	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	0	-0.1	-0.1	0	-0.2	0.1	-0.2	0.1	-3	0.1	0.1	-0.2
	K	-0.2	-0.1	-0.1	-0.3	-0.2	-0.2	-0.5	-0.5	0.1	0	-0.2	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1	0
	L	0	-0.3	0.1	-0.3	0.2	0	0	0	0	-0.1	0	-0.1	-0.2	-0.2	0.1	-0.1	-0.1
	M	0	0	-0.2	-0.1	0	-0.1	-0.1	0.2	0	0.1	0.1	0	-0.5	-0.2	0.1	0	0.2

TABLA H-13 Profundidad de erosión en la fase II para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=30 l/s T=10 min	A	0.1	-0.3	-0.6	0.1	-0.9	0	0	-0.2	0.1	-0.1	0	0.1	-0.2	-0.2	0.1	0	0
	B	-0.2	0	0.1	-0.1	0	0.1	0	0	-0.2	0.1	0	0	0	-0.5	0.2	0	-0.2
	C	0.1	-0.1	-0.1	-0.5	0	-0.3	0.1	0	-0.1	-0.2	0.2	-0.1	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.1
	D	-0.1	0.2	0	0.2	-0.4	0	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	0.1	-0.3	-0.2	-0.5	-0.3
	E	-0.2	-0.1	0	-1.4	-0.1	0.1	-0.5	0.1	0	-0.3	-0.2	0.2	0	-0.3	-0.1	0.2	-0.1
	F	-0.3	-0.2	0	0	-0.1	-0.1	-0.4	-0.2	0	0.1	-0.2	0.1	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	-0.9
	G	-0.4	-0.1	-0.5	-0.3	-0.1	-0.2	-0.3	0	0.2	-0.4	0	-0.5	0.1	0.1	-0.9	-0.1	-0.4
	H	-0.2	-0.2	0	-0.9	0	-0.5	-0.3	-0.7	0	-0.3	0.2	-0.2	-0.6	0.1	-0.1	-0.6	-0.8
	I	-0.1	-0.2	-0.2	0	-0.2	-0.2	0.1	-0.2	-0.1	-0.2	0	-0.3	0.2	0	-0.1	0	0.2
	J	0.1	-0.1	0	0	0.1	-0.1	0	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2	0.1	-0.2	-0.2	-0.4	0.2	0.1
	K	0	0.1	0	0	-0.1	0	0.1	0	-0.3	-0.4	-0.3	0	0	-0.3	-0.5	-0.6	0.1
	L	-0.1	0	-0.3	0.2	0.2	0	0	-0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0.1	0.2	-0.2	0
	M	0.2	-0.1	0.1	-0.1	0	-0.2	0.1	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	0	0	0.1	-0.1	0	-0.2
Q=30 l/s T=30 min	A	-0.2	-0.4	-0.2	-0.7	0.1	-0.4	-0.1	0	0	0.2	-0.5	0.1	-0.1	0	0	-0.3	-0.5
	B	-0.3	0.1	0	-0.2	0.2	-0.3	0.1	0	0.2	0.1	0.1	-0.1	-0.3	0	0.2	0	0.1
	C	0	0	-0.1	0	0.1	-0.4	-0.1	0.3	0	0	-0.4	0.1	-0.5	-1.5	0.1	0	0
	D	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.6	-0.2	0	-0.1	-0.1	0	0.1	0.1	-0.2	0.2	-0.2	-0.2	-0.6
	E	-0.3	-0.1	-0.1	-0.4	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.1	0.3	-0.1	0	-0.4	-1.4	-0.3	0.1	0.1
	F	-0.4	0.1	-0.6	0	-0.2	-0.1	-1	-0.1	-0.1	-0.4	-0.2	-0.2	0	0.1	-0.3	-0.3	-2.2
	G	0.1	0	-5.7	-0.4	-0.7	-0.7	0	-0.2	0	0.1	0	0	0.1	0.1	-0.1	-0.1	-0.1
	H	-0.3	-0.3	-0.7	0.2	-0.2	-0.6	0.1	0.1	0	-0.3	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0
	I	0	0.1	-0.2	0	0	-0.2	-0.3	-0.5	0.1	0.1	-0.4	-0.5	-0.1	0.2	0.1	0	0.2
	J	-0.4	-0.4	0.1	-0.1	-0.1	-0.3	0.1	0	-0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.5	0.1	0.3	-0.1
	K	-0.4	-0.2	0	0.1	-0.3	-0.3	-0.5	-0.3	-0.2	0.1	-0.2	-0.2	0	0.1	-0.4	0	-0.9
	L	-0.2	0	0.1	-0.1	-0.1	-0.2	0	0	-0.1	-0.2	0	0	0.1	-0.1	-0.3	-0.4	0.1
	M	0	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	0	-0.1	0.1	0	0.1	-0.2	0.1	-0.2	0	0

TABLA H-14 Profundidad de erosión en la fase II para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=30 l/s T=60 min	A	0	0.2	-0.8	0.1	0	0.1	0.1	0.1	-0.6	-0.6	0	-0.3	-0.1	0	0.1	0	0
	B	-0.5	0	0	0.2	0	-0.3	-0.5	0.1	0.1	-0.2	0.2	-0.1	0	0.2	0.1	0	0.1
	C	-0.2	0.1	-0.3	0.2	0	0.1	0.1	0.1	-0.4	0.3	0.1	0.1	0.1	0	0	0.1	0.1
	D	-0.1	-0.1	-0.2	0	-0.3	0.1	0	-0.1	0	0	0	-0.4	0.1	0.2	-1.1	0.1	0.1
	E	-0.3	-1.2	0	-0.3	-2.1	-0.2	-0.2	0.1	0	0.1	0.2	0.1	0	-0.2	0.1	0.1	-0.5
	F	0.1	-0.2	-0.4	-0.1	-0.4	0.1	-0.6	0	-0.1	0.1	0.2	0.2	-0.1	0.3	-0.2	0	-0.6
	G	0.2	-0.1	-1	0	0.1	-1.1	0	0.2	0	0.1	0.1	0	0	0	0.1	0.1	0
	H	0	0.1	0	-0.4	0	0.1	0.1	0.1	0	-0.2	0	-0.2	0	-0.4	0	0.2	0.1
	I	0.2	-0.1	0.2	0	-0.2	-0.1	-0.2	0	-0.2	-0.2	-0.1	-1.3	-0.7	-0.2	-0.2	0	-0.3
	J	0	0	0	0.1	0	0.2	0	0	0.2	-0.1	0	0	0	-0.8	0	0	-0.5
	K	-0.1	-0.2	0	0.1	0.1	0	0.1	-0.6	-0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0	-0.1	0
	L	0	0	0.1	0	-1.7	-0.3	0	0	-0.5	0	0	0	0	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1
	M	0.1	0	0	0.1	-0.1	0	-1	0.1	0.1	-0.3	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0	0.1
Q=40 l/s T=10 min	A	-0.1	-0.1	0.1	0	0	0	-0.2	0.1	0.1	0.1	-0.3	0	0	0	0.1	0.1	0
	B	-0.1	0	0	-0.2	0	0.2	0.1	0.2	0.1	0	0	0.1	0	-0.2	-0.2	0	0.1
	C	0	0.1	0.1	-0.1	0	-0.1	0	0	-0.1	-0.1	0.1	-0.5	-0.1	-0.3	-0.2	-0.3	0
	D	-0.1	0.1	0	0.1	0	-0.2	0.1	0	-0.1	0	0.2	0	0.1	-0.1	-0.1	-0.3	0
	E	-4.7	0	0.1	-0.2	0.3	0	-0.1	0	0	-0.2	0	-0.3	0.1	0.2	-0.3	0.1	-0.1
	F	-0.1	0.1	-0.2	0.1	0	0.1	0	0.1	0.2	0	0.1	-0.5	0.1	0	0.2	0	0
	G	-0.6	0	0	0	0.2	0.2	0	0	0.2	0	-0.5	0.1	0	0	0.2	0	0
	H	0.3	0.1	0	0	0	0	0	0.2	0	0	-0.1	0.1	0.2	0.2	0	0.2	0.1
	I	0	-0.1	0	0.2	0.1	-0.2	0	0	-0.5	0	0	0	-0.2	0	-0.3	-0.2	-0.3
	J	0	0	-0.6	-0.3	-0.1	-0.3	0	0	0.1	0	-0.3	0.2	-0.1	0	-0.4	0	-0.1
	K	0.1	0.1	-0.7	-0.4	0.1	-0.1	0.1	-0.2	0	0.2	-0.6	-0.2	-0.3	-0.5	-0.2	0	0
	L	0.1	0	-0.3	0	0	-0.3	-0.4	-0.3	0	0	-0.2	-0.2	0	0	-0.8	0.2	-0.3
	M	0	-0.1	0.2	-0.3	-0.3	0.1	0	-0.1	0	0	-0.1	0.1	0	-0.1	-0.3	0	0.2

TABLA H-15 Profundidad de erosión en la fase II para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=40 l/s T=30 min	A	-0.6	0.1	0	0.1	0	0	0	-0.1	0.2	0.2	0	-0.6	-0.2	-0.1	0.2	-0.1	0.1
	B	-0.5	-0.8	0	0	0	-0.1	0	0.1	0.2	0.1	0	0.1	0.1	0.1	-0.2	0.1	-0.4
	C	0.2	-0.7	-0.1	-0.4	0.1	0.2	0.2	-0.1	-0.1	-0.8	0.2	-0.2	-0.1	0	0.2	-0.6	-0.3
	D	-3	-0.1	0	-0.6	0.3	-0.2	-0.2	0	0	-0.1	-1.5	0	-1.8	-0.4	0	0	-0.1
	E	-0.4	0.2	0.2	0.3	0	-0.1	-1	0	-0.4	0	-0.1	0.1	-0.4	0	0.1	0	0.3
	F	0	-0.8	0	0.2	0	-0.2	-0.5	0.2	0	-0.5	0	0.2	-0.6	0.1	-0.2	-0.4	0.1
	G	-1.1	-0.3	-0.8	-0.2	-0.1	-0.5	-0.2	0.1	0.2	0	-0.1	0	-0.7	-0.3	0	0.1	-0.2
	H	-0.1	0.1	-0.2	0.2	-2.5	0	-0.1	0.1	0	-0.1	0	-0.6	-0.1	-0.5	0	-0.6	-0.1
	I	0	-0.1	-0.1	-0.2	0.2	0.1	0.3	-0.1	0.1	-0.4	-1.2	0.1	0	0	0.1	0	0.1
	J	-0.3	0.3	0	0.1	0	0	-0.2	0	0.1	-0.2	0.1	0	0.1	0	0.2	0	-1.7
	K	0.1	0.2	0.2	0.2	-0.1	-0.5	0.2	-0.2	-0.2	-0.5	-0.6	0	0	-0.1	0	-0.4	0.2
	L	0.1	-0.1	0.2	2	0	-0.1	0.2	0.2	-0.9	-0.6	0.1	0.2	0.2	-0.4	-1.1	-0.4	0.3
	M	0.1	0	0	-1	-0.1	0	0	0.1	0	0.2	0.1	0	0	0.1	-0.1	-0.8	0.1
Q=40 l/s T=60 min	A	0.1	-0.1	-0.2	0	0.1	-0.2	0.1	0.1	-0.1	-0.3	-0.2	0	-0.3	0.1	0.2	-0.6	0
	B	-0.2	0.1	-0.4	0	-0.2	-0.1	-0.3	0.1	-0.2	0.1	-0.3	0	0.2	0	-0.3	-0.1	0.1
	C	0	0	0.2	-0.2	-0.3	-0.2	0	0.2	0	-0.1	-0.3	-0.3	0.1	-3.2	0.2	-0.4	0
	D	0.1	0.1	0	-0.1	0.1	0	0	-0.5	0	-0.1	0	0	-2.5	-0.1	-0.1	0.1	0.1
	E	-1.3	0	-0.1	0	0.2	-0.7	0.1	0	0	-0.2	-1.2	0.2	0.2	-0.1	0.1	0	0
	F	-0.3	0	-3.8	0	0	0.1	-3.7	0.2	0.1	0.2	-1.1	0	-1	-0.2	0.1	0	-0.8
	G	-1	-0.2	-0.7	-0.4	0	0	-0.4	-0.4	0	0	0	-0.3	-0.2	-0.2	0	-0.8	0
	H	-0.2	0.3	0.1	-0.2	0	0.1	0.2	-0.3	0.1	0.1	0.2	-0.2	-0.3	-0.1	-0.1	-0.4	0.1
	I	-0.3	0	0.2	-0.2	-0.5	-0.1	-0.3	0.1	0.2	-0.3	-0.2	0.1	0.1	0	0	-0.1	0.1
	J	0.1	0.1	0.2	0	0.2	0	0.3	0	-0.2	-0.3	-0.3	0.1	0	0	-0.2	0.1	0
	K	0	0	0.3	-0.4	-0.2	0.2	0.2	-0.2	0.1	-0.4	-0.2	-0.1	-1.2	-0.6	0	-0.8	0.1
	L	-0.3	-0.4	0.1	-1.6	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.5	-0.5	-0.2	0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	0
	M	-0.1	0	-0.3	-0.8	0	0	-0.1	0	0	0	-0.1	-0.3	-0.6	0.5	-0.1	1	-0.4

TABLA H-16 Profundidad de erosión en la fase II para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=55 l/s T=10 min	A	-0.3	0.1	0.1	-0.1	-0.3	0	0	-0.4	0	0.1	-0.8	-0.5	0	-0.4	-0.3	0	0
	B	0	-0.5	-0.2	-0.3	0.2	0	0	0.1	-0.2	-0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0	-0.1
	C	-0.2	-0.6	0	0	-0.1	0	0.1	0.2	-0.6	-0.1	0	0	-0.3	0.2	-0.1	-0.3	0.1
	D	0	0	-0.5	-0.7	0.1	0.2	0.1	0	0.1	-0.1	0.2	0	-1	0	-0.2	-0.1	0.1
	E	-4.5	-1	-0.3	0.1	0	-0.5	-0.3	-4.1	-0.9	0.2	0	-0.1	-0.6	-0.1	0.1	-0.5	-0.2
	F	-0.2	-1.2	-0.5	-0.2	0.2	-0.1	-1.1	-0.5	-0.1	-0.2	0.2	0	0	-0.1	-0.2	-0.3	0
	G	-3.7	-0.1	-1.3	0.1	0	-0.3	0.4	-0.2	-0.3	-0.2	0	-0.2	-0.3	0.2	-0.2	0	-0.5
	H	0	-0.3	-0.8	0	0	-0.1	-0.3	0.3	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	0.1	-1	-0.7	-4.2
	I	0.1	-0.2	0.1	0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.3	0.5	0.1	-0.1	0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.1	0
	J	0	-0.5	-0.3	0	-0.4	0	-0.2	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	0	-0.1	-0.3	0	0
Q=55 l/s T=30 min	K	0	-1.2	-0.6	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.4	-0.3	-0.6	-0.4	-0.1	-0.3	0	-0.3	0	-1.6
	L	0	-0.1	-0.2	-0.1	0	0	-0.1	-0.1	0	0.1	0.1	-0.4	0	0	0	0	0
	M	-2.1	0	-0.1	-0.1	0	0	-0.6	0	0.1	0	-0.1	-0.2	-0.8	-0.8	0	-0.2	0
	A	0	0	-0.1	0.2	-0.7	0	-0.1	0.2	-0.1	-0.5	0.1	-0.2	0	0.1	-0.1	0.1	0.1
	B	0	0.1	-0.3	-0.7	0	0	0.1	0.1	-0.3	0.1	-0.2	0	0.1	-0.6	-0.4	0	0
	C	0	0	0	-0.3	0	0	0.1	-0.1	-0.7	-0.1	-0.1	-0.3	0	0.1	0.1	-0.3	0
	D	-9.5	-0.6	-0.2	-0.1	0	-0.3	-0.1	-0.1	-0.4	0.1	-0.2	-0.1	0	0.1	-0.1	-0.1	0
	E	-2.2	-5.7	0	0.1	-0.2	-0.3	0	0	0	-0.6	0	-0.3	0	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2
	F	-5	-1.3	-0.8	0	-0.5	-0.2	0.1	-0.1	0	0	0	-0.2	0.1	0.2	0	0	0.1
	G	0	0	-5.3	-0.3	-0.1	-0.1	0	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	-0.1	0	0	0
Q=55 l/s T=30 min	H	0	0	0	0.1	0	-0.5	0.1	0	0.1	0	0	0	-0.1	0.1	0.2	0.2	0
	I	-2.1	-1.1	2	-0.4	0	0.1	-0.1	-0.4	0	-0.3	0.1	0	0.1	0.1	0.2	-0.1	-1.1
	J	-0.2	-0.1	0.2	-0.1	-0.2	0.1	0	0	0	0.1	-0.3	0.1	-0.2	0	0	0	0
	K	0	0.3	0.1	-0.2	0.2	-0.2	0.1	-0.2	0.2	0	-0.4	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0
	L	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	-0.6	0	0.1	-1
	M	0	0	0	0	-3.3	0.1	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.8

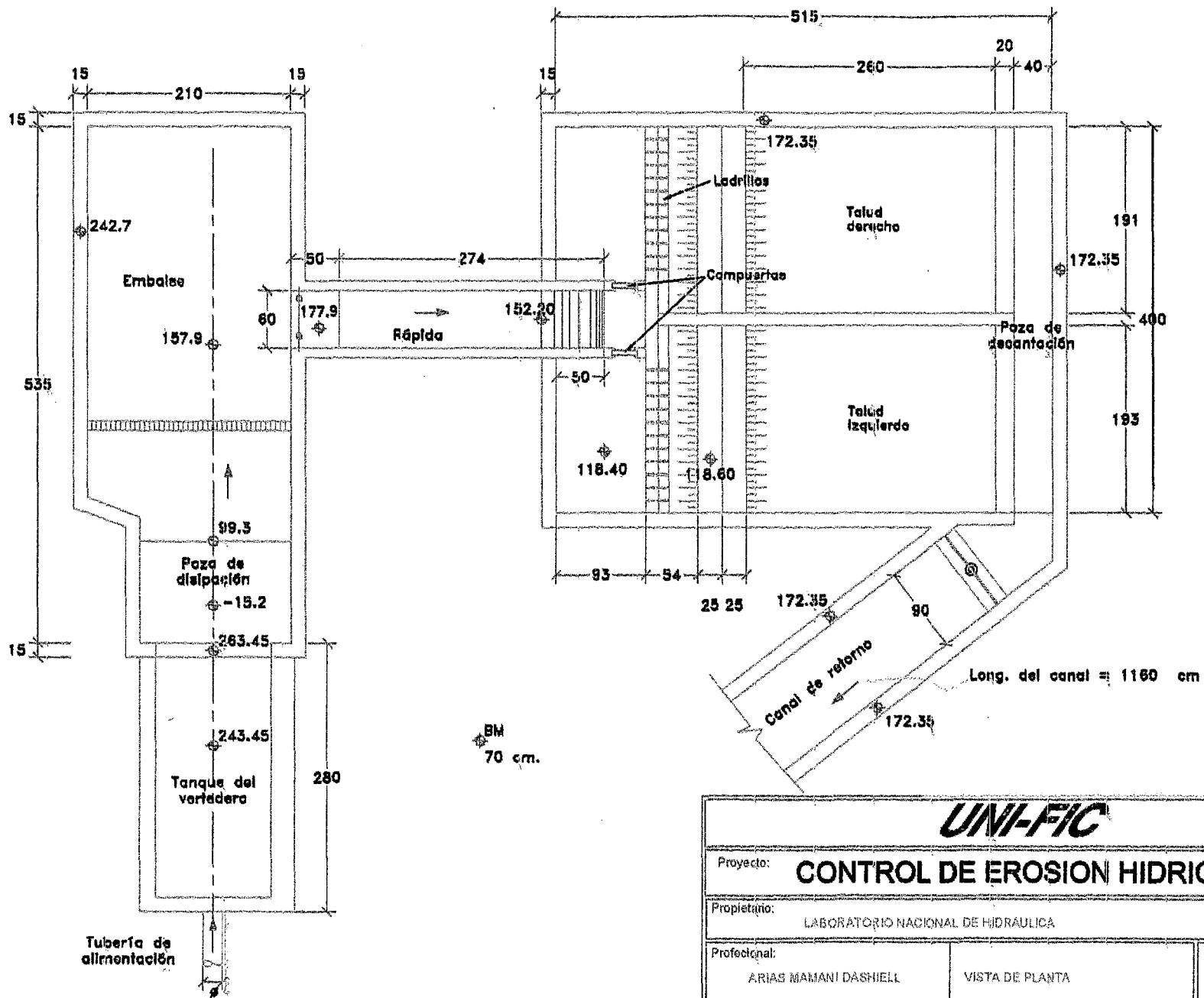
TABLA H-17 Profundidad de erosión en la fase II para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=55 l/s T=60 min	A	-0.5	-0.2	-0.1	-0.3	0	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	-0.3	0.1	0	0	-0.1	0	0
	B	0	0.1	0.2	0	0.2	0	-0.2	0.1	-0.1	0	0.1	-0.1	0	0	0	-0.2	-0.2
	C	0	0	0	-0.5	0.1	0	-0.1	0	0.1	0	0	-0.2	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.1
	D	0	0.1	0	-0.3	0	0.2	-0.7	0	0	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0.2
	E	3.7	-0.4	0.2	0	0	-0.4	0.1	0	0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.5	0	-0.2	0.1	0.1
	F	-3.8	-5.3	0.1	-0.5	-0.7	0.1	0	-0.1	0	0	0	0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2
	G	-0.4	-9.5	-0.2	0.3	0	0.2	-0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.2	-1.1	0.1	-0.1	0	-0.2	0.1
	H	-3.4	-0.1	0	-0.3	0.1	-0.8	-0.2	0.1	0	0.2	0	0.1	0.1	0.1	0	0.3	0
	I	-4.7	-0.1	0	0	0	-0.4	0.1	0.2	0.2	-0.3	0.1	-0.6	-0.2	0	-0.3	0	-2.4
	J	-0.6	0.1	-1	0.1	-0.3	0	0.2	0	-0.1	-0.2	-0.3	0	0	-1.4	-0.1	0	0
Q=70 l/s T=10 min	K	0.2	-0.2	-0.5	-0.2	-1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.3	0.2	-0.1	-0.1	0	-0.1	0.1	0.1	0.3
	L	0	-0.9	-0.6	-0.6	-0.9	-1.2	-1.4	-1.6	0	-1	-0.6	-2	-0.6	-2.9	-3	-0.3	-1
	M	0.1	1.1	0.1	0	0	-0.2	0	0.1	-0.7	-0.3	-0.2	-1.8	-0.6	-0.6	0	-0.6	0
	N	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	-0.1	0	-0.1	0	-0.1	-0.1	0	-0.2	-0.1
	O	-0.5	-0.5	-0.1	-0.8	0	-0.2	-0.1	0	-0.1	-0.1	0	-0.1	0	-0.1	-0.1	0	0
	P	-0.8	-0.2	-0.1	0	-0.3	-0.1	-0.1	-0.2	-0.1	0	0	-0.5	-0.2	0	0	0.1	-0.1
	Q	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1	-1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
	R	-1.1	-0.2	-0.2	-0.4	-0.3	0	0	-0.1	0	-0.1	0	-0.1	0	0	-0.1	-0.6	0
	S	-3.3	-0.8	-0.1	-0.3	-0.6	0	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
	T	-3.2	-0.4	-0.2	-0.1	-0.1	-0.2	0	-0.1	0	-0.2	0	-0.1	0	-0.1	-0.1	0.1	0
Q=70 l/s T=10 min	U	-0.6	-0.4	-0.6	-0.3	-0.6	-0.6	-0.1	0	-0.1	-0.1	0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2	0	-0.2
	V	-0.4	-0.3	-0.1	-0.4	-1.2	-0.1	0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.4	0	0	-0.2	0	0	-1.2
	W	-0.2	-0.2	-0.1	-0.3	0	-1.4	-1	0	-0.1	0	-0.1	0	-0.1	-0.4	0	-0.1	0
	X	0	-0.3	0.1	0	-0.3	-0.1	0	-0.2	-0.2	-0.5	-0.4	-0.4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.5
	Y	-0.4	0	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2	-0.2	0	-0.2	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.1
	Z	-0.2	0.1	0	-0.2	0	0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.2	0	-0.1

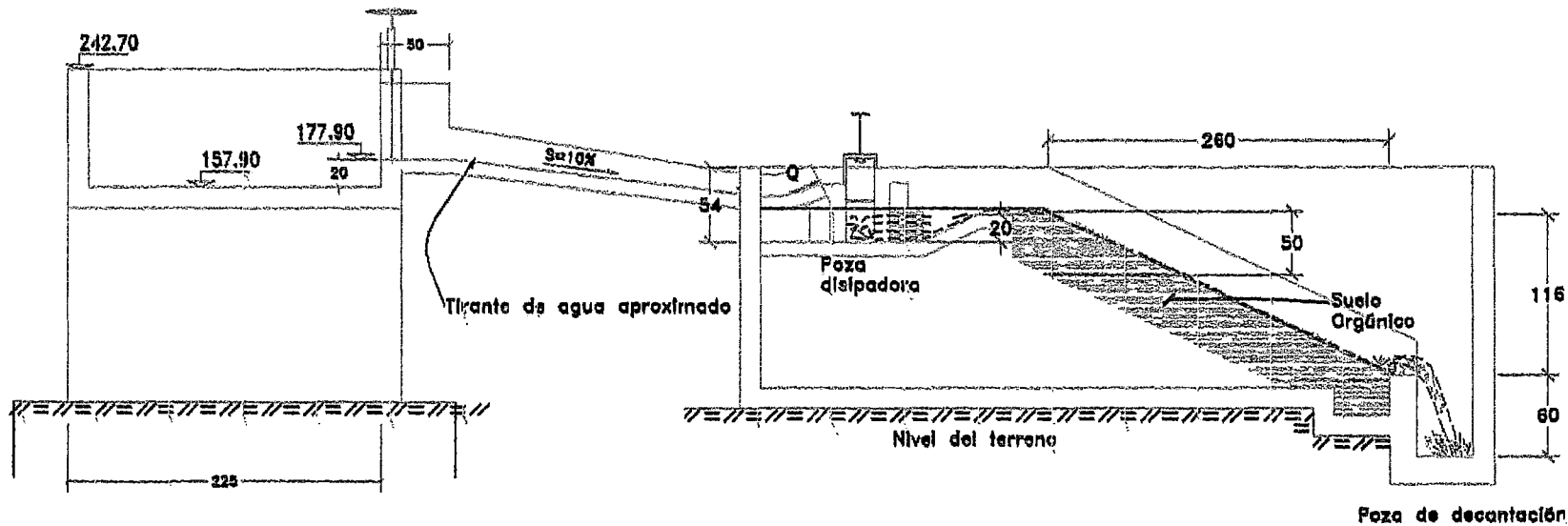
TABLA H-18 Profundidad de erosión en la fase II para cada punto de la cuadrícula.

		Profundidad de erosión (cm)																
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Q=70 l/s T=30 min	A	-0.4	-0.2	-0.1	0.3	-0.1	0.1	-0.1	-0.2	-0.1	-0.1	0.2	0	-0.2	-0.1	0	0	-0.1
	B	-0.8	-0.7	-0.1	-1.2	0	0.1	-0.4	0	0.1	-0.1	0.1	0.2	0	0.1	-0.1	-0.1	0.1
	C	-1.2	-0.2	-0.1	0.1	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2	0	-0.7	-0.2	-0.1	0	-0.2	-0.1
	D	-0.5	-0.5	-0.2	-0.1	-1.5	-0.3	-0.1	-0.4	0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.1	0	0.2	-0.2	-0.2
	E	-4.8	-0.4	-0.4	-0.6	-0.4	0	-0.1	-0.2	0	-0.1	0.1	-0.1	0	-0.1	0	-0.8	0
	F	-2.4	-1.1	-0.1	-0.5	-1	0	-0.3	-0.3	-0.2	0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1
	G	-3	-0.7	-0.2	-0.1	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	0	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1
	H	-0.8	-0.4	-0.9	-0.3	-0.8	-0.9	-0.2	0	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.4	-0.2	-0.2	0	-0.3
	I	-0.7	-0.5	-0.2	-0.6	-1.8	-0.1	-0.1	-0.4	-0.1	-0.5	-0.5	0	-0.1	-0.2	-0.1	0	-1.9
	J	-0.2	-0.3	-0.1	-0.4	0	-2.2	-1.6	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.6	-0.1	0.1	-0.1
	K	0	-0.5	0.1	-0.1	-0.3	-0.1	0	0.2	-0.2	-0.8	-0.6	-0.6	0.1	-0.1	-0.4	-0.2	-0.7
	L	-0.6	-0.1	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.1	0.1	-0.2	0.1	0	-0.1	-0.2	-0.2
M	-0.4	-0.2	-0.1	-0.2	0	0	-0.2	-0.3	0.1	0	0	0.1	-0.1	-0.1	-0.4	-0.1	-0.1	

ANEXO I



UNI-FIC			
Proyecto:		CONTROL DE EROSION HIDRICA	
Propietario:		LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA	
Profesional:		ARIAS MAMANI DASHIELL	
REV.		DIB.	
MARZO 2006.		ESC. 1/17	
VISTA DE PLANTA			LAMINA N° A-01



UNI-FIC			
Proyecto: CONTROL DE EROSION HIDRICA			
Propietario: LABORATORIO NACIONAL DE HIDRAULICA			
Profesional: ARIAS MAMANI DASHIELL		VISTA DE PERFIL	
REV.	DIB.	MARZO 2006.	ESC. 1/17
			A-02

BIBLIOGRAFÍA

1. Hewlett, H. W. M.; Boorman, L. A. ; Bramley, M. E (1987). *Design of reinforced grass waterways.*
2. Temple, D. M. (1987). *Protection of embankments and Spillways.*
3. Hanson, G. J. (1990). *Surface Erodibility of earthen channels.*
4. Temple, D. M. (1988). *Discharge coefficients for vegetated earth embankments.*
5. Gray, Donald; Sotir, Robbin. (1996). *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization.*
6. Suárez, J.; Reyes, K.; Tarazona, R. (2004). *Bioingeniería de suelos y materiales para el control de erosión.*
7. Powledge, G.; Ralston, D.; Miller, P.; Chen, J.; Temple, D. M. (1989). *Mechanics of overflow erosion on embankments.*
8. Chen, Y. H. y Cotton, G. K.(1988). *Design of roadside channels with flexible linings.*
9. De La Cruz, L. A. (2005). *Uso de la Bioingeniería de Suelos para el Control de Erosión Hídrica en Taludes.*
10. Volk (1973). *Method of determining the degree of dispersion of the clay fraction of soils.*
11. Emerson. (1967). *A classification of soil a aggregates based on their coherence in water.*

12. Sherard. (1976). *Pinhole test for identifying dispersive soils.*
13. Varnes. (1958). *Landslide types and process in Landslides an Engineering practice.*
14. Morgan, R. P. C.; Rickson, R. J. (1999). *Water erosion control.*
15. Wilde. (1958). *Forest Soils: Their protection and relation to Silviculture.*
16. Styczen, M. E.; Morgan, R. P. C. (1995). *Engineering Properties of Vegetation Slope Stabilization and Erosion Control.*
17. McCullah, J. (2001). *Biotechnical Soil Stabilization for Slopes and Stream banks.*
18. Watson, A.; Marden, M.; Rowan, D. (1995). *Tree species Performance and Slope Stability.*
19. Hathaway, R. L. y Penny, D. (1975). *Root strength in some Popular and Salix clones.*
20. Dickerson, J. A.; Miller, C. F.; Burgdorf, D. U. (1998). *A critical analysis of plant materials need for soil bioengineering.*
21. Helliwell, D. R. (1995). *Rooting habits and moisture requirements of trees and other vegetation.*
22. Dirección General de Carreteras. (1990). *Instrucción 5.2-16 Drenaje Superficial.*(Madrid)
23. Sutton, R. F. (1969). *Form and development of conifer root systems.*
24. Bohm, W. (1979). *Methods of Studying Root Systems.*
25. Green Way, D. R. (1987). *Vegetation and Slope Stability.*

26. Gray, D. H. y Megahan, W. F. (1980). *Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith.*
27. Abramson, L. W. (1996). *Slope Stabilization Methods.*
28. Bayfield, N. G. (1995). *Species selection and management for Slope revegetación projects.*
29. Lawrance, C. I. (1995). *Low cost Engineering and vegetative measures for stabilizing roadside slopes in Nepal.*
30. Moses, T. (1998) *Channel rehabilitation at the brook side enhancement project- Oregon.*
31. Coppin, N. y Stiles, R. (1995). *Ecological principles for vegetation establishment and maintenance.*
32. Ogasawara, T. A. (1996). *Waikakalawa stream realignment project: Saprolitic soil stabilization and vegetation of severely cut slopes.*
33. Tarazona, R. R. (2004). *Revegetación con pastos para el control de erosión.*
34. Austin, D. N. y Driver, T. (1995). *Classifying rolled erosion control products.*
35. Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics.*
36. Perez, U. y Lopez, R. (2000). *Estudio preliminar de la erosión hidrica en un inceptisol de los andes Venezolanos bajo suelo agrícola.*
37. Potter, M. C. y Wiggert, D. C. (1997). *Mecánica de fluidos.*

38. Kouwen, N.; Unny, T. E. y Hill, H. M. (1980). *Retardance in vegetated channel*
39. Del Val, J. (1989). *Factores de erosión.*
40. Kirkby, M. J. y Morgan R. P. C. (1984). *Soil Erosion.*
41. López, C. G. y Trillo, G. LL. (1999). *Manual de estabilización y revegetación de taludes.*
42. Ministry of agriculture, Fisheries and Food, Water for Irrigation. (1977). *Bulletin Nº202. HMSO (London).*
43. Neypic, (1957) *Constructions Mecaniques et Hydrauliques*, Neypic Grenoble Lyon France.
44. Simons, D. y Sentürk, F. (1977) *Sediment Transport Technology*. First edition Water Resources Publication Colorado EEUU.
45. Howell, R. B. et al. (1979). *Analysis of short and long term effects on water quality for selected highway projects*. Report Nº FHWA/CATL-79/17, Final report to California Department of Transportation, 245 pp.