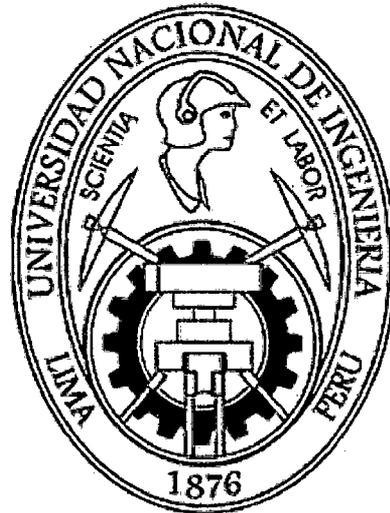


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE
SIMULACIÓN DE LLUVIAS PARA INVESTIGACIÓN
DE PÉRDIDA DE SUELOS

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

ROBERTO CÁCERES IZQUIERDO

LIMA-PERÚ

Digitalizado por:

2008

Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse

RESUMEN

El Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería necesitaba de un simulador de lluvias preciso y confiable que sea usado con fines de investigación de erosión de suelos y simulación de eventos hidrológicos.

El simulador de este proyecto está diseñado para ser operado en una forma sencilla y es capaz de representar un evento hidrológico de 85 mm/h de intensidad, sobre una parcela de inclinación variable de 16 m² de área proyectada. El modelo fue diseñado en base a los principios del simulador Norton, que hace uso de boquillas presurizadas que funcionan bajo una presión y caudal determinados. La boquilla usada es la ¾ HH-71WSQ, de la compañía Spraying Systems, la cual emite una lluvia uniforme sobre la parcela rectangular con gotas cuyo tamaño promedio va de 2.5 a 4.0 mm.

Las parcelas de prueba están contenidas en un armazón de acero, estructura que cuenta con un pivote posibilitando el uso de varias pendientes. Los medidores del flujo controlan el aporte de agua del tanque de abastecimiento, asegurando que se genere la intensidad deseada.

Como parte de la investigación se simularon tormentas semejantes a las de las regiones de la selva alta, la costa norte y ciertas zonas de la sierra. La influencia de la pendiente y la cobertura vegetal en el caudal pico es discutida, así como la influencia de la pendiente y la vegetación en las tasas de erosión.

Las pruebas nos revelaron la efectividad del uso de la especie vegetal empleada en la investigación, así como los efectos del pasto, la pendiente y el tiempo de exposición sobre los hidrogramas de salida de las parcelas de ensayo.

ABSTRACT

A reliable, accurate rainfall simulator is needed to be used for simulation of soil erosion and hydrologic events research at Laboratorio Nacional de Hidráulica. This simulator has been designed to be easily maintained and used and is able to create a variety of 85 mm/h on a variable slope plot 3.76 m wide by 4.80 m long. This model was designed and constructed based upon the principles of Norton Rainfall Simulator, which uses pressurized nozzles. The chosen nozzle is from Spraying Systems Company's model $\frac{3}{4}$ HH-71WSQ, that works at a head of 5 m and generates a range of drop sizes that range from 2.5 mm to 4.0 mm.

Generated storms resemble those observed in high mountains, north coast and certain regions of the Andes of Peru. A steel frame bears the test plot and the pipe that supplies water to the system and has an axis which allows tests to be performed at different slopes.

A flowmeter controls water inflow from a storage tank, ensuring the nozzle has the required discharge rate. Currently the model is finished and test phase has been performed. This volume shows the development of this research from its beginnings until the final results. Influence of the slope and vegetation cover on the peak discharge is discussed, as well as the influence of slope and vegetation cover on the rates of erosion. This module is also being used as a teaching aid in graduate courses.

AGRADECIMIENTOS

El diseño y construcción de un simulador de lluvias de varias toneladas de peso y la posterior ejecución de los ensayos de erosión implicó un trabajo intenso ejecutado por mi persona en los últimos tiempos. Igualmente los campos abordados durante la ejecución de este estudio no se limitaron a la hidrología e hidráulica: se llegó a explorar campos tales como el diseño en acero, el análisis estructural, labores de soldadura, siembra de pastos y forrajes, gestión de proyectos, construcción con elementos prefabricados, etc. Es por eso que tuve el privilegio de contar con el apoyo de muchísimas personas en el camino que me brindaron no solo sus conocimientos, sino también su tiempo y atención. Será injusto hacer un recuento de aquellas personas que contribuyeron a la realización de este trabajo porque inevitablemente olvidaré algunos nombres. A ellos mis disculpas.

Con su presencia y sus consejos, mis padres fueron principales artífices de la culminación de este trabajo. Sin su constante ejemplo de trabajo y ética además de su fe en mí jamás lo hubiera conseguido. Al mismo tiempo, los conocimientos de agronomía de mi padre fueron particularmente útiles en alguna etapa del proyecto. De mi mamá debo destacar su comprensión y paciencia incondicionales.

El Ph.D. Ing. Julio Kuroiwa Zevallos, en su calidad de co-autor y asesor de tesis, merece una especial consideración por su asesoramiento y aliento. Gestor de la idea de un simulador de lluvias como complemento del modelo de simulación de escorrentía empleado por otros tesisistas suyos –los Ings. Luis de la Cruz Fallaque y Dashiell Arias Mamani- propuso el tema y aceptamos el reto. Más adelante, en calidad de Director del Laboratorio Nacional de Hidráulica, me facilitó el apoyo técnico y logístico del mismo.

Debo reconocer el apoyo económico del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil, liderado por el Dr. Víctor Sánchez Moya. La subvención otorgada fue fundamental para la construcción en acero del modelo de simulación.

De igual forma, debo expresar mi agradecimiento al Laboratorio Nacional de Hidráulica por facilitarme el uso del terreno sobre el que luego construiría el modelo a fines del año 2006. Su entonces Director, el Ing. Edgar Rodríguez Zubiato, me dio en todo momento las facilidades del caso y el apoyo del personal técnico del Laboratorio.

El diseño en acero del módulo de simulación, lo realicé gracias al consejo de un especialista en la materia: el Dr. Carlos Zavala Toledo. Sus recomendaciones sobre el diseño de lo que luego sería una estructura innovadora y funcional serían clarificadoras y, eventualmente, vitales.

Debo mencionar la labor eficiente y proactiva de un artesano del acero: el Sr. Senén Timoteo y su personal que llevaron adelante la ímproba labor de construir el modelo de simulación de lluvias.

Por su excelente disposición a la hora de revisar el volumen de mi tesis, en calidad de especialistas, es menester agradecer a los ingenieros Roger Hidalgo García y, una vez más, Edgar Rodríguez Zubiato.

Agradezco también a mi amigo y colega, el Ing. Alejandro Cano, por su apoyo desinteresado y perspicaz en la etapa de ejecución de las pruebas.

No puedo dejar de mencionar a Harold Suárez, Alfonso Cerna y sus amigos estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. Mostraron un genuino interés por el estudio que estaba realizando e hicieron aportes valiosos durante la etapa de los ensayos. De igual forma debo expresar mi agradecimiento a mi amigo Ramiro Castro y sus serviciales colaboradores.

Finalmente, mi reconocimiento a la Ing. Nancy Salazar, la Ing. Yeny Avendaño, el Ing. Heraldo Peixoto, el Dr. José Luis Ayuso, el Ing. Juan Perea, el personal de Spraying Systems Perú y el Ing. Miguel Quispe.

INDICE

Resumen	ii
Abstract	iii
Agradecimientos	iv
Lista de Figuras	ix
Lista de Tablas	xi
Lista de Fotos	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1: REVISIÓN DE LITERATURA	3
1.1. Origen de las Lluvias y Tipos de Precipitación	3
1.1.1. Precipitación	3
1.1.2. Procesos de Enfriamiento y Elevación	5
1.1.3. Física de las Nubes	5
1.1.4. Tipos de Precipitación	11
1.1.5. Medición de la Precipitación	12
1.1.6. Análisis de los Datos de la Precipitación	16
1.2. Erosión Superficial y Movimiento de Masas	17
1.2.1. Erosión superficial	17
1.2.2. Movimientos de Masa	18
1.2.3. Principales Características y Diferencias	19
1.2.4. Agentes y Tipos de Erosión	19
1.2.5. Mecánica de la Erosión	20
1.2.6. Erosión por Precipitación	22
1.2.7. Erosión Eólica	23
1.2.8. Tipos de Erosión Hídrica	24
1.2.9. Factores Erosivos	28
1.2.10. Predicción de la Pérdida de Suelos	35
1.2.11. Principios del Control de Erosión	42
1.2.12. Naturaleza de los Movimientos de Masas	43
1.3. Rol de la Vegetación en la Estabilidad de Taludes	48
1.3.1. Influencia de la Erosión Superficial	48
1.3.2. Influencia sobre la Erosión de las Riberas	50

1.4.	Modelos matemáticos.	51
1.4.1.	Modelo matemático de Duboys y similares	51
1.4.2.	Erosión y Transporte de Sedimentos KINEROS	54
1.5.	Simulación de Lluvia	59
1.5.1.	Características Importantes para la Simulación de Lluvia	60
1.5.2.	Parámetros Básicos	61
1.5.3.	Tipos de Simulador de Lluvias	62
1.5.4.	Simulador de Lluvias del Departamento de Transportes del Estado California (Caltrans)	65
CAPÍTULO 2: PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS Y EXPOSICION DE LA HIPOTESIS		70
2.1.	Parámetros considerados en los ensayos	72
2.2.	Datos Obtenidos en Campo	74
2.3.	Procedimiento de los Ensayos a Ejecutarse	74
2.3.1.	Verificación de las Características Importantes para la Simulación de Lluvia	75
2.3.2.	Ensayos Definitivos	77
CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ANÁLISIS		79
3.1.	Descripción del Área de Trabajo	79
3.1.1.	Laboratorio Nacional de Hidráulica	79
3.1.2.	Elementos constituyentes del Modelo de Simulación de Lluvias	80
3.2.	Caracterización	89
3.2.1.	Caracterización Geométrica y Topográfica	89
3.2.2.	Caracterización Hidrológica	90
3.2.3.	Caracterización Geotécnica	90
3.2.4.	Caracterización Botánica	91
3.3.	Uso de floculación en la poza de sedimentación	95
CAPÍTULO 4: DATOS ADQUIRIDOS EN LA INVESTIGACION		97
4.1.	Procedimiento de toma de datos	97
4.1.1.	Ensayos preliminares	97

4.1.2.	Ensayos definitivos	99
4.2.	Mediciones Hidráulicas y de Erosión de Suelo	104
4.2.1.	Propiedades del suelo empleado	105
4.2.2.	Desarrollo del Pasto Bermuda	105
4.2.3.	Erosión de Suelo	106
4.2.4.	Hidrología	111
4.2.5.	Estimación de la pérdida de suelos con el empleo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE)	126
4.3.	Análisis y discusión de datos	127
4.3.1.	Erosión de suelo	127
4.3.2.	Hidrogramas	133
	CONCLUSIONES	135
	RECOMENDACIONES	139
	BIBLIOGRAFIA	141
ANEXO A:	Predicciones de la Estabilidad de Taludes	146
ANEXO B:	Especificaciones de la Boquilla Aspersora	157
ANEXO C:	Análisis Estructural y Diseño en Acero	162
ANEXO D:	Registro de Lluvias de Tingo María	176
ANEXO E:	Resultados del Estudio de Mecánica de Suelos	179
ANEXO F:	Fertilización de la Parcela Experimental	193

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Fuerzas que actúan en una gota de lluvia: peso, empuje y la fuerza de arrastre causada por el aire circulante.	9
Figura 1.2 Velocidad terminal de gotas de lluvia.	11
Figura 1.3 Cinco satélites geoestacionarios proporcionan cobertura global al clima.	16
Figura 1.4 Principales características de la erosión superficial vs. movimiento de masas	20
Figura 1.5 Diagrama esquemático de las fuerzas actuantes sobre las partículas en el límite flujo-lecho	21
Figura 1.6. Proceso de erosión por salpicadura. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).	25
Figura 1.7. Proceso de erosión laminar. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).	25
Figura 1.8. Proceso de erosión por surcos. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).	26
Figura 1.9. Proceso de erosión por cárcavas. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).	27
Figura 1.10. Representación esquemática de los diferentes tipos de erosión hídrica. López y Trillo (Ref. Bibl. N° 29).	28
Figura 1.11. Influencia del ángulo de inclinación de un talud sobre la erosión y la revegetación.	32
Figura 4.1 Hidrogramas de la prueba I-1: 5%, 15 min.	115
Figura 4.2 Hidrogramas de la prueba II-1: 5%, 15 min.	115
Figura 4.3 Hidrogramas de la prueba I-2: 5%, 30 min.	116
Figura 4.4 Hidrogramas de la prueba II-2: 5%, 30 min.	116
Figura 4.5 Hidrogramas de la prueba I-3: 10%, 15 min.	117
Figura 4.6 Hidrogramas de la prueba II-3: 10%, 15 min.	117
Figura 4.7 Hidrogramas de la prueba I-4: 10%, 30 min.	118
Figura 4.8 Hidrogramas de la prueba II-4: 10%, 30 min.	118

Figura 4.9	Hidrogramas de la prueba I-5: 20%,15 min.	119
Figura 4.10	Hidrogramas de la prueba II-5: 20%,15 min.	119
Figura 4.11	Hidrogramas de la prueba I-6: 20%,30 min.	120
Figura 4.12	Hidrogramas de la prueba II-6: 20%,30 min.	120
Figura 4.13	Relación entre el caudal pico Q_p (l/s) y la pendiente del terreno S (%).	122
Figura 4.14	Relación entre el caudal pico Q_p (l/s) y la pendiente del terreno S (%).	123
Figura 4.15	Puntos de control de la uniformidad de la lluvia (sin escala definida).	125
Figura 4.16	Curvas isoyetas de la parcela de pruebas (sin escala definida)	125
Figura 4.17	Erosión (Kg.) vs. pendiente (%) y tiempo (min.) para los ensayos sin cobertura vegetal.	130
Figura 4.18	Erosión (Kg.) vs. pendiente (%) ensayos sin cobertura vegetal y de 30 min.	131
Figura 4.19	Erosión (Kg.) vs. pendiente (%) ensayos sin cobertura vegetal y de 30 min.	132

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1.1	Coeficientes de arrastre para gotas de lluvia. 10
Tabla 1.2	Tipos de Precipitación. 13
Tabla 1.3	Agentes y tipos de erosión. 21
Tabla 1.4	Tendencias de la Erosionabilidad de los Suelos. 22
Tabla 1.5	Movimiento de las Partículas del Suelo por Acción del Viento. 24
Tabla 1.6	Valores del Factor Topográfico (LS) para Taludes. 37
Tabla 1.7	Valores del Factor C para Pastos, Praderas y Terreno Baldío. 38
Tabla 1.8	Factores para Diferentes Coberturas. 39
Tabla 1.9	Condiciones de la Superficie del Terreno. 40
Tabla 1.10	Agentes y tipos de erosión. 43
Tabla 1.11	Clasificación Abreviada de Movimiento de Taludes. 44
Tabla 1.12	Causas de las Fallas de Taludes. 45
Tabla 1.13	Características que indican deslizamientos o potencial de desprendimiento. 46
Tabla 2.1	Fases 1 y 2 de los ensayos. 78
Tabla 4.1	Matriz de pruebas. Fases 1 y 2 de los ensayos. 99
Tabla 4.2	Secuencia de la ejecución de los ensayos para las Fases 1 y 2. 104

Tabla 4.3	Crecimiento del pasto Bermuda respecto al tiempo.	106
Tabla 4.4	Tasas de erosión producto de cada uno de los ensayos.	106
Tabla 4.5	Degradación del terreno por acción de los ensayos.	107
Tabla 4.6	Composición del suelo erosionado para cada prueba.	109
Tabla 4.7	Lluvia 1. Pruebas I-1 e II-1.	111
Tabla 4.8	Lluvia 2. Pruebas I-2 e II-2.	112
Tabla 4.9	Lluvia 3. Pruebas I-3 e II-3.	112
Tabla 4.10	Lluvia 4. Pruebas I-4 e II-4.	113
Tabla 4.11	Lluvia 5. Pruebas I-5 e II-5.	113
Tabla 4.12	Lluvia 6. Pruebas I-6 e II-6.	114
Tabla 4.13	Tiempo de concentración.	121
Tabla 4.14	Coefficiente de escorrentía despejado de la fórmula racional.	122
Tabla 4.15	Comparación del t_c estimado y obtenido en las pruebas.	124
Tabla 4.16	Tasas de erosión calculadas usando la USLE.	126
Tabla 4.17	Tasas de erosión alcanzadas en los ensayos y calculadas por la USLE.	130
Tabla 4.18	Tasas de erosión alcanzadas en los ensayos y calculadas por la USLE calibrada.	132
Tabla 4.19	Calibración alterna de la USLE.	133

LISTA DE FOTOS

		Página
Foto 1.1.	Pluviómetro usado en la medición de la precipitación.	13
Foto 1.2.	Erosión por surcos. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).	18
Foto 1.3.	Erosión por cárcavas. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).	18
Foto 3.1	Fachada del Laboratorio Nacional de Hidráulica. Fuente: página web del Laboratorio Nacional de Hidráulica.	79
Foto 3.2	Interior del Laboratorio Nacional de Hidráulica. Esta área fue la elegida para construir el modelo.	80
Foto 3.3.	Vista general del soporte estructural durante la etapa de construcción.	81
Foto 3.4	Cimentaciones después del proceso de endurecimiento del concreto.	82
Foto 3.5	Tijerales que eventualmente constituirían la subestructura del modelo.	83
Foto 3.6	En primer plano se observa la viga principal. Más allá, una de las vigas secundarias	84
Foto 3.7	Detalle de las viguetas firmemente soldadas a las vigas secundarias.	84
Foto 3.8	El revestimiento blanco del modelo está constituido por planchas de fibrocemento.	85
Foto 3.9	Sistema de elevación. Obsérvese los tornillos -arriba y abajo- sujetos al vástago de acero A36.	86
Foto 3.10	En la parte inferior de esta foto, se observa uno de los tanques de fibra de vidrio empleados en los ensayos.	88
Foto 3.11	Parcela de pruebas durante ejecución de los ensayos.	89
Foto 3.12	Pasto Bermuda.	91
Foto 3.13	Terreno recientemente removido y enriquecido con humus de lombriz	92
Foto 3.14	Sembrado de las semillas al voleo.	93
Foto 3.15	Terreno luego de haber sido sembrado y ligeramente compactado.	93

Foto 3.16	Acá se observa el tendido de la malla que ha de proteger a las semillas recién sembradas de las aves.	94
Foto 3.17	Crecimiento del pasto sin uso de fertilizantes.	94
Foto 3.18	Desarrollo del pasto con el uso de fertilizantes.	95
Foto 3.19	Acción del floculante en una prueba preliminar.	95
Foto 3.20	Acción del floculante en la fase de ensayos.	96
Foto 4.1	Obtención del agua directamente de la boquilla aspersora.	98
Foto 4.2	Uso del pluviómetro durante la ejecución de los ensayos.	98
Foto 4.3	Equipo empleado en la etapa de nivelación.	100
Foto 4.4	Parcela de pruebas durante la ejecución de los ensayos.	101
Foto 4.5	Aplicación del floculante sobre una de las muestras después de la aplicación de la lluvia simulada.	101
Foto 4.6	La ventana de salida mostrada nos permite recolectar el agua con sedimentos en suspensión con eficiencia para su posterior análisis.	102
Foto 4.7	Fase sólida lista para ser separada y analizada.	103
Foto 4.8	Se aprecia uso de la cuadrícula durante los ensayos.	104
Foto 4.9	Sedimento recolectado.	107
Foto 4.10	Surco producto de la prueba II-4.	110
Foto 4.11	Pequeña cárcava originada por II-3.	110
Foto 4.12	Grave cuadro de pérdida de suelos: cárcavas desarrolladas y crecientes. Prueba II-6.	111
Foto 4.13	Acorazamiento.	128
Foto 4.14	Escorrentía generada por la parcela con vegetación.	129
Foto 4.15	Escorrentía generada por la parcela sin vegetación.	129

INTRODUCCIÓN

Los simuladores de lluvia han sido dispositivos de importancia creciente en el campo de investigación de la ingeniería civil, alcanzando su mayor desarrollo en el Primer Mundo. Estos modelos tienen como finalidad la reproducción de tormentas, bajo condiciones controladas, sobre pequeños taludes de prueba para la evaluación de sistemas de control de erosión y la realización de experimentos hidrológicos, entre otras aplicaciones relacionadas con las ciencias agrícolas. El conocimiento de las tasas de erosión de suelo y la efectividad de los sistemas de control de erosión son cruciales para poder encarar con mejores herramientas el proceso de desertificación, tan estrechamente emparentado con el cuidado del medio ambiente. Estos modelos deben reproducir la lluvia natural satisfaciendo los parámetros de estas tales como intensidad, tamaño y velocidad de las gotas, entre otros.

Los trabajos realizados en ésta área son extensos alrededor del mundo y los investigadores construyen sus propios modelos -se puede disponer de simuladores en el mercado, pero son muy costosos. Se debe destacar el hecho que existen simuladores de lluvia portátiles y no portátiles. Los primeros suelen ser compactos y ligeros, pero de parcelas de ensayo muy pequeñas (menores que 1 m²). Los simuladores no portátiles suelen ser más costosos, pero más controlables en su uso, además de poder contar con taludes más grandes.

En nuestro país estos modelos aún no se han sido estudiados profundamente. El Departamento de Recursos de Agua y Tierra de la Universidad Nacional Agraria la Molina cuenta con un modelo de simulación de lluvias con parcelas de 10 y 20% de pendiente cuya construcción data de los años 70'. El Laboratorio Nacional de Hidráulica cuenta con un modelo de simulación de escorrentía construido en 2004, pero éste desestima la erosión producto de la salpicadura. Más allá de estos esfuerzos, en el Perú no sobresalen trabajos de este tipo.

El desarrollo de modelos de simulación de lluvia es de gran necesidad en nuestro país pues nos encontramos en una región tropical donde es de particular importancia la evaluación del comportamiento del terreno ante la acción de las agresivas lluvias que son propias del trópico y que caracterizan a nuestro

territorio, sobre todo en la región amazónica y la costa norte, además de nuestra sierra. Asimismo, nuestro territorio presenta grandes extensiones de zonas áridas, sobre todo en el resto de la costa peruana, donde las precipitaciones, aunque escasas, suelen ser periódicas y estas áreas resultan particularmente vulnerables a la acción erosiva de las aguas o del viento.

Esta tesis tiene como objetivo principal construir un modelo que permita, mediante la simulación de lluvias más realista posible, la evaluación de pérdidas de suelo, infiltración de agua y rendimiento de los sistemas de control de erosión en taludes de pendiente determinada, teniendo en cuenta la erosión por salpicadura de las lluvias. Como objetivos secundarios tenemos los siguientes:

- Investigar la erosionabilidad de diferentes tipos de suelo debido al impacto / escorrentía de las lluvias.
- Emplear el modelo para ensayar técnicas de control de erosión.
- Investigar el efecto de cobertura vegetal de suelos en la reducción de erosión.

A continuación se describe brevemente el contenido de cada capítulo.

- Capítulo 1: Revisión de Literatura. En este capítulo se realiza un repaso de los fundamentos teóricos en los que se sustenta este trabajo de investigación.
- Capítulo 2: Procedimiento de los Ensayos y exposición de la Hipótesis. En este capítulo se detalla el evento investigado y se expone la Hipótesis.
- Capítulo 3: Descripción del Modelo y Características del Área de Análisis. En este capítulo se describe los equipos constituyentes del sistema y el área de trabajo. Finalmente se procede con la caracterización.
- Capítulo 4: Datos Adquiridos en la Investigación. En este capítulo se presentarán los datos obtenidos de las pruebas describiendo los ensayos. Posteriormente se procederá a analizar esta información.
- Conclusiones y Recomendaciones. Aquí se realiza un resumen de lo presentado en el Capítulo 4 y de las teorías que se puedan obtener. Finalmente se recomiendan aspectos que puedan ser mejorados para posteriores investigaciones.

CAPITULO 1

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Origen de las Lluvias y Tipos de Precipitación

1.1.1. Precipitación

La precipitación es un fenómeno de la naturaleza que incluye diversos procesos como la lluvia y la nieve, entre otros, tales como el granizo y nevisca mediante los cuales el agua cae en la superficie terrestre. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales para la elevación de masas de aire son la *elevación frontal*, donde el aire caliente es elevado sobre aire frío por un pasaje frontal; la *elevación orográfica* mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa; y la elevación convectiva, donde el aire se eleva por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una celda de una tormenta eléctrica. Las celdas convectivas se originan por el calor superficial, el cual causa una inestabilidad vertical de aire húmedo, y se sostiene por el calor latente de vaporización liberado a medida que el vapor de agua sube y se condensa.

A medida que el aire sube y se enfría, el agua se condensa de un estado de vapor a un estado líquido. Si la temperatura se encuentra por debajo del punto de congelamiento, se forman cristales de hielo. La condensación requiere de una semilla llamada el *núcleo de condensación* alrededor del cual las moléculas del agua se pueden unir o *nuclear*. Algunas partículas de polvo que flotan en el aire pueden actuar como núcleos de condensación; las partículas que contienen iones son efectivas como núcleos debido a que los iones atraen por electrostática las moléculas de agua enlazadas polarmente. Los iones en la atmósfera contienen partículas de sal que se forman a partir de la evaporación de espuma marina, y compuestos de sulfuro y nitrógeno resultantes de procesos de combustión. Los diámetros de estas partículas varían desde 10^{-3} hasta $10 \mu\text{m}$ y se conocen como *aerosoles*. Como comparación el tamaño de un átomo es aproximadamente de $10^{-4} \mu\text{m}$, lo cual significa que los aerosoles más pequeños pueden componerse solo de algunos cientos de átomos.

Las pequeñas gotas de agua crecen mediante la condensación e impacto con las más cercanas a medida que se mueven por la turbulencia del aire, hasta que son lo suficientemente grandes para que la fuerza de gravedad sobrepase la fuerza de fricción y empiezan a caer, incrementando su tamaño cuando golpean otras gotas en su descenso. Sin embargo, a medida que la gota cae, el agua se evapora de su superficie y su tamaño disminuye, de tal manera que puede reducirse nuevamente al tamaño de un aerosol y desplazarse hacia arriba en la nube debido a la turbulencia.

Una corriente ascendente de solamente 0.5 cm/s es suficiente para arrastrar una pequeña gota de 10 μm . Algunos cristales de hielo del mismo peso, debido a su mayor forma y tamaño, pueden ser arrastrados por velocidades aun más pequeñas. El ciclo de condensación, caída, evaporación y elevación se repite en promedio unas diez veces antes de que la gota alcance un tamaño crítico de alrededor de 0.1 mm, que es suficientemente grande para que caiga a través de la base de la nube.

Las gotas permanecen esféricas hasta un diámetro de alrededor de 1 mm, pero empiezan a aplanarse en el fondo cuando aumenta su tamaño, y dejan de ser estables en su caída al atravesar el aire dividiéndose en pequeñas gotas de lluvia. Las gotas de lluvia normales que caen a través de la base de una nube tienen de 0.1 a 3 mm de diámetro.

Algunas observaciones indican que las nubes pueden existir gotas de agua a temperatura por debajo del punto de congelamiento, hasta unos -35°C . A esta temperatura, las gotas súper enfriadas se congelan aún sin la presencia de núcleos de congelamiento. La presión de saturación del vapor de agua es menor en hielo que en agua líquida; luego si las partículas de hielo se mezclan con gotas de agua, estas partículas crecerán por efecto de la evaporación de las gotas y la condensación de los cristales de hielo. Los cristales de hielo normalmente forman racimos mediante colisión y fusión y caen como copos de nieve. Sin embargo, algunos cristales de hielo pueden crecer tanto que caen directamente a la tierra como granizo o nevisca.

La *siembra de nubes* es un proceso mediante el cual se nuclea artificialmente las nubes para inducir la precipitación. El yoduro de plata es un agente nucleante común que puede esparcirse desde un aeroplano, donde una solución de este químico se evapora al utilizar un quemador de propano para producir partículas. A pesar de que ha habido muchos experimentos en los cuales se consideró que

la siembra de nubes indujo precipitación, la gran variabilidad de los procesos meteorológicos implícitos en la producción de precipitación hace difícil obtener resultados consistentes.

1.1.2. Procesos de Enfriamiento y Elevación

Existen cuatro mecanismos de enfriamiento y elevación. Cada uno de ellos ocurre raramente en la naturaleza solo, pero alguno puede dominar bajo ciertas condiciones.

La convergencia no frontal u horizontal de aire en un punto de baja presión resulta en un desplazamiento vertical del aire, lo que puede llevar al proceso de condensación y precipitación. Esta convergencia ocurre normalmente sobre o cerca de los trópicos como los componentes sur y norte de los vientos alisios. La convergencia horizontal también puede ocurrir como el lado este u oeste del encuentro de dos ciclones adyacentes de baja presión.

La convergencia horizontal extratropical genera precipitaciones de moderada intensidad – de 50 a 150 mm, sobre periodos de 24 a 72 horas. Aquellas lluvias de origen tropical pueden resultar en 400 mm en periodos de 12 a 24 horas.

La elevación frontal o ciclónica resulta de la convergencia de masas de aire a diferentes temperaturas de diferentes características, generalmente ocurren sobre regiones templadas debido a la convergencia de vientos polares del este y vientos de latitud media del oeste. Un frente cálido ocurre cuando el aire cálido colisiona con el aire frío. El aire cálido se eleva sobre el frío a una pendiente relativamente suave de 1:100 a 1:400. Debido a la lenta elevación de masas de aire, la precipitación se extiende hasta 300 ó 500 Km. del frente.

Los frentes fríos ocurren cuando el aire frío se mueve bajo una masa de aire caliente forzando un posterior movimiento de masas de aire hacia arriba. Se observa una interfase a una mayor pendiente (de 1:25 a 1:100). Las nubes y las precipitaciones se limitan a cerca de 80 Km. adelante del frente.

1.1.3. Física de las Nubes

La elevación de masas de aire húmedo no garantiza la precipitación. Dentro del sistema de las nubes existen diversas y complejas interacciones de naturaleza termodinámica y mecánica que controlan la ocurrencia de la precipitación.

1. Sin el efecto catalítico de los núcleos, la eficiencia de la condensación sería sumamente baja.
2. Los hidrometeoros deben crecer en tamaño, de otro modo permanecerían suspendidos en la parte superior de las nubes por las corrientes ascendentes.
3. Las partículas de precipitación deben ser lo suficientemente grandes para sobrevivir el proceso de evaporación que se pueda dar durante el camino de la nube al terreno.

Nucleación

La condensación bajo condiciones uniformes requiere elevadas saturaciones y una elevada activación de la energía. Eagleson (Ref. Bibl. N° 10) discute la termodinámica de la nucleación. Cualquier cambio de fase involucra un cambio en el estado de la energía del sistema. La porción de energía capaz de realizar un trabajo se llama energía libre. La energía libre añadida implicada en la condensación del vapor de agua o en la sublimación del vapor en hielo se llama energía de activación.

Las reacciones o cambios de fase se mueven en la dirección de la mínima energía libre. Bajo condiciones sin impurezas, y si la presión de vapor (e) es menor que la presión de saturación (e_s), la mínima energía libre es alcanzada pero con radio cero, entonces no ocurre la condensación o nucleación del vapor de agua. Si $e > e_s$, la energía mínima de activación puede ser alcanzada con el crecimiento de la gotita de agua mas allá de el radio crítico, lo cual requiere de un mínimo nivel de activación de energía.

La introducción de lugares de nucleación o impurezas reduce la cantidad de energía de activación requerida para la condensación. Como se indicó líneas arriba, un grado de sobresaturación de 4 es requerido por el caso homogéneo (sin impurezas). En la condición heterogénea (con impurezas), el cambio de fase ocurre con e / e_s cercano a 1, una condición mas común en la atmósfera.

En los sistemas de nubes muy altas, con temperaturas de congelación, las partículas de hielo pueden ser formadas por el congelamiento de las gotitas de agua o por la sublimación directa a partir del vapor. Una vez más, la fase de cambios es favorecida por los lugares de nucleación o impurezas. La sublimación homogénea de hielo desde el vapor de agua requeriría de

temperaturas cercanas a los -60° C. Bajo condiciones heterogéneas, la sublimación de una partícula de $0.1\text{-}\mu\text{m}$ puede ocurrir a temperaturas cercanas a los -4° C -Eagleson (Ref. Bibl. N° 10).

Afortunadamente, la atmósfera es relativamente rica en partículas de nucleación que favorezcan los cambios de fase.

Los núcleos pueden ser partículas de suelo (arcilla), residuos de la combustión de fósiles, sales de amonio o sales marinas. Los núcleos de condensación pueden ser de $0.1\ \mu\text{m}$. ó más.

Desarrollo y Distribución de las Partículas de Precipitación

Antes de caer, las gotitas formadas por la condensación, o las partículas de hielo, deben crecer hasta un tamaño y peso que les permita superar las velocidades ascendentes en la nube. El desarrollo inicial es alcanzado por la condensación debido a las condiciones de sobresaturación en el entorno de las gotitas. Este mecanismo puede llegar a ser razonablemente efectivo en el caso de las partículas de hielo.

La sobresaturación es reducida en la atmósfera, así que no puede sostener el crecimiento continuo del tipo mencionado. El mecanismo de crecimiento más efectivo se llama coalescencia y se da como resultado de repetidas colisiones y agregaciones de las partículas de precipitación (mayormente agua). La coalescencia o colección de partículas es medida en términos de área efectiva barrida por una partícula en caída. Imagine que existe una partícula grande de radio r_l y una partícula pequeña de radio r_s . La partícula grande, que se encuentra en caída, alcanzará, chocará y posiblemente absorberá la partícula más pequeña, si es que ésta se encuentra dentro de un radio $R = r_l + r_s$ del centro de la partícula grande. La eficiencia de colección es definida como:

$$E = \frac{R^2}{r_l^2} \quad (1.1)$$

El radio de influencia R es $r_l + r_s$ solo si la dinámica del movimiento de la partícula no afecta la probabilidad de colisión. De hecho, los movimientos o tamaños relativos de las partículas pueden inducir o evitar las colisiones, incrementando o reduciendo R .

Asumiendo la condición estática, Eagleson (Ref. Bibl. N° 10) apunta que $E \rightarrow 1$ como $r_s/r_l \rightarrow 0$ y $E \rightarrow 4$ como $r_s/r_l \rightarrow 0$. Las máximas eficiencias ocurren para relaciones r_s/r_l mayores que 0.6 aproximadamente. La eficiencia de la colisión tiende a cero cuando las partículas grandes son pequeñas ($20\mu\text{m}$) y la relación de radios es menor que 0.3. También tiende a cero si las partículas, tanto grandes como pequeñas, tienen tamaños similares con diámetros menores que $60\mu\text{m}$. Las partículas mayores que $80\mu\text{m}$ llegan a ser muy eficientes en la coalescencia en la medida que su distribución sea uniforme ($r_s/r_l > 0.9$).

La discusión previa se refiere a la coalescencia de gotitas de agua. El desarrollo de copos de nieve resulta mayormente de la colisión con cristales de hielo.

La distribución resultante de los tamaños de los hidrometeoros que se dan por los mecanismos de crecimiento son bastante indefinidos. Sin embargo, puede ser deducido -Mason (Ref. Bibl. N° 31); Pruppacher y Klett (Ref. Bibl. N° 38) - que la distribución $N(D)$ del número de partículas por unidad de volumen de diámetro dentro del intervalo $(D, D+dD)$ tal que "aumenta abruptamente para un D pequeño para alcanzar un máximo y posee una pendiente media para valores elevados de D ", Georgakakos y Bras (Ref. Bibl. N° 15).

Diversas formas de $N(D)$ que satisfacen las características descritas arriba han sido propuestas -Mason (Ref. Bibl. N° 31); Pruppacher y Klett (Ref. Bibl. N° 38) -, pero todos ellos oscurecidos por las dificultades en medir el tamaño del hidrometeoro en campo. Los errores son inducidos por la incapacidad de medir las partículas menores que un tamaño determinado, incapacidad de medir simultáneamente en diferentes lugares, o problemas con la calibración de los instrumentos y la confiabilidad bajo condiciones de muy baja temperatura.

Muchos investigadores propusieron después el uso de una simple fórmula exponencial para la distribución del tamaño de la partícula a una elevación dada.

La fórmula:

$$N(D) = N_0 e^{-cD} \quad (1.2)$$

ha sido usada por Marshall y Palmer (Ref. Bibl. N° 30), Georgakakos y Bras (Ref. Bibl. N° 16 y 17), entre otros. El parámetro c en la ecuación 1.2 es el diámetro medio inverso a un nivel determinado.

La posible objeción a la ecuación 1.2 es que implica hidrometeoros cercanos a cero. La alternativa sería el uso de una distribución que inicie en cero y cuyo pico se ubique en algún lugar de la región de diámetro pequeño. Georgakakos y Bras

(Ref. Bibl. N° 16) discuten que dadas las conocidas incertidumbres de la medición del número de hidrometeoros la ecuación 1.2 es adecuada.

Velocidad terminal

Existen tres fuerzas que actúan en una gota de lluvia que cae (ver figura 1.1): una fuerza gravitacional F_g debida a su peso, una fuerza de empuje F_b debida al desplazamiento de aire por la gota y una fuerza de arrastre F_d causada por la fricción entre la gota y el aire circundante. Si la gota es una esfera de diámetro D , su volumen es $(\pi/6)D^3$ y su peso es

$$F_g = \rho_w g \left(\frac{\pi}{6} \right) D^3 \quad (1.3)$$

Y la fuerza de empuje

$$F_b = \rho_a g \left(\frac{\pi}{6} \right) D^3 \quad (1.4)$$

donde ρ_w y ρ_a son las densidades del agua y del aire, respectivamente. La fuerza de arrastre por fricción esta dada por

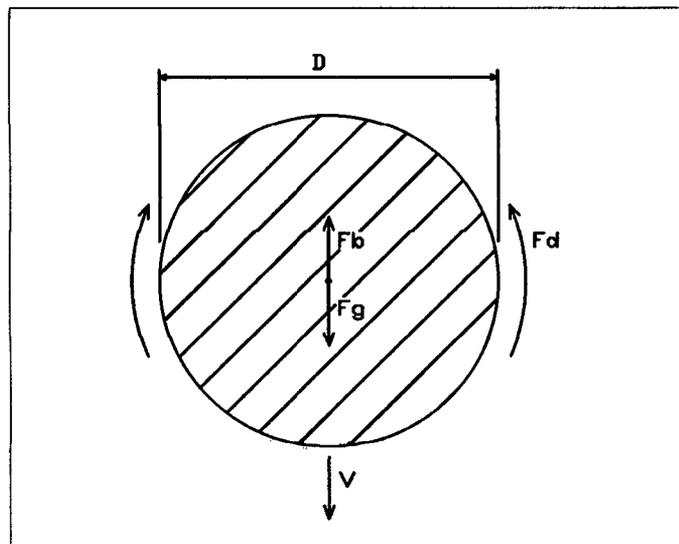


Figura 1.1. Fuerzas que actúan en una gota de lluvia: peso, empuje y la fuerza de arrastre causada por el aire circulante.

$$F_d = C_d \rho_a A \frac{V^2}{2} \quad (1.5)$$

donde C_d es un *coeficiente de arrastre* dimensional, $A = (\pi/4)D^2$ es el área de la sección transversal de la gota y la V es la velocidad de caída.

Si la gota parte del reposo, se acelerará hasta que alcance su velocidad terminal V_t , para la cual las tres fuerzas se balancean. En esta condición,

$$F_d = F_g - F_b \quad (1.6)$$

Luego, haciendo $V = V_t$ en las ecuaciones (1.3-5),

$$C_d \rho_a D^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) \frac{V_t^2}{2} = \rho_w g \left(\frac{\pi}{6} \right) D^3 - \rho_a g \left(\frac{\pi}{6} \right) D^3 \quad (1.7)$$

de donde, resolviendo para V_t :

$$V_t = \left[\frac{4gD}{3Cd} \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (1.8)$$

La suposición de que una gota de lluvia es esférica es válida, pero solo hasta tamaños de 1 mm de diámetro. Por encima de este tamaño, las gotas se aplanan en su parte más baja y adquieren una sección transversal más ovalada. En este estado son caracterizadas como una gota de lluvia esférica de diámetro equivalente que tenga el mismo volumen que la gota real -Pruppacher y Klett (Ref. Bibl. N° 38). Las gotas de lluvia pueden tener hasta 6 mm de diámetro, pero gotas mayores de 3 mm no son comunes, especialmente en lluvias de baja intensidad.

Tabla 1.1. Coeficientes de arrastre para gotas de lluvia esféricas de diámetro d , a presión atmosférica estándar (101.3 kPa) y temperatura de aire de 20°C.

Diámetro de la gota D (mm)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Coefficiente de arrastre C_d	4.2	1.66	1.07	0.815	0.671	0.517	0.503	0.559	0.660

Fuente: Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20)

Para las pequeñas gotas de hasta 0.1 mm de diámetro en las nubes, la fuerza de arrastre esta dada por la ley de Stokes según la cual el coeficiente de arrastre es $C_d = 24/Re$ donde Re es el número de Reynolds $\rho_a VD/\mu_a$ siendo μ_a la viscosidad del aire. Las gotas de lluvia que caen están por fuera del rango de la

ley de Stokes; en la tabla 1.1 se dan valores para C_d que se han desarrollado experimentalmente mediante la observación de gotas de lluvia.

Algunos valores de V_t que se calculan en forma similar para varios diámetros están representados gráficamente en la figura 1.2. Puede observarse que la velocidad terminal aumenta con el tamaño de la gota hasta un nivel asintótico de alrededor de 5 mm; en dicho tamaño la velocidad terminal es de aproximadamente 9 m/s.

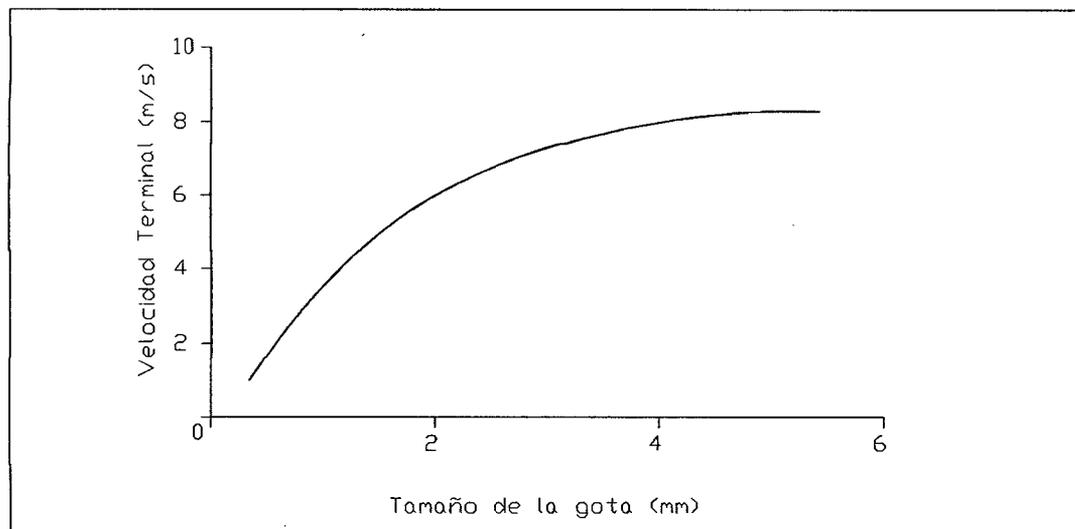


Figura 1.2. Velocidad terminal de gotas de lluvia tal como se calcula usando la ecuación (1.8) con los coeficientes de arrastre de la tabla (1.1). Los resultados corresponden a condiciones atmosféricas estándar a nivel del mar.

Los cálculos precedentes se realizaron para condiciones al nivel del mar. A medida que se asciende en la atmósfera la densidad del aire decrece y la ecuación 1.8 muestra que habrá un incremento correspondiente en V_t ; las gotas de lluvia caen más rápido en el aire más tenue. A una presión del aire de 50 kPa y una temperatura de -10°C , la asintota de la velocidad terminal para gotas grandes se incrementa de 9 m/s a poco más de 12 m/s.

1.1.4. Tipos de Precipitación

La clasificación de los tipos de precipitación se da generalmente por tamaño de las gotas y el estado del agua, usualmente líquida o sólida. La tabla 1.2 ofrece un resumen de los tipos de precipitación más comunes.

Los ingenieros hidrólogos se encuentran mayormente involucrados con la lluvia y la nieve, debido a que estas proporcionan las cargas para el diseño de estructuras. La lluvia es de sumo interés en el momento y el lugar en que ocurre, mientras que la nieve adquiere importancia durante el periodo de derretimiento, lo cual ocurre después de un periodo importante de acumulación.

La ocurrencia de eventos de lluvia o nieve, así como el tamaño y forma de la gota de lluvia o los copos de nieve, está en función de las condiciones atmosféricas en el lugar de formación y la temperatura promedio de la atmósfera.

1.1.5. Medición de la Precipitación

Pluviómetros y Pluviógrafos

Usualmente la lluvia es medida puntualmente por recolectores de construcción muy simple. Esencialmente, cualquier receptáculo con una apertura considerable servirá para el propósito de medir el volumen de precipitación por un determinado intervalo de tiempo durante un evento dado. Hay diversos tipos de medidores según el tipo de información que registren, uno de los más usados son los pluviómetros. El pluviómetro es un aparato que sólo almacena la precipitación acumulada perdiéndose la intensidad del evento. Cada país determina las dimensiones de sus pluviómetros. Por ejemplo en Estados Unidos el Servicio Nacional del Tiempo utiliza pluviómetros estandarizados con una abertura de 20.3 cm. El receptor se parece a un embudo, que conduce el contenido a un receptáculo con un décimo del área del receptor. Esto implica que la profundidad de la precipitación se multiplica por diez, facilitando la medición y perfeccionando su precisión. En teoría, las mediciones se realizan a los 0.25 mm. Todo el aparato descansa sobre un soporte que debe ser nivelado. Los instrumentos que miden la intensidad de las precipitaciones se llaman pluviógrafos. Consiste en dos paletas de 0.25 mm, una de las cuales se llena con el agua del evento, forzando su rotación y vaciado, exponiendo así la otra paleta con la que se repite el proceso. Cada una de las rotaciones es registrada y reflejan la intensidad de la precipitación.

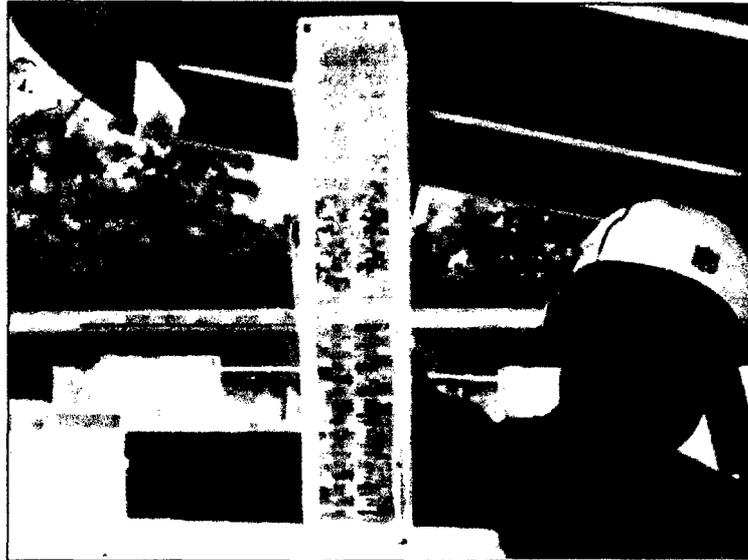


Foto 1.1. Pluviómetro empleado en la medición de la precipitación.

Tabla 1.2. Tipos de Precipitación

Nombre	Descripción	Tamaño
Llovizna	Pequeñas gotas de agua Intensidad (1 mm/h)	0,1-0,5 mm
Lluvia	Gotas de agua Ligera: < 2,5 mm/h Moderada: 2,5-7,6 mm/h Fuerte: >7,6 mm/h	> 0,5 mm
Helada	Capa de hielo, formada por llovizna o lluvia congeladas	Gravedad específica = 0,8
Llovizna helada	Depósito de hielo opaco y granular	Gravedad específica = 0,2 - 0,3
Nieve	Cristales hexagonales de hielo	Gravedad promedio específica = 0,1
Granizo	Fragmentos irregulares de hielo	De 5 a mas de 125 mm; Gravedad específica = 0,8
Hielo granulado	Hielo traslúcido	< 5 mm.

Fuente: Adaptada de Ven T. Chow (Ref. Bibl. N° 8).

La precisión de estos instrumentos es influenciada por muchos factores. La elevación y exposición a la que se encuentren juega el papel más importante. La precipitación registrada depende de la exposición del instrumento y del ángulo

de incidencia de la lluvia. El medidor debe estar libre de obstáculos adyacentes que interfiera con la lluvia.

El viento es uno de los factores más importantes en la precisión de los medidores. A mayor velocidad del viento, menor cantidad de lluvia registrada. Una forma común de reducir los errores inducidos por el viento es la de instalar defensas contra el viento en los medidores -Larson y Peck (Ref. Bibl. N° 25)- o ubicarlos en lugares protegidos contra el viento.

La nieve es normalmente medida en los medidores estandarizados de 20 cm. de apertura. La prevención de la acumulación del hielo en el colector es de suma importancia para mantener un área de recolección constante. La acumulación de hielo se acostumbra a registrar como precipitación acumulada. El factor de proporción se define como 1 cm. de precipitación por 10 cm. de nieve.

Es importante enfatizar en la naturaleza puntual de estas mediciones. Las variaciones espaciales son importantes y el ignorarlas puede introducir errores considerables en la medición de la precipitación de un área determinada e interpretar erróneamente la respuesta distribuida de una cuenca.

Radar

El uso de los radares en la medición de las precipitaciones no es una idea nueva. De hecho, fue considerada desde su concepción. Las ventajas del uso del radar como instrumento de medición de lluvias se resumen a lo siguiente:

- Resolución temporal y espacial incrementada. En teoría una descripción continua de la precipitación.
- La posibilidad de trabajar con todo tipo de precipitaciones.

En la práctica, el uso exclusivo del radar en la medición de las precipitaciones no se ha alcanzado aún. Generalmente, es necesario el uso de los sistemas puntuales como pluviógrafos y pluviómetros para calibrar los resultados del radar.

Los radares emiten energía electromagnética en bandas muy delgadas. Esta energía golpea la precipitación siendo absorbida parcialmente y luego reflejada. La energía reflejada regresa al transmisor, registrando un tiempo igual a $2t$,

donde t es el tiempo que le tomó a la señal llegar al objetivo. La onda electromagnética viaja a la velocidad de la luz.

Satélites

El uso de satélites en los estudios del clima se encuentra en ascenso y en el futuro debería ser el sistema dominante en la medición de precipitaciones en todo el mundo. Los satélites trabajan bajo el principio que la atmósfera emite selectivamente radiaciones con diferentes longitudes de onda. La mayoría de los satélites confían en detectar las emisiones comprendidas en los intervalos de radiación visible y térmica. La longitud de onda visible se encuentra en el orden de 0.77 a 0.91 μm , mientras que las térmicas van desde 8.0 hasta 9.2, 10.2 a 12.4; y de 17.0 hasta 22 -Lintz y Simonett, (Ref. Bibl. N° 28)-. Los satélites generan imágenes en base a la radiación recibida, las cuales se compatibilizan con formatos de almacenamiento electromagnético.

Los satélites climáticos existentes son orbitadores polares o geoestacionarios. Los primeros circulan sobre los polos consiguiendo hacerlo dos veces al día a elevaciones de 1000 Km. Los últimos tienen una órbita de alrededor de 36000 Km. de modo que su traslación alrededor de la Tierra sea sincronizada con el movimiento de rotación de la misma. Esto significa que permanezca estática en un punto determinado sobre la superficie de la Tierra. Esto permite el constante registro de imágenes, comúnmente cada media hora, o inclusive cada 5 minutos, lo cual permite el rápido desarrollo de patrones climáticos.

El Satélite Geoestacionario de Operación Ambiental (GOES por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, junto con sistemas análogos de otros países, proporciona una perspectiva casi continua del clima global, excepto para serias distorsiones más allá de los 60° de latitud. La figura 1.3 muestra la posición aproximada de cada uno de éstos satélites. La resolución del satélite GOES es de cerca de 1 Km. en el rango de longitud de onda visible, y de 8 Km. en el de onda térmica.

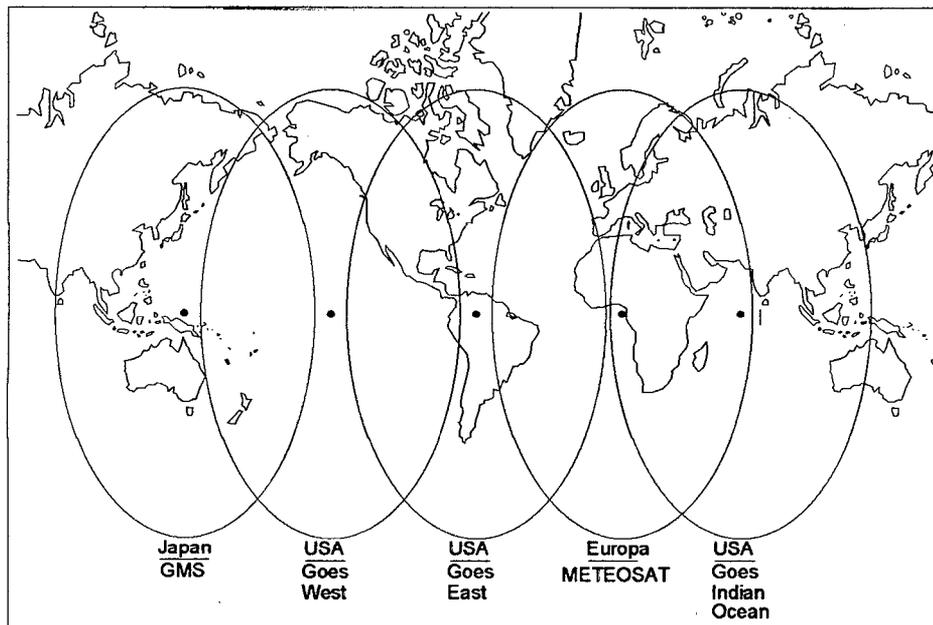


Figura 1.3. Cinco satélites geoestacionarios proporcionan cobertura global al clima.

1.1.6. Análisis de los Datos de la Precipitación

El análisis de los datos de la precipitación debe realizarse con conocimientos básicos en teoría estadística de muestras, aplicable a cualquier tipo de experimento de toma de datos. La meta de todo hidrólogo es recolectar tantos datos como sean necesarios para definir satisfactoriamente, tanto espacial como temporalmente, el proceso muestreado. El término "satisfactoriamente" está en función de los objetivos para los cuales los datos han sido recogidos.

1.2. Erosión Superficial y Movimiento de Masas

Las colinas y mesetas se formaron como resultado de fuerzas tectónicas que alteran la corteza terrestre. Masas de rocas plutónicas también pueden elevarse a través de la corteza formando cadenas de montañas. La actividad volcánica puede hacer emerger roca fundida desde el interior de la Tierra y depositarla en la superficie para formar montañas y volcanes. Estas áreas montañosas y mesetas están sujetas a degradación y recubrimiento por dos procesos íntimamente vinculados: erosión superficial y movimiento de masas. Los taludes artificiales, por ejemplo, cortes y terraplenes están sujetos a los mismos procesos de degradación.

Con la finalidad de prevenir estos procesos, primero es necesario comprenderlos y entender los factores que los controlan. Mientras ambos procesos comparten similitudes, también difieren en importantes aspectos. La erosión superficial implica el desprendimiento y transporte de partículas individuales mientras que el movimiento de masas trae consigo el tránsito de volúmenes de suelo y/o rocas relativamente grandes e inicialmente intactas, a lo largo de planos críticos de falla. La gravedad es la principal fuerza dinámica tras el movimiento de masas; el viento y los cursos de agua son los principales agentes de erosión. El rol y función de la vegetación también difiere sustancialmente entre estos dos procesos.

1.2.1. Erosión superficial

La erosión superficial es la remoción de las capas superiores de suelo por medio del viento, el agua y el hielo. La erosión del suelo involucra un proceso tanto de desprendimiento como de transporte por estos medios.

Los dos tipos más comunes de erosión son por precipitación y eólica. La erosión por precipitación empieza con la caída de las gotas de agua, que al impactar el suelo pueden desprender las partículas y enviarlas a una distancia determinada. Al inicio del escurrimiento el agua se reúne en arroyos pequeños, los cuales pueden erosionar el suelo en reducidos canales llamados surcos (rilling). Las cárcavas (gullying) son un proceso de erosión más complejo y destructivo que, una vez iniciado, resulta difícil de contener.

La erosión puede ocurrir a lo largo de las orillas de los ríos pues la velocidad del flujo es alta y la resistencia baja. Los continuos procesos de inundación relacionados con los de erosión pueden hacer que el diseño de las defensas ribereñas sea un gran desafío. La socavación y la tubificación pueden representar otros tipos de erosión generados por la infiltración del agua en taludes desprotegidos.



Foto 1.2. Erosión por surcos. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).

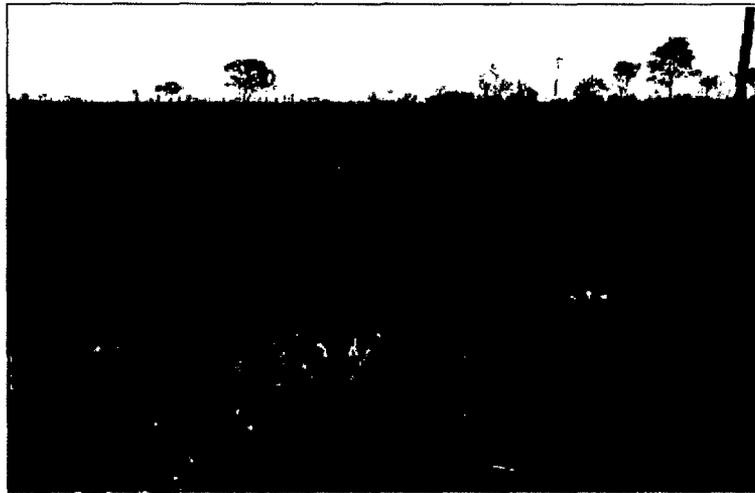


Foto 1.3. Erosión por cárcavas. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).

1.2.2. Movimientos de Masa

Movimientos de masa es un nombre descriptivo para el movimiento hacia abajo y hacia fuera de los materiales que constituyen el talud – roca natural, suelos, rellenos artificiales, o la combinación de estos materiales. Los términos “erosión

de masas” o “desperdicio de masas” son empleados frecuentemente. Los movimientos de masa son más conocidos como deslizamientos de tierra.

A diferencia de la erosión, los movimientos de masa involucran el deslizamiento, desplome, caída o esparcimiento de masas de tierra relativamente grandes e intactas. Los deslizamientos son movimientos comparativamente lentos y ocurren a lo largo de un plano de falla o una combinación de estos planos.

1.2.3. Principales Características y Diferencias

El movimiento de masas y la erosión se ven afectados por los mismos factores hidrológicos y edafológicos así como los de talud. Pero ambos procesos difieren en importantes aspectos. La precipitación, aspecto clave en la erosión hídrica, solo afecta al movimiento de masas en forma indirecta debido a su influencia en el nivel freático de la zona. En cambio las condiciones geológicas tales como la orientación de las juntas, pueden tener una profunda importancia en la estabilidad de taludes, mas no en la erosión. La cobertura vegetal es importante en ambos procesos.

Diversas técnicas han sido desarrolladas para determinar la pérdida de suelos debido a la erosión superficial o la probabilidad de sufrir una catástrofe debido a la falla de un talud. La precipitación o la erosión eólica, los factores topográficos, climáticos o edafológicos, además de la intensidad de las lluvias, la rugosidad del suelo, la longitud e inclinación de los taludes, la erosionabilidad del suelo y el tipo y extensión de la cobertura vegetal. Todos estos factores son tomados en cuenta en la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE). Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20).

1.2.4. Agentes y Tipos de Erosión

Los principales agentes de erosión incluyen el agua, el viento y el hielo. Estos agentes pueden remover y socavar partículas de suelo como resultado del flujo o impacto sobre la superficie de un suelo. Cada agente puede erosionar el suelo de diferentes formas. La erosión por precipitación, por ejemplo, puede ocurrir en la forma de salpicadura, láminas, o surcos.

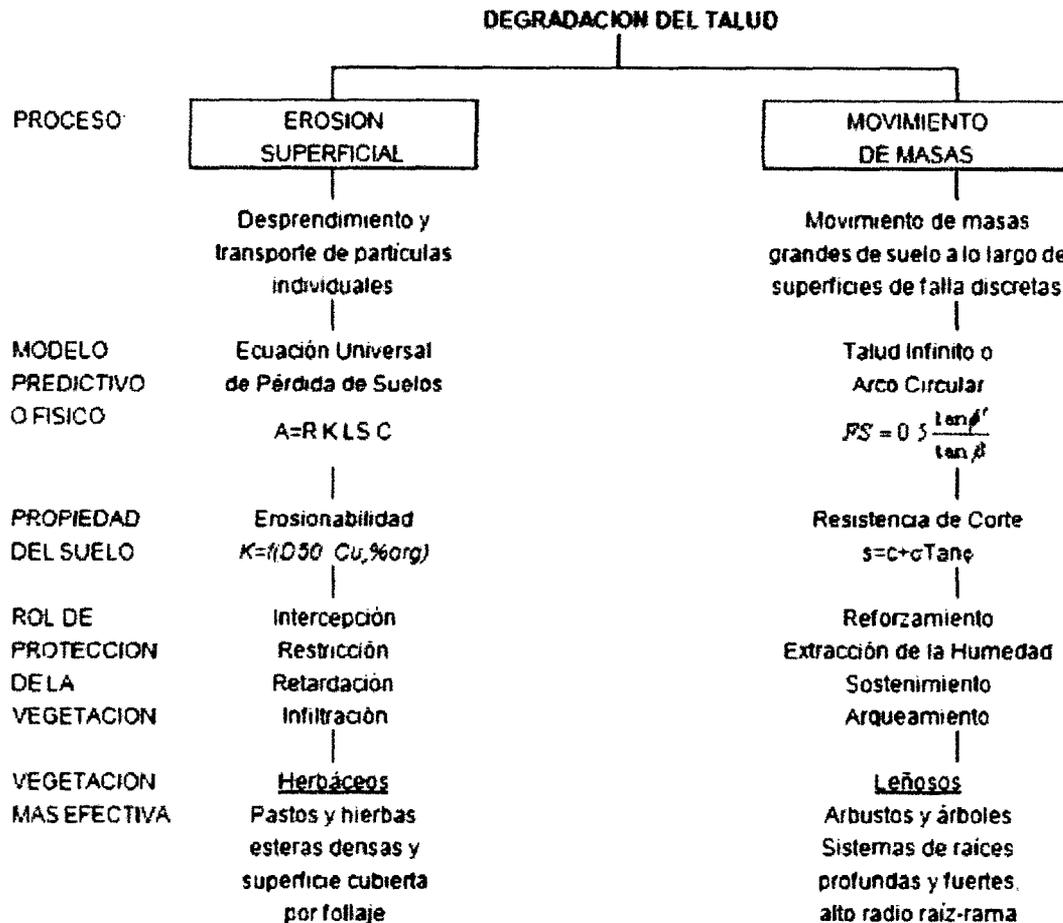


Figura 1.4. Principales características de la erosión superficial vs. movimiento de masas

1.2.5. Mecánica de la Erosión

La prevención y el control de erosión dependen del entendimiento de los mecanismos que gobiernan los procesos de erosión. La erosión es básicamente un doble proceso que involucra:

1. Desprendimiento de la partícula.
2. Transporte de la partícula.

Las fuerzas que actúan en la partícula cerca al límite entre el fluido y el lecho del cauce son mostradas esquemáticamente en la figura 1.5. Las fuerzas de tracción ejercidas por el flujo de agua son resistidas por las fuerzas inerciales o cohesivas entre las partículas.

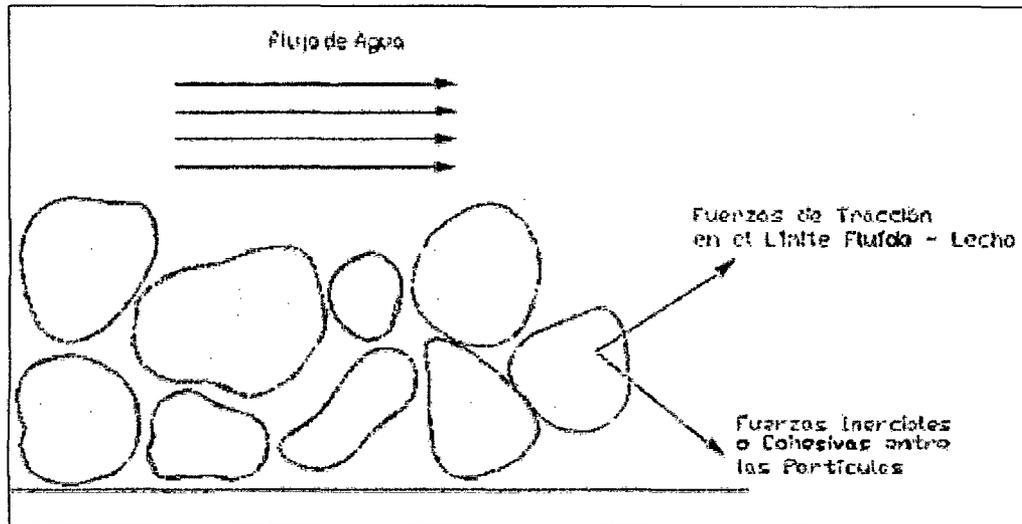


Figura 1.5. Diagrama esquemático de las fuerzas actuantes sobre las partículas en el límite flujo-lecho

La protección de la erosión consiste esencialmente en:

- Decrecimiento en la fuerza de tracción o arrastre disminuyendo la velocidad del flujo sobre la superficie o disipando la energía del agua en el área protegida.
- Incrementar la resistencia a la erosión protegiendo o reforzando la superficie con una cobertura apropiada o incrementando la resistencia entre partículas.

Tabla 1.3. Agentes y tipos de erosión

Agente	Tipos de Erosión o Procesos de Degradación
Agua	
1.	Salpicadura por gota de agua
2.	Erosión laminar
3.	Surcos
4.	Cárcavas
5.	Erosión por corriente de canal
6.	Acción de las ondas
7.	Tubificación
Hielo	
1.	Soliflucción
2.	Socavación glaciar
3.	Desgarramiento por hielo
Viento	La erosión eólica no puede ser clasificada en "tipos", en cambio puede variar principalmente por "grados".
Gravedad	
1.	Deslizamiento
2.	Flujo de tierra
3.	Avalanchas
4.	Deslizamiento de escombros

1.2.6. Erosión por Precipitación

Este tipo de erosión está controlada por cuatro factores básicos: clima, tipo de suelo, topografía y cobertura vegetal. La relación puede ser expresada esquemáticamente como sigue:

$$\text{Erosión por Precipitación} = f \left\{ \begin{array}{l} \text{Clima – intensidad de las tormentas y su duración} \\ \text{Suelo – Erosionabilidad inherente} \\ \text{Topografía – Longitud e inclinación del talud} \\ \text{Vegetación – Tipo y extensión de la cobertura} \end{array} \right.$$

Los parámetros climáticos más importantes que afectan a la erosión por precipitación son la duración y la intensidad de las lluvias.

La susceptibilidad de un suelo a la erosión es conocida como “erosionabilidad”. Suelos como los limos tienen mayor erosionabilidad que otros como la grava bien graduada. La dependencia de la erosionabilidad respecto de diversos factores se resume en la tabla 1.4.

Mayor Erosionabilidad \longrightarrow Menor Erosionabilidad

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

Donde:

- GW = grava bien graduada
- GP = grava pobremente graduada
- GM = grava limosa
- SW = arena bien graduada
- SP = arena pobremente graduada
- SM = arena limosa
- SC = arena arcillosa
- ML = limo de baja plasticidad
- MH = limo de alta plasticidad
- CL = arcilla de baja plasticidad
- CH = arcilla de alta plasticidad
- OL = suelo orgánico de alta plasticidad

Tabla 1.4. Tendencias de la Erosionabilidad de los Suelos

- Es baja en gravas gruesas y bien graduadas
- Es alta en limos uniformes y arenas finas
- Decrece con el aumento del contenido de arcilla y materia orgánica
- Decrece con una relación de vacíos baja y un contenido de humedad previo alto
- Se incrementa con el aumento de la absorción de sodios y la disminución de la resistencia iónica del agua

1.2.7. Erosión Eólica

La erosión eólica es controlada principalmente por los mismos factores que controlan la erosión por precipitación

$$\text{Erosión Eólica} = f \left\{ \begin{array}{l} \text{Clima – Temperatura, distribución de las} \\ \text{precipitaciones, velocidad del viento} \\ \text{Suelo – Textura, tamaño de la partícula, contenido} \\ \text{de humedad, rugosidad de la superficie} \\ \text{Topografía – Longitud e inclinación del talud} \\ \text{Vegetación – Tipo, altura, y densidad de la} \\ \text{cobertura, temporada} \end{array} \right.$$

Estos factores pueden ser expresados en términos de parámetros identificables y ponderables. A diferencia de la erosión por precipitación, los parámetros topográficos tales como la longitud y la pendiente de los taludes tienen una importancia relativamente baja. Por el otro lado, la rugosidad de la superficie y la presencia de barreras bajas que actúen como cortavientos pueden ser importantes. Los factores climáticos que más afectan al contenido de humedad del suelo son la cantidad y la distribución de las precipitaciones, además de la temperatura y la humedad de la zona. Solo los suelos relativamente secos son susceptibles a la erosión. Las características más importantes del viento son su velocidad, duración, dirección y grado de turbulencia. El viento sólo puede recoger y transportar en suspensión suelos secos con un tamaño menor a 0.1 mm., medida que corresponde al limo fino.

La erosión eólica consiste en tres fases: iniciación de movimiento (desprendimiento), transporte y deposición. El movimiento del suelo por acción del viento se inicia como resultado de su turbulencia y velocidad. La velocidad necesaria para iniciar el movimiento se incrementa con el peso de las partículas. Para muchos suelos esta velocidad es de 21 km/h a una altura de 0.30 m. por encima de la superficie del terreno. La velocidad requerida para mantener el movimiento una vez iniciado es menor que la requerida para desprender la partícula. La erosión generada por el agua ha mostrado un comportamiento semejante.

Los estudios de laboratorio realizados por Chepil (Ref. Bibl. N° 7) establecen que las partículas son transportadas como se muestra en la tabla 1.5. La mayor proporción de partículas de suelo transportadas por el viento se da cerca de la superficie, a una altura menor de 1 m. (3 ft). Aproximadamente un porcentaje de

entre 62 y 97 del total del suelo erosionado es transportado en esta zona cercana al suelo, hecho que sugiere la importancia de instalar barreras relativamente bajas o cortavientos que impidan el movimiento del suelo transportado por el viento. La vegetación también sirve para este propósito, en adición a sus otras funciones de control tales como el incremento de la rugosidad del suelo, desviación del viento y la unión de las partículas del suelo. Debido a estas características la vegetación puede ser usada efectivamente en combinación con barreras que atrapen las partículas de arena en suspensión y construyan dunas a lo largo de las playas. Las plantas fuertes tolerantes a las sequías y a la sal tales como la avena del mar o el pasto de la playa, funcionan bien en este aspecto.

Tabla 1.5. Movimiento de las Partículas del Suelo por Acción del Viento

Mecánica del Movimiento	Tamaño de las partículas removidas (mm)	%de suelo removido
Suspensión	<0.1	3 - 38
Saltación (salto y rebote)	0.1 – 0.5	55 - 72
Deslizamiento	0.5 – 1.0	7 - 25

Fuente: Chepil (Ref. Bibl. N° 7)

1.2.8. Tipos de Erosión Hídrica

La erosión hídrica se manifiesta de diversas formas. La erosión por precipitación empieza con las salpicaduras de las gotas de lluvia y puede progresar hasta llegar a las cárcavas (gullying). Las principales características de los diferentes tipos de erosión hídrica se muestran a continuación

- Salpicadura de las gotas de lluvia (Raindrop Splash).- Las salpicaduras resultan del impacto de las gotas de agua cayendo directamente sobre la superficie expuesta. Una enorme cantidad de partículas de suelo puede perderse de esta forma. Se estima que hasta 100 tons/acre de suelo llegan a ser desprendidas durante una tormenta intensa. Las partículas salpicadas pueden desplazarse más de 0.6 m. verticalmente y 1.5 m. horizontalmente.

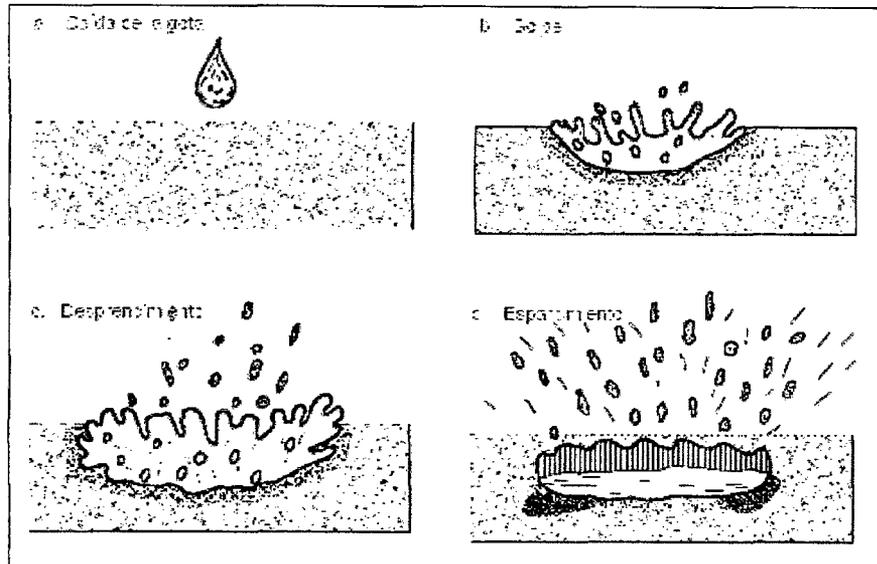


Figura 1.6. Proceso de erosión por salpicadura. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).

- Erosión Laminar (Sheet Erosion). – Este tipo de erosión es producto de la remoción del suelo, en terrenos inclinados, por capas muy delgadas o láminas. Desde el punto de vista de la energía, la erosión por salpicadura parece ser de mayor importancia que la erosión laminar pues las gotas de lluvia alcanzan velocidades de 6 a 10 m/s, mientras que el flujo sobre la superficie alcanza velocidades de 0.30 a 0.60 m/s. La erosión laminar es un importante mecanismo en la configuración del talud y en la fuente de sedimentos de los taludes de corte en terrenos de granito y andesita. Los cortes en carreteras en este tipo de suelo suelen dar la impresión de ser muy estables, no obstante la descarga de toneladas de suelo año tras año en la zanja de la vía.

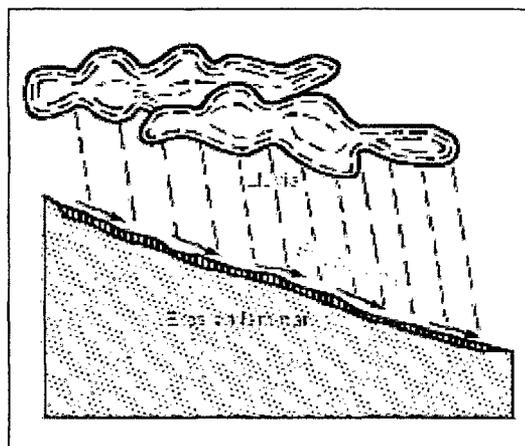


Figura 1.7. Proceso de erosión laminar. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).

- **Surcos (Rilling)** . – Este tipo de erosión se da por la remoción del agua en pequeños canales muy bien definidos donde está la concentración del flujo superficial. Generalmente es más serio que la erosión laminar pues las velocidades en los surcos suelen ser mayores que en las láminas superficiales. La erosión por surcos es la forma de degradación que más pérdidas de suelo produce durante las precipitaciones –Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20). Los surcos son lo bastante grandes y estables para ser observados a tiempo, pero lo bastante pequeños para ser eliminados fácilmente por labores de cultivo.

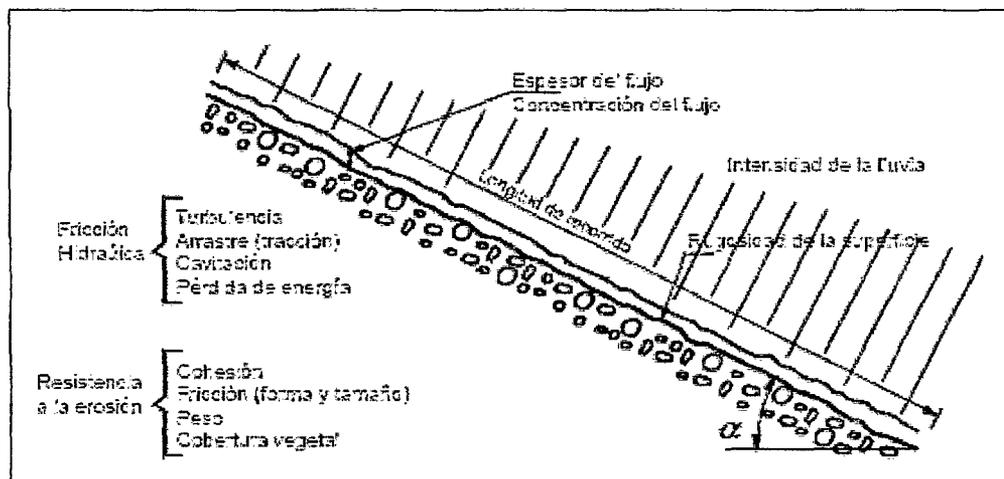


Figura 1.8. Proceso de erosión por surcos. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41)

- **Cárcavas (Gullying)**. – Las cárcavas son canales intermitentes de mayor tamaño que los surcos. Estos canales transportan el agua durante las precipitaciones e inmediatamente después de ellas. A diferencia del caso anterior, las cárcavas no pueden ser removidos por el empleo de surcos. Las cárcavas tienden a formarse donde se concentran y descargan grandes volúmenes de escorrentía sobre taludes inclinados con suelos de alta erosionabilidad. Este tipo de erosión es común en terrenos con pasto y en cuencas con vegetación leñosa. Las cárcavas no suelen ser tan significativas como los surcos en términos de pérdida de suelos; sin embargo suelen ser bastante destructivos en términos de daños en carreteras, terraplenes y cuencas.

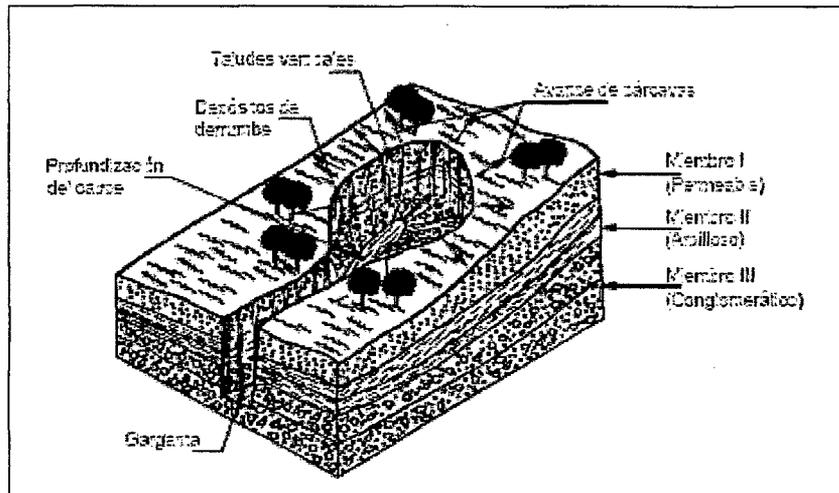


Figura 1.9. Proceso de erosión por cárcavas. Fuente: Suarez (Ref. Bibl. N° 41).

- Erosión en Flujos de Canales. – Consiste en la erosión del suelo de las orillas de los cursos de agua y/o socavación a lo largo de la base del canal. La erosión en flujo de canales debería ser considerada en forma separada de los tipos de erosión asociadas a las precipitaciones discutidas anteriormente. Existen varios procesos relacionados con la degradación de los terraplenes y canales:
 1. Pérdida de Masas. Deslizamiento inducido por el burilado del talud, excesiva inclinación del mismo o mal drenaje durante las inundaciones
 2. Erosión por Flujo. Esfuerzo de tracción impuesto por la corriente de agua.
 3. Tubificación. Erosión por infiltración como resultado del drenaje de las orillas.
 4. Erosión de Ondas. Acción de bombeo y fluctuaciones en la presión de poros.
 5. Degradación por Hielo y Deshielo. Soliflucción, inestabilidad de volúmenes y drenaje obstruido.

- Erosión por Agua Subterránea. Consiste en la remoción de partículas de suelo por la infiltración subterránea o el movimiento hacia una superficie.

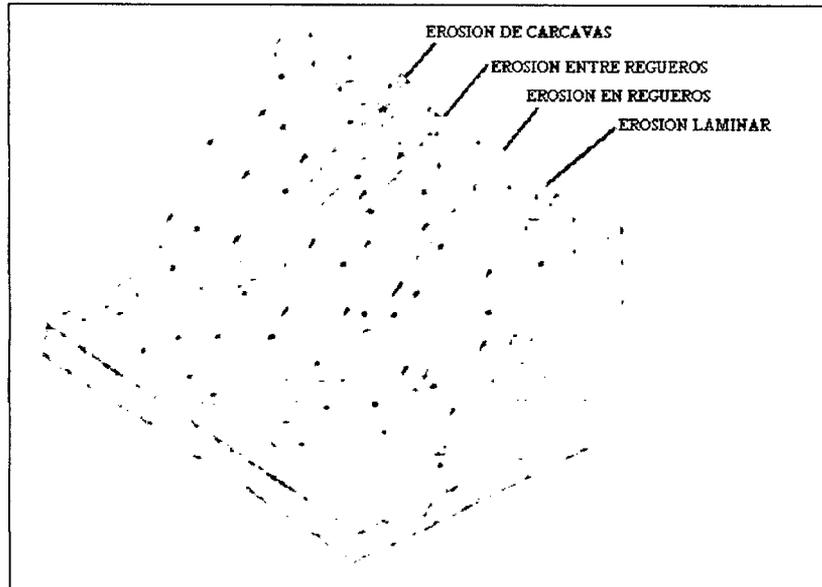


Figura 1.10. Representación esquemática de los diferentes tipos de erosión hídrica. López y Trillo (Ref. Bibl. N° 29)

1.2.9. 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 –Arias (Ref. Bibl. N° 2).

➤ Erosividad

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.

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.

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 arrollada superficial y tienen lugar los procesos de erosión laminar, erosión en regueros o surcos y erosión en cárcavas -López y Trillo (Ref. Bibl. N° 29).

➤ Erosionabilidad

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 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, 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 la lluvia y el 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 del

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en la cual se han delimitado tres campos con erosionabilidad, alta, media y baja.

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, partículas muy pequeñas con poca o nula cohesión, 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.

- **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 CO₂ 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.

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 y Trillo (Ref. Bibl. N° 29).

- **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 de la estructura del suelo. El exceso de carbonato cálcico en las partes 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, basada en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos -Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20).

- **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 cultivo, 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 %.

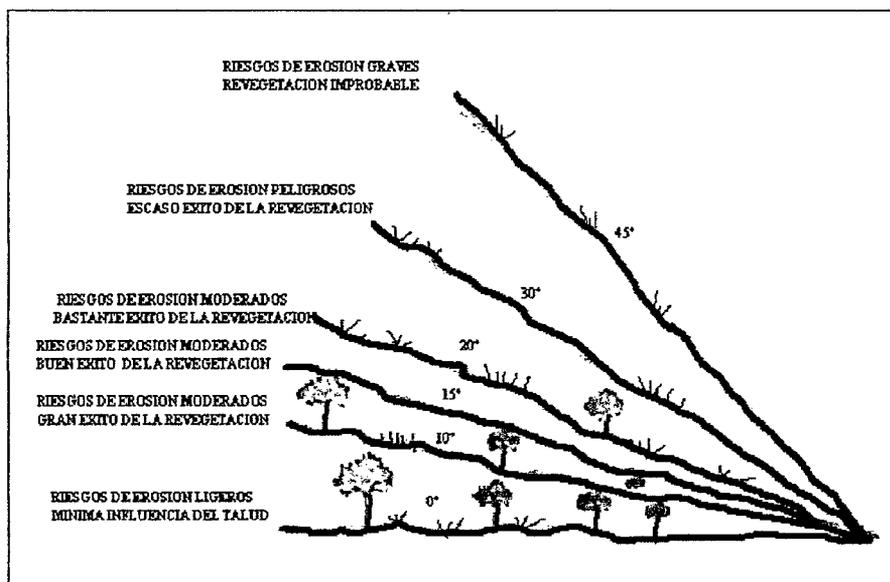


Figura 1.11. Influencia del ángulo de inclinación de un talud sobre la erosión y la revegetación. Fuente: Arias (Ref. Bibl. N° 2)

- **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 roza 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 el resultado de la combinación de varios factores -Gray, y Sotir (Ref. Bibl. N° 20.)

-La intercepción y evaporación de parte de la precipitación recibida, con lo que la cantidad de agua que llega al suelo disminuye. Este efecto de intercepción 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 y 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 y Trillo (Ref. Bibl. N° 29).

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 –Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20).

1.2.10. Predicción de la Pérdida de Suelos

Una ecuación semiempírica conocida como la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) fue desarrollada por el Servicio de Investigación de Agricultura (ARS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en los años '60. Dicha fórmula evolucionó siendo revisada, adaptada y modificada hasta nuestros días y en la actualidad es la expresión más aceptada para calcular la pérdida de suelos por los procesos de erosión.

La USLE toma en cuenta todos los factores conocidos que afectan la erosión por precipitación tales como el clima, el tipo de suelo, topografía y cobertura vegetal. Está basada en análisis estadísticos, medidos en resultados de pruebas bajo precipitaciones naturales y simuladas. La pérdida anual de un lugar estudiado es calculada basándose en la siguiente relación:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1.9)$$

Donde: A = suelo calculado por acre para un periodo de tormentas dado,
R = factor de precipitación,
K = erosionabilidad del suelo
L = factor de longitud de talud
S = factor de pendiente
C = factor de vegetación
P = factor de sistema de control de erosión

Aplicaciones del USLE

Gary and Leiser (Ref. Bibl. N° 14) y Goldman (Ref. Bibl. N° 18) proporcionan los procedimientos detallados y las tablas para estimar la pérdida de suelos calculando los valores para todos los parámetros de la USLE.

El factor climático (R) y el de erosionabilidad (K) solo varían en un orden de magnitud. En cambio el factor de cobertura vegetal (C) y el topográfico (LS) pueden variar en diversos órdenes de magnitud, como se muestra en la tabla 1.6 y la tabla 1.7, respectivamente. Más aún, estos dos factores pueden ser modificados sustancialmente para adaptarse a un determinado objetivo de control de erosión.

- **Índice de erosión pluvial (R).** Suarez (Ref. Bibl. N° 41) define el índice de erosión pluvial o factor de erosionabilidad de los aguaceros, como el producto de la energía cinética de un aguacero por su máxima intensidad en un tiempo de 30 minutos.

La energía cinética se calcula por:

$$E = 210.2 + 89 \cdot \log_{10} \cdot I \quad (1.10)$$

Donde: E (julios. m².cm⁻¹): energía cinética del aguacero.

I (cm.hora⁻¹): intensidad de la lluvia en el período considerado.

El índice de erosión pluvial R se define por:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n E_j \cdot (I_j \cdot T_j) \cdot I_{30}}{100} \quad (1.11)$$

Donde: R = (julios.m².cm.hora⁻¹), índice de erosión pluvial.

T_j = período de tiempo (horas) para intervalos homogéneos de lluvia durante el aguacero.

I₃₀ = máxima intensidad de lluvia durante el aguacero.

J = intervalos homogéneos del aguacero.

n = número de intervalos.

El valor R correspondiente a un año será la suma de los valores de R de cada una de las lluvias registradas en ese tiempo. Para obtener un valor

representativo confiable de R es necesario calcular un ciclo al menos de 10 años.

- **El factor topográfico (LS).** Puede ser modificado fácilmente reduciendo la longitud del talud. Para obtener este resultado se puede recurrir a muchos sistemas tales como la instalación de terrazas o barreras, que se encargan de reducir la longitud de un talud largo en diversos taludes más cortos. Suárez (Ref. Bibl. N° 41) presenta una forma de calcular el factor LS mediante las siguientes expresiones:

Para pendientes menores que 9%

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^{0.3} \cdot \left(\frac{0.43 + 0.30 \cdot s + 0.043 \cdot s^2}{6.613} \right) \quad (1.12)$$

Para pendientes mayores o iguales que 9%

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^{0.3} \cdot \left(\frac{s}{9} \right)^{1.3} \quad (1.13)$$

Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20) proponen los siguientes factores:

Tabla 1.6. Valores del Factor Topográfico (LS) para Taludes

Relación de Talud (H:V)	Gradiente del Talud S(%)	Valores de LS para Longitudes Seleccionadas (L) de Taludes						
		10 (3.0)	30 (9.1)	50 (15.2)	100 (30.5)	300 (91.0)	500 (152.0)	1000 (305.0)
20:1	5	0.17	0.29	0.38	0.53	0.93	1.20	1.69
10:1	10	0.43	0.75	0.97	1.37	2.37	3.06	4.33
8:1	12.5	0.61	1.05	1.36	1.92	3.33	4.30	6.08
6:1	16.7	0.96	1.67	2.15	3.04	5.27	6.80	9.62
5:1	20	1.29	2.23	2.88	4.08	7.06	9.12	12.90
4:1	25	1.86	3.23	4.16	5.89	10.20	13.17	18.63
3:1	33.5	2.98	5.17	6.67	9.43	16.33	21.09	29.82
2.5:1	40	4.00	6.93	8.95	12.65	21.91	28.29	40.01
2:1	50	5.64	9.76	12.60	17.82	30.87	39.85	56.36
1.75:1	57	6.82	11.80	15.24	21.55	37.33	48.19	68.15
1.50:1	66.7	8.44	14.67	18.87	26.68	46.22	59.66	84.38
1.25:1	80	10.55	18.28	23.60	33.38	57.81	74.63	105.55
1:1	100	13.36	23.14	29.87	42.24	73.17	94.46	133.59

Fuente: Adaptado de Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20)

- **El factor de cobertura vegetal (C).** Afecta la erosión a través de tres zonas de influencia: techo o cubierta, cobertura en el suelo y residuos vegetales en el interior y sobre el suelo. Para suelos completamente

desprotegidos (tabla 1.7), el valor de C es igual a la unidad. La influencia de la cobertura vegetal es principalmente comparada con el tipo, extensión y condición de la cubierta. Esta influencia puede ser rápidamente comprobada al comparar los valores del factor C con las condiciones de la cobertura en la tabla 1.7. Inclusive en la ausencia de una cubierta apreciable el valor de C desciende a 0.003 cuando la cobertura es del 95% del terreno. Esto corresponde a una disminución de casi mil veces en las pérdidas de suelo por erosión sobre terreno descubierto. Ningún otro factor es tan susceptible al control con tan dramáticos resultados como este. El humus y las coberturas de terreno biotécnicos proporcionan una protección inicial a la erosión y favorecen el establecimiento y rendimiento de la cobertura vegetal. A ellos también se les asignan valores de C que son útiles para evaluación y comparación, tal como está indicado en la tabla 1.8.

Tabla 1.7. Valores del Factor C para Pastos, Praderas y Terreno Baldío

Tipo y altura de cubierta	Área cubierta (%)	Tipo de Cubierta ^a	Valores de C para la Cubierta Seleccionada y las Condiciones de la Cobertura del Terreno (% del terreno cubierto)					
			0	20	40	60	80	95-100
			Cubierta no apreciable	—	G	0,45	0,2	0,1
		W	0,45	0,24	0,15	0,09	0,043	0,011
Cubierta de maleza alta o arbusto (altura de caída de 0.5 m)	25	G	0,36	0,17	0,09	0,038	0,012	0,003
		W	0,36	0,2	0,13	0,082	0,041	0,011
	50	G	0,26	0,13	0,07	0,035	0,012	0,003
		W	0,26	0,16	0,11	0,075	0,039	0,011
	75	G	0,17	0,1	0,06	0,031	0,011	0,003
		W	0,17	0,12	0,09	0,067	0,038	0,011
Monte bajo apreciable, arbustos, (altura de caída de 2 m)	25	G	0,4	0,18	0,09	0,04	0,013	0,003
		W	0,4	0,22	0,14	0,085	0,042	0,011
	50	G	0,34	0,16	0,09	0,038	0,012	0,003
		W	0,34	0,19	0,13	0,081	0,041	0,011
	75	G	0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003
		W	0,28	0,17	0,12	0,077	0,04	0,011
Árboles sin maleza apreciable Maleza baja (4 m altura de caída)	25	G	0,42	0,19	0,1	0,041	0,013	0,003
		W	0,42	0,23	0,14	0,087	0,042	0,011
	50	G	0,39	0,18	0,09	0,04	0,013	0,003
		W	0,39	0,21	0,14	0,085	0,042	0,011
	75	G	0,36	0,17	0,09	0,039	0,012	0,003
		W	0,36	0,2	0,13	0,083	0,014	0,011

Fuente: Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20)

^aG: La cubierta en la superficie es pasto, plantas análogas al pasto, humus compactado o desperdicios (litter) de por lo menos 2 inches de altura.

W: La cubierta consiste fundamentalmente en plantas frondosas o herbáceas (como maleza) con pequeños sistemas de raíces laterales cerca de la superficie

Tabla 1.8. Factores para Diferentes Coberturas

Tipo de Cobertura	Factor C	Reducción en la Pérdida de Suelos (%)
Ninguna	1.0	0
Vegetación Nativa	0.01	99
Siembras temporales		
90% de cobertura, pastos anuales, sin compost	0.1	90
Humus de fibras leñosas. 0.75 ton/acre con siembra	0.5	50
Estera de virutas, red de yute (taludes superiores a 2:1)	0.3	70
Humus de paja		
1.5 tons/acre (3.4 t/ha), siembra provisional	0.2	80
4.0 tons/acre (9.0 t/ha), siembra provisional	0.05	95

Fuente: Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20)

El humus proporciona protección inmediata a los terrenos descubiertos y en ciertas instancias pueden tener un mejor desempeño que los sembríos temporales.

Los valores del factor C suelen variar según ciertos tipos de tratamiento superficial tales como humus, sembrío y transplante. Por ejemplo, el factor C para pastos puede variar desde 1.0 (para terreno descubierto), hasta 0.01 entre la siembra inicial hasta el total establecimiento. Para este caso se puede establecer un valor promedio o ponderado para un periodo de construcción, según sucesivos intervalos de tiempo Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20).

- **El factor del control de erosión P.** Es interpretado de diversas formas. Este factor puede verse desde un punto de vista mecánico, hidráulico o de nivelación para reducir la velocidad de escorrentía o la tendencia del agua a fluir directamente talud abajo. Las medidas estructurales incluyen instalaciones de estabilización (rápidas o chutes, canaletas, presas de retención), separadores de nivel, derivaciones, y bermas de intercepción. Incluso los depósitos de sedimentos pueden ser clasificados como una forma de control. Estos depósitos no detienen la erosión pero evitan que el material erosionado abandone el terreno y produzcan daños laterales. Los métodos para determinar el valor de P para medidas estructurales y depósitos de sedimentos se encuentran en la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, 1973. En los terrenos de construcción el valor de P refleja la condición del terreno después de las labores de nivelación.

**Tabla 1.9. Condiciones de la Superficie del Terreno
Valores del Factor P**

Condiciones de la Superficie	Factor P
Compacto y liso	1.3
Paso de maquinaria pesada sobre el contorno del talud	1.2
Paso de maquinaria pesada talud abajo o talud arriba	0.9
Paja compactada	0.9
Corte áspero e irregular	0.9
Suelo suelto de 12 pulgadas (30 cm.) de altura	0.8

Fuente: Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20)

Se puede observar un interesante comportamiento. Un talud compactado y liso es el más vulnerable a la erosión; también es el menos proclive al establecimiento de cobertura vegetal por siembra. El paso de maquinaria pesada talud abajo o talud arriba es preferible que el paso sobre el contorno del talud. Las huellas de la maquinaria en el primero pueden generar surcos y la consecuente erosión. Como se observa en la tabla 1.9, los cambios en las condiciones de la superficie del terreno no significan variaciones significativas en el valor del parámetro P pues estos son cercanos a la unidad.

- **Índice de Erosionabilidad del Suelo K.** Suarez (Ref. Bibl. N° 41) plantea que el factor K del suelo se evalúa de forma experimental para parcelas tipo. Para cada suelo se mide la relación entre el peso de suelo perdido ($t \cdot ha^{-1}$) y el número de unidades del índice de erosión pluvial correspondientes, en condiciones sin cultivo continuo. Con el conjunto de valores obtenidos se calcula el promedio de K para cada suelo, a partir del cual se establece una ecuación de regresión en función de las variables representativas de sus propiedades físicas.

La regresión establecida viene expresada por la ecuación:

$$K = \frac{10^{-4} \cdot 2.71 \cdot M^{1.14} (12 - a) + 4.20 \cdot (b - 2) + 3.23 \cdot (c - 3)}{100} \quad (1.14)$$

Donde: M , factor representativo de la textura. Se calcula como el producto del porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0.002-0.1 mm. de diámetro, expresado en %, por el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0.002-2 mm. de diámetro,

expresado también en %, o lo que es igual, a 100 menos el % de arcilla de la muestra.

$$M = [100 - \% \text{ arcilla}] \cdot [\% (\text{limo} + \text{arena muy fina})] \quad (1.15)$$

a, % de materia orgánica

b, número correspondiente a la estructura del suelo según la siguiente codificación:

1 – grano muy fino (<1mm) 2 – grano fino (1-2 mm)

3 – grano medio (2-5mm) y gránulo grueso (5-10mm)

4 – grano liso, prismático, columnar y muy grueso (>10mm)

c, clase de permeabilidad del perfil, según la siguiente codificación el *USDA-Soil Survey Manual*:

1 – rápida a muy rápida

2 – medianamente rápida

3 – moderada

4 – moderadamente lenta

5 – lenta

6 – muy lenta

Los valores de la textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15 – 20 cm, superiores del suelo y los de permeabilidad a todo su perfil. Los valores más elevados calculados para *K* son de 0.92 y corresponden a suelos en que la fracción limo más arena muy fina, representa virtualmente la totalidad de la muestra y es nulo el contenido de materia orgánica.

Limitaciones de la USLE

La USLE es una ecuación empírica que calcula la erosión laminar y por surcos en un área relativamente pequeña. Aunque toma en cuenta todos los factores que afectan la erosión hídrica y es ampliamente usada en todo el mundo, tiene las siguientes limitaciones:

- Es una ecuación empírica.- Se requiere de un criterio considerablemente amplio para asignar los valores de cada uno de los factores. Esto es particularmente importante en el caso del factor de vegetación o cobertura.
- Predice pérdidas anuales promedio.- El factor de precipitación está basado en lluvias de 2 años, cuya duración es 6 horas. Tormentas o

eventos climáticos inusuales pueden generar mayores pérdidas de sedimentos que las previstas.

- No predice la erosión por cárcavas.- La USLE predice la erosión por surcos y laminar, no la que se produce por cárcavas o canales grandes.
- No predice la entrega de sedimentos.- La USLE predice la pérdida de suelos, pero no la deposición de sedimentos.

A pesar de estas limitaciones, la USLE facilita un método simple y confiable para estimar la pérdida de suelos, identificando las áreas críticas y evaluando la certeza de las medidas de control de pérdidas de suelo. Además aporta una base racional para el dimensionamiento de los depósitos y otros sistemas de captación de sedimentos.

1.2.11. Principios del Control de Erosión

La erosión superficial puede ser controlada o prevenida observando algunos principios básicos. Estos principios pueden ser aplicados universalmente y deben ser tomados en cuenta aún si los tratamientos de bioingeniería de suelos son contemplados. Muchas medidas y productos de control de erosión han sido introducidos en los últimos años; estos son más efectivos cuando se aplican según los principios que se enumeran a continuación:

1. Ajustar el plan de desarrollo del lugar de trabajo. Se debe evitar trabajos de nivelación y terraplenes en áreas propensas a la erosión.
2. Instalar dispositivos hidráulicos de transporte para manejar la escorrentía.
3. Mantener bajas las velocidades de escorrentía.
4. Derivar la escorrentía y alejarla de los taludes empinados y áreas descubiertas construyendo drenajes y bermas interceptoras.
5. Mantener la vegetación nativa en la medida que sea posible.
6. Si la vegetación debe ser removida, limpiar la zona en pequeños incrementos limitando el tiempo de exposición.
7. Proteger las áreas expuestas con humus y cubierta de rápido crecimiento.
8. Construir depósitos de sedimentos para prevenir la erosión del suelo.
9. Instalar medidas de control de erosión lo mas temprano posible.
10. Inspeccionar y mantener las medidas de control.

Teniendo en cuenta estos principios básicos se minimizarán la erosión.

Tanto las vías de transporte como los desarrollos urbanos establecidos sobre terrenos inclinados requieren de trabajos de excavación y nivelación para adaptar la topografía del terreno. La manera en que estas labores sean planificadas y ejecutadas, y la naturaleza de la topografía resultante no solo afectará el impacto visual o estético, sino también la estabilidad superficial de los taludes y la efectividad de los esfuerzos de revegetación. Un talud lineal o plano presentará una pérdida mayor que uno cóncavo o con pendiente decreciente. Los conceptos de modelamiento del terreno y nivelación serán discutidos en el Capítulo 4 de este trabajo de investigación.

1.2.12. Naturaleza de los Movimientos de Masas

Tipos de Movimiento de Talud

Diversos esquemas han sido propuestos para clasificar y describir los movimientos de taludes. Las características más importantes y los atributos más típicos de los movimientos de masas son resumidos en la tabla 1.10.

Tabla 1.10. Agentes y tipos de erosión

A. MATERIALES	
1.	Hielo
2.	Roca (intemperizada, plegada, agrietada, estratificada)
3.	Suelo (seco o saturado, arenoso o arcilloso)
B. VELOCIDAD	
1.	Rápido (segundos a minutos): avalanchas, desprendimiento de rocas, deslizamiento de tierra
2.	Intermedio (minutos a horas): deslizamiento de escombros, asentamientos, deslizamiento de bloques
3.	Lento (días a años): soliflucción, esparcimiento lateral
C. MECANISMOS DE FALLA	
1.	Deslizamientos: Movimiento a lo largo de superficies de corte de grandes masas de roca y tierra. (a) Plano: Ocurre en taludes donde existe algún control geológico como planos de estratificación, agrietamientos, mantos coluviales. (b) Rotacional: Ocurre en taludes compuestos por suelos cohesivos y homogéneos en los cuales la resistencia al deslizamiento es independiente de la profundidad. La superficie de deslizamiento crítica suele tener forma de arco.
2.	Flujos: Flujos casi viscosos en los cuales es difícil diferenciar una superficie de deslizamiento; el movimiento desaparece con la profundidad. Este tipo de movimiento ocurre en suelos saturados (arenas, limos y arcillas) con un alto contenido de agua.
3.	Caidas: Masas de material desprendidas producto de rocas agrietadas y quebradizas formando taludes abruptos.

La clasificación propuesta por Varnes (Ref. Bibl. N° 43 y 44), es quizás la más útil y empleada. Su sistema está basado en dos variables principales:

1. Tipo de movimiento.
2. Tipo de material.

Los tipos de movimiento o mecanismos de falla están divididos en cinco principales grupos: caídas, derrumbes, deslizamientos, esparcimientos y flujos, como se muestra en la tabla 1.11. Los materiales son divididos en dos tipos: roca y material suelto.

Es de gran importancia comprender e identificar varios tipos de movimientos de taludes, no solo para evitar los inestables y peligrosos, sino también con la finalidad de diseñar medidas de prevención y control.

Tabla 1.11. Clasificación Abreviada de Movimiento de Taludes

Tipo de Movimiento		Tipo de Material		
		Lecho de roca	Material Suelto	
			Predominantemente Grueso	Predominantemente Fino
Caídas		Caída de rocas	Caída de escombros	Caída de tierra
Derrumbes		Derrumbe de rocas	Derrumbe de escombros	Derrumbe de tierra
Deslizamientos				
Rotacional	Pocas unidades	Asentamiento de rocas	Asentamiento de escombros	Asentamiento de tierra
Traslacional	Muchas unidades	Deslizamiento en bloque de rocas	Deslizamiento en bloque de escombros	Deslizamiento en bloque de tierra
		Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de escombros	Deslizamiento de tierra
Esparcimientos Laterales		Esparcimiento de rocas	Esparcimiento de escombros	Esparcimiento de tierra
Flujos		Flujo de rocas	Flujo de escombros	Flujo de tierra

Fuente: Adaptado de Varnes (Ref. Bibl. N° 43)

Causas de las Fallas de Taludes

La estabilidad de los taludes es gobernada por variables topográficas, geológicas y climáticas que controlan el esfuerzo de corte y la resistencia al corte de un talud. Los taludes fallan cuando el esfuerzo de corte supera a la resistencia al corte a lo largo de una superficie crítica de falla. El factor de seguridad de un talud está definido por la relación existente entre la resistencia

al corte y el esfuerzo de corte sobre la superficie de falla. Esta superficie también determina el límite entre el terreno estable y el móvil.

Las causas de la inestabilidad de taludes han sido agrupadas en dos categorías por Varnes (Ref. Bibl. N° 44) como se ilustra en la tabla 1.12. El aumento de agua puede contribuir al decrecimiento en la resistencia al corte y el aumento en el esfuerzo de corte en forma simultánea. El drenaje y las medidas de derivación sin duda se encuentran entre las medidas de prevención y control de falla de taludes más efectivas. Las medidas de remediación de deslizamientos y su efectividad han sido tratadas por Zaruba y Menci (Ref. Bibl. N° 46), Hutchinson (Ref. Bibl. N° 23) y Schuster (Ref. Bibl. N° 40).

Tabla 1.12. Causas de las Fallas de Taludes

Incremento en el Esfuerzo de Corte
1. Sobrecarga sobre el talud (estructuras y rellenos)
2. Remoción del soporte lateral (cortes y excavaciones al pie del talud)
3. Cambios rápidos en el nivel de agua adyacente al talud (abatimiento rápido)
4. Incremento en el esfuerzo lateral (fisuras y hendiduras llenas de agua)
5. Carga por sismo (incrementa las fuerzas horizontales y talud abajo)

Decremento en la Resistencia al Corte
1. Presión de poros incrementada, lo cual reduce el esfuerzo efectivo (infiltración del agua de las lluvias, descarga descontrolada del agua de los drenajes)
2. Presencia de arcillas expansivas (recepción de agua con una pérdida de cohesión intrínseca)
3. Degradación fisicoquímica y por intemperismo (intercambio de iones, hidrolitos, etc)
4. Falla progresiva debido ablandamiento por falla de corte.

La cobertura vegetal puede mejorar muchas de las condiciones que causan inestabilidad. El desarrollo de vegetación leñosa sobre un talud puede incrementar la resistencia al corte del suelo por el reforzamiento de las raíces, disminuir el contenido de humedad por la evotranspiración e incrementar la estabilidad en general por la acción de anclaje y sostenimiento. La contribución de la vegetación a la estabilidad de la masa es evaluada en detalle en el capítulo siguiente.

Indicadores de la Inestabilidad de Taludes

Existen una serie de indicadores de inestabilidad de laderas que son muy útiles para identificar el potencial del movimiento de taludes. La identificación de

taludes inestables o taludes con un alto potencial de deslizamiento puede ser realizado mediante ciertos indicadores topográficos, forestales, hidrológicos y geológicos, tal como se describe en la tabla 1.13. La mayor parte de estas señales de inestabilidad pueden ser visualizadas por un reconocimiento de campo. Existen señales para medidas preventivas o previsoras que deberían ser empleadas durante y después de la perturbación del talud.

Tabla 1.13. Características que indican deslizamientos o potencial de desprendimiento

	Característica	Significado
1	Colinas, topografía disecada	Característica común en deslizamientos antiguos y activos (de muchos componentes individuales). La masa deslizante es propensa a cárcavas.
2	Cambio abrupto en la pendiente del talud	Puede indicar tanto áreas de antiguos deslizamientos o un cambio en las características de erosión del material yacente; la parte con menor pendiente suele ser la más débil y presenta mayor contenido de agua.
3	Escarpas y grietas	Define la ubicación de un deslizamiento activo o recientemente activo. La edad de las escarpas puede ser estimadas por la cantidad de vegetación existente; el ancho de las grietas puede servir para estimar tasas de movimiento relativo.
4	Topografía escalonada	Indica falla progresiva; una compleja sucesión de deslizamientos rotacionales que puede hacer otorgar a la superficie de la zona una apariencia escalonada.
5	Taludes con forma redondeadas.	Indicador de un área de anteriores episodios de soliflucción o flujos de tierra,
6	Charcas en las laderas	Captaciones locales o depresiones formadas como característica de la infiltración en 4 actos que pueden agravar el proceso de falla.
7	Precolación en laderas	Común en masas en deslizamiento o con alto potencial de sufrir ese fenómeno; también puede ser identificada al estar relacionada con la presencia de vegetación freatófita.
8	Vegetación incongruente	Áreas de vegetación muy joven o diferente respecto a la matriz pueden indicar recientes deslizamientos o terreno inestable.
9	Árboles sesgados	Árboles inclinados sobre un talud son indicadores de episodios previos de movimiento de taludes o flujo de suelos.
10	Planos de estratificación o juntas	Potenciales planos de deslizamiento para movimientos de talud traslacional.

Peck (Ref. Bibl. N° 37) estableció un postulado que es útil para identificar taludes potencialmente inestables; a saber, si no hay evidencia de antiguos deslizamientos en el terreno, entonces es bastante improbable que una actividad

constructiva moderada inicie uno nuevo. Por el otro lado, si abundan antiguos deslizamientos, entonces es bastante probable que operaciones menores de construcción activen un antiguo deslizamiento o conduzcan a uno nuevo.

1.3. Rol de la Vegetación en la Estabilidad de Taludes

La influencia de la vegetación en la estabilidad de taludes, hablando en términos hidromecánicos, es estudiada en este capítulo. La estabilización y los beneficios relacionados con la protección dependen del tipo de vegetación y del proceso de degradación de taludes.

La pérdida o remoción de suelos puede ser producto ya sea de un incremento de las tasas de erosión o de una mayor frecuencia de las fallas del talud. Esta relación de causa y efecto puede ser demostrada como resultado de pruebas de laboratorio y campo y se puede encontrar en la literatura afín al tema.

La mayor parte de la vegetación puede tener influencia en la estabilidad de taludes. Sin embargo, en ocasiones esta influencia puede ser adversa o puede generar impactos indeseables; por ejemplo, puede llegar a interferir en las labores de mitigación de inundaciones en las llanuras destinadas al control de esos fenómenos. Una serie de técnicas y estrategias es enumerada en este capítulo para maximizar los beneficios y disminuir la necesidad de las plantas.

La correcta elección del tipo de plantas es determinante. Una cobertura densa de pasto o algún tipo de vegetación herbácea, por ejemplo, proporciona una de las mejores protecciones contra la erosión superficial de las precipitaciones y el viento. Por el otro lado, la vegetación leñosa y de raíces profundas es más efectiva si se desea prevenir fallas de estabilidad de masas. El uso de la bioingeniería de suelos, así como métodos biotécnicos, pueden ser vistos como medios para minimizar la necesidad de vegetación y potenciar sus beneficios.

1.3.1. Influencia de la Erosión Superficial

Funciones Estabilizadoras

La vegetación juega un papel extremadamente importante en el control de la erosión por precipitación. Las pérdidas de suelos debido a este tipo de erosión pueden disminuirse a la centésima parte –USDA (Ref. Bibl. N° 42) - manteniendo una densa cobertura de césped, pastos, o vegetación herbácea. Los efectos benéficos de este tipo de vegetación se muestran a continuación:

- *Intercepción.*- El follaje y los residuos absorben la energía de las precipitaciones y evitan el desprendimiento de las partículas por la salpicadura de las gotas de lluvia.

- *Restricción.*- Los sistemas de raíces enlazan o restringen físicamente las partículas del suelo.
- *Retardación.*- Los tallos y el follaje incrementan la rugosidad de la superficie y disminuye la velocidad de escorrentía.
- *Infiltración.*- Las plantas y sus residuos ayuda a mantener la porosidad del suelo y su permeabilidad, con lo cual se demora el proceso de escorrentía.

En el caso de la erosión superficial, la vegetación herbácea y los pastos, son más efectivos que la vegetación leñosa pues proporciona una cobertura densa.

Factor de Cobertura Vegetal

Una buena medida de la influencia de la vegetación en la prevención de la erosión de suelos puede ser obtenida al analizar la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE). La USLE proporciona un método simple y claro para estimar la pérdida de suelos y permite una idea del rango de variabilidad de cada uno de los parámetros, su importancia relativa en la erosión y la medida en la que puede ser modificada para manejar o limitar la pérdida de suelos.

Vegetación Recomendada

Bajo condiciones normales, una densa cobertura de pasto o vegetación herbácea proporciona la mejor protección contra la erosión superficial producida por el viento y las lluvias. Una cobertura de pasto puede ser establecida para conseguir tales fines. Las mixturas de siembra normalmente incluyen pastos que germinan rápidamente, tales como centeno o pastos anuales, con la finalidad de proporcionar una protección inmediata y a corto plazo, y los pastos perennes de crecimiento más lento, que toman más tiempo para establecerse, pero que proporcionan una mejor protección. La mezcla óptima de siembra depende del tipo de suelo, del lugar y de las condiciones climáticas. Se debería consultar con un horticultor familiarizado con las condiciones locales. La adecuación del terreno, el humus y la fertilización también puede ser necesaria para asegurar la germinación y establecimiento.

1.3.2. Influencia sobre la Erosión de las Riberas

Las orillas de los cursos de agua y los diques de contención son objetos de erosión y socavación por acción del flujo de agua. El efecto erosivo del agua aumenta con la velocidad del flujo. La vegetación sobre los taludes ayuda a disminuir este proceso de erosión de la siguiente manera: en la parte superior del terreno recubre la superficie además de reducir la velocidad del flujo adyacente a la interfase suelo / agua, mientras que en la parte inferior del terreno, las raíces restringen las partículas de suelo del terreno. La extensión sobre la cual la vegetación proporciona estos beneficios depende del área de la vegetación en contacto con el flujo de agua y de la flexibilidad de los cursos de agua. El pasto denso y la maleza que se extienden a lo largo de numerosas bifurcaciones son más efectivos en este aspecto.

Existe cierta controversia acerca de la prudencia de permitir a la vegetación leñosa crecer libremente sobre los diques de contención, particularmente sobre secciones revestidas. Las objeciones al respecto incluyen la pérdida de capacidad de transporte debido al incremento de la rugosidad, dificultad de inspección, estorbos durante las operaciones de control de inundaciones y supuestos riesgos en la integridad estructural como resultado y la penetración de las raíces y la consecuente tubificación. En respuesta a estas objeciones se debería tener en cuenta que en los grandes ríos un incremento en la rugosidad del canal tendría un efecto insignificante en la etapa de diseño de la inundación. Los efectos de la vegetación en la integridad estructural de las riberas arenosas fueron investigados por Shields y Gray (Ref. Bibl. N° 39). Ellos realizaron un extensivo estudio a lo largo de un tramo de 10 Km. de ribera arenosa adyacente al río Sacramento cerca de Elkhorn, California. Sus estudios concluyeron que la vegetación leñosa no afecta significativamente la integridad estructural de la ribera y que no se generó ningún vacío que pudiera ser atribuido a la vegetación recientemente instalada. Por el contrario, la presencia de las raíces reforzó el suelo e incrementó la resistencia al corte en forma sensible.

1.4. Modelos matemáticos.

1.4.1. Modelo matemático de Duboys y similares

En este ítem, se hará mención del desarrollo de los modelos matemáticos 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, el tomó como hipótesis que el suelo erosionaba por capas de espesor d' , estableciendo la siguiente ecuación:

$$q_{bv} = k \cdot \tau_0 \cdot (\tau_0 - \tau_c) \quad (1.16)$$

Donde: q_{bv} = Volumen erosionado por unidad de tiempo y de ancho, m^2/s
 k = Coeficiente de erosionabilidad, $m^2/s - Pa^2$
 τ_0 = Esfuerzo total, cortante Pa
 τ_c = Esfuerzo cortante crítico, Pa; cuya definición está basada a la iniciación del movimiento de partículas, es decir, es el esfuerzo del agua necesario para iniciar el desplazamiento de partículas.

Además:

$$\tau_c = C_f \cdot d'(\gamma_s - \gamma) \quad (1.17)$$

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

Shields (Ref. Bibl. N° 9), realizó ensayos de laboratorio en canales de 0.40 y 0.80 m con material $1.56 \text{ mm} < D_s < 2.47 \text{ mm}$, encontrando la siguiente relación:

$$q_{bv} = \frac{A_f \cdot q \cdot S \cdot (\tau_0 - \tau_c)^m}{D_s} \quad (1.18)$$

Donde A_f = Constante que debe ser determinada con pruebas.

q = Caudal unitario, m^2/s

S = Pendiente de energía

Chang, Simons y Richardson (Ref. Bibl. N° 9) realizaron estudios con arenas, encontrando la siguiente relación:

$$q_{bv} = k_t \cdot U \cdot (\tau_0 - \tau_c) \quad (1.19)$$

Donde k_t = constante que depende de las propiedades de arena.

U = Velocidad promedio, m/s

Schoklitsch (Ref. Bibl. N° 9), realizó pruebas en el laboratorio desde 1914, siendo la última versión de su ecuación la siguiente:

$$q_{bv} = 2500 \cdot S^{3/2} (q_0 - q_c) \quad (1.20)$$

Temple (Ref. Bibl. N° 9) usa la siguiente relación en sus investigaciones de erosión en presas de tierra, para caudales grandes:

$$\frac{d_e}{d_t} = k \cdot (\tau_e - \tau_c)^a \quad (1.21)$$

Donde d_e/dt = Erosión en volumen por unidad de área por unidad de tiempo m^3/m^2-t

k = Coeficiente de relación de erosión

a = Exponente de relación de erosión

t_e = Esfuerzo cortante efectivo, Pa.

Además:

$$t_e = \gamma \cdot dS \cdot (1 - C_{Ff}) \cdot (n'/n)^2 \quad (1.22)$$

Donde γ = peso específico, N/m^3

d = tirante del flujo, m

s = pendiente de energía, m/m

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

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

Para suelos cohesivos, $n' = 0.0156$, según Temple y Hanson (Ref. Bibl. N° 9).

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

$n = \exp\{C_i\{0.0831 \ln^2(C_i) - 0.637 \ln(C_i) + 1.346\} - 4.16\}$; si $q/C_u < 0.0025 C_i^{2.5}$,

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

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

$n = \exp\{0.126C_i - 4.16\}$; si $36 < q/c_u$ (2-11)

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

$$C_i = 2.5 \cdot (h_v \cdot M) \quad (1.23)$$

Donde h = longitud representativa del vegetal
 M = densidad en tallos por unidad de área.

Resumiendo las investigaciones de Hanson (Ref. Bibl. N° 9), consistentes en ensayos de laboratorio con canales de tierra de pendientes 0.5 y 1.5%, se partió de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_r = k \cdot (\tau_e - \tau_c) \quad (1.24)$$

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. (Ref. Bibl. N° 9), encontró en pruebas de laboratorio con arcillas, que la tensión crítica es nula, Lavelle y Mofgeld (Ref. Bibl. N° 9) desprecian la tensión crítica para cuestiones de transporte de sedimentos, así:

$$\varepsilon_r = k \cdot (T_e) \quad (1.25)$$

Sería una ecuación mas apropiada.

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

$$\tau_e = dS \cdot (n'/n)^a \quad (1.26)$$

Donde a = varia de 4/3 a 2, arbitrariamente Simons y Senturk (Ref. Bibl. N° 9), consideran un valor de 3/2.

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

1.4.2. Erosión y Transporte de Sedimentos KINEROS

El Modelo Cinemática de Escorrentía y Erosión (KINEROS, por sus siglas en inglés) es un software desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos que puede simular el movimiento del suelo erosionado a través del movimiento del agua superficial. KINEROS contabiliza por separado la erosión causada por la energía de las gotas de lluvia y la erosión causada por el flujo de agua, contabiliza la simulación a través del canal y los elementos charco. Una limitación necesaria es que, debido a que un solo tamaño de partícula es empleado para caracterizar el material erosionado, la partícula efectiva de suelo requiere ser la misma para todos los elementos de erosión.

Erosión de Terrenos Elevados: La ecuación general usada en KINEROS para describir la dinámica de los sedimentos en cualquier punto a sobre la superficie de flujo es una ecuación de balance de masa similar a la que se emplea para el flujo de agua dinámica, Bennett (Ref. Bibl. N° 9.)

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q(x,t) \quad (1.27)$$

donde C_s = concentración de sedimentos [L^3/L^3]

Q = tasa de descarga de agua [L^3/T]

A = área de la sección del flujo [L^2]

e = tasa de erosión del lecho de suelo [L^2/T]

q_s = tasa de sedimentación lateral del caudal para canales [$L^2/T/L$]

Para terrenos elevados, se asume que e se constituye de dos principales componentes: producción de suelo erosionado por salpicadura o precipitación sobre terreno sin protección, y erosión (o deposición) hidráulica por la interacción entre la fuerza del agua sobre el suelo y la tendencia de las partículas de suelo de establecerse por acción de la fuerza de gravedad. De esta forma puede ser positiva (incremento de la concentración en el agua) o negativa (deposición). La erosión neta es la suma de las tasas de erosión por salpicadura como e_s y la tasa de erosión hidráulica e_h .

$$e = e_s + e_h \quad (1.28)$$

Erosión por Salpicadura. Basada en una limitada evidencia experimental, las tasas de erosión por salpicadura se pueden aproximar como una función del cuadrado de las tasas de precipitación -Meyer and Wischmeier, (Ref. Bibl. N° 35). KINEROS estima las tasas de este tipo de erosión como sigue:

$$\begin{aligned} e_s &= c_f k(h) r^2, & q > 0 \\ e_s &= 0, & q < 0 \end{aligned} \quad (1.29)$$

Donde c_f es una constante relacionada con el suelo y las propiedades de la superficie, y $k(h)$ es un factor de reducción que representa la reducción en la erosión producida por el incremento en el tirante del agua. La función $K(h)$ es 1.0 antes del inicio de la escorrentía y su mínimo es cero para un flujo muy profundo; $k(h)$ Está dada por la expresión empírica:

$$K(h) = \exp(-c_h h) \quad (1.30)$$

El parámetro c_h representa la efectividad de amortiguamiento del agua superficial, que no varía ampliamente. Tanto cf como $k(h)$ son siempre positivos, de modo que es siempre positivo cuando existe precipitación.

Erosión Hidráulica. Las tasas de erosión hidráulica eh representan la razón de intercambio de sedimentos entre el flujo de agua y el suelo sobre el cual fluye, y pueden ser tanto positivas como negativas. KINEROS asume que para toda condición de flujo superficial (velocidad, tirante, pendiente, etc) existe una concentración de equilibrio de sedimentos que puede ser obtenido si el flujo se mantiene estable. La tasa de erosión hidráulica (eh) es estimada al ser linealmente dependiente de la diferencia entre la concentración de equilibrio y la actual concentración de sedimentos. En otras palabras, la erosión/deposición hidráulica es modelada como un proceso de transferencia dinámico:

$$e_h = cg(c_m - c_s)A \quad (1.31)$$

donde C_{mx} es la concentración a la capacidad del transporte de equilibrio, $C_s=C_s(x,t)$ es la concentración local actual de sedimentos, y C_g es un coeficiente de tasa de transferencia [T^{-1}]. Claramente, la capacidad de transporte es importante en determinar la erosión hidráulica, así como la selección del coeficiente de tasa de transferencia. Cuando la deposición está ocurriendo, C_g es teóricamente igual a la velocidad de asentamiento dividido por el tirante hidráulico, h . Para las condiciones de erosión en suelos cohesivos, el valor de C_g debe ser reducido, y v_s/h es usado como un límite superior para C_g .

Capacidad de Transporte. Muchas relaciones para describir la capacidad de transporte fueron propuestas, pero la mayoría se desarrollaron y probaron para condiciones de flujos relativamente profundos, pendientes medias como ríos y canales. Trabajos experimentales por Govers (Ref. Bibl. N° 19) y otros investigadores haciendo uso de flujos poco profundos demostraron relaciones que son similares a la relación de capacidad de transporte de Engelund y Hansen (Ref. Bibl. N° 12):

$$C_m = \frac{0.5u^* u^3}{g^2 dh(\gamma_s - 1)_2} \quad (1.32)$$

Donde, u es la velocidad [L/T],
 u^* velocidad de corte, definida como \sqrt{ghS} ,
 d diámetro de la partícula [L],
 γ_s es la gravedad específica suspendida de las partículas $\gamma_s - 1$
 h tirante del flujo

Para aplicar esta relación con los resultados las investigaciones de Govers, se modificó la ecuación 1.33 para incluir la unidad de poder umbral de corriente Ω_c de 0.004m/s encontrado para aplicar a la capacidad de transporte de un flujo poco profundo. La unidad de poder usada aquí, Ω_c , es simplemente $u.S$. En términos de esta variable y el umbral, la ecuación 1.32, puede ser modificada a,

$$C_{mx} = \frac{0.05}{d(\gamma_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - \Omega_c) \quad (1.33)$$

Esta relación alcanzaría el inicio de transporte abruptamente después de $\Omega = 0.004$. Actualmente, KINEROS2 emplea una relación transicional como se muestra.

La velocidad de asentamiento de la partícula es calculada desde una densidad y tamaño de partícula determinada, asumiendo que las partículas tienen características de arrastre y velocidades de caída terminales similares a las de las esferas. Esta relación es:

$$V_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g(\rho_s - 1)d}{C_D} \quad (1.34)$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre de partícula.

El coeficiente de arrastre es función del número de Reynolds de la partícula,

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0.34 \quad (1.35)$$

donde R_n es el número de Reynolds de la partícula, definido como:

$$R_n = \frac{v_s d}{\nu} \quad (1.36)$$

Donde ν es la viscosidad cinemática del agua [L^2/T]. La velocidad de asentamiento de una partícula se halla resolviendo las ecuaciones 1.34, 1.35 y 1.36 para v_s .

Ensayando un Rango para el Tamaño de las Partículas. Las relaciones de series de erosión descritas líneas arriba son aplicadas para cada uno de los cinco tamaños de partícula para cada uno de los mas de cinco tipos de tamaño de partícula que son usadas para describir un suelo con un rango de tamaño de partículas. Nuestro conocimiento teórico y experimental de la dinámica de la erosión para una mezcla de tamaños de partículas es incompleto. No está claro, por ejemplo, exactamente que es lo que ocurre cuando la distribución del tamaño de las partículas contradice a la distribución de sus relativas capacidades de transporte.

1.5. Simulación de Lluvia

Los trabajos realizados y que tienen relación con el presente estudio son muy restringidos en nuestro país. Muchos de estos trabajos se han desarrollado en forma amplia en diferentes instituciones de investigación de los Estados Unidos, España, Holanda, Australia, Canadá, etc. Con toda la información acumulada se procederá a ejecutar el diseño y la respectiva construcción.

Se puede definir la lluvia simulada como la técnica de aplicación de agua a parcelas de una manera similar a la lluvia natural; esta es una herramienta que ha sido utilizada por muchos años en estudios de erosión, infiltración y escurrimiento. Los simuladores usados en el campo de la investigación guardan ciertas semejanzas comunes: suelen ser portátiles, tienen una fuente de suministro propia –por lo tanto el agua está a disposición cuando se necesite-, tienen parcelas definidas que son tratadas o mantenidas de acuerdo a los objetivos en estudio, tienen mecanismos esparcidos que varían con el grado de control que pueda ser ejercido sobre las tasas de aplicación y la cantidad de agua; también hay mecanismos y procedimientos para medir el rendimiento de las parcelas.

La simulación es una técnica muy valiosa para los estudios de la erosión. Esto ha sido reconocido por los investigadores entre los que podemos citar a Meyer (Ref. Bibl. N° 35) quien ha empleado los productores de lluvia artificial para acelerar la obtención de información. El valor de esta información depende de cuan cerca se simulan las características físicas de la lluvia natural.

En los EEUU, los trabajos de simulación comienzan a principios de la década de 1930 continuando a través de los años de 1940 y acelerando a mediados de la década de 1950 siguiendo esta serie de experiencias con desarrollo bastante modesto durante algunos años. Durante las últimas décadas ha habido un gran desarrollo evidenciado por el aumento del número de personas que están construyendo y usando simuladores con nuevos diseños o modificaciones y mejoramiento de diseños existentes.

De los primeros estudios se obtuvo poca información cuantitativa de la lluvia natural, especialmente el tamaño, la distribución de las gotas de lluvia y la velocidad de caída, no se conocían muy bien durante la construcción de los

primeros modelos, de tal modo que buena cantidad de productores de lluvia artificial no pudo producir tipos de tormentas similares a las de las lluvias naturales. En estos estudios no se tomó como objetivo principal las condiciones de pérdida de agua y suelo.

1.5.1. Características Importantes para la Simulación de Lluvia

Una serie de investigadores describieron algunas de las más importantes características usadas en las investigaciones –hidrológicas, de erosión, infiltración y escurrimiento- para conseguir una apropiada simulación de lluvias. Dichas características son presentadas a continuación:

1. Distribución del tamaño de las gotas cercana a la de las lluvias naturales – Bubenzer (Ref. Bibl. N° 6).
2. Velocidad de impacto de la gota cercana a la velocidad terminal de la lluvia natural -Laws (Ref. Bibl. N° 26).
3. Intensidad natural de la precipitación y distribución aleatoria de la dimensión de las gotas de lluvia -Laws and Parsons (Ref. Bibl. N° 27).
4. Aplicación de la lluvia uniforme sobre toda la parcela de ensayo.
5. Angulo de impacto aproximadamente vertical. Aunque no es obligatorio pues la lluvia no es necesariamente vertical.
6. Patrones de tormentas repetibles de duración e intensidad significativas - Meyer y Harmon (Ref. Bibl. N° 34).

Basados en el uso y estudio del simulador de precipitaciones determinadas metas y parámetros deben ser considerados. Por encima de todo, un simulador de precipitaciones debe ser exacto y debe satisfacer los seis criterios exigidos líneas arriba para la adecuada simulación de precipitación. Cualquier otro criterio es responsabilidad del usuario. Estos pueden incluir peso, comodidad de uso, confiabilidad, precisión y economía.

El simulador y la estructura de soporte deben ser lo más ligeros posible. En el caso que la mayor parte de los usos del simulador se den en el campo y sobre taludes inclinados, los investigadores deben poder instalar la estructura con facilidad. Las condiciones en el campo hacen necesarias la fuerza y ligereza del equipo.

Además de ligero, el simulador debe ser fácil de usar e instalar. El sistema de soporte tiene que ser debidamente consistente para resistir cualquier viento y movimiento del simulador. La comodidad de uso también incluye instrumentación y sistemas de control de clara y fácil lectura. La instrumentación apropiada debe ser usada para controlar el flujo de agua de las boquillas. Estas deben ser situadas en tal posición que permita una medición precisa y la regulación del flujo de agua de las boquillas. Se prefiere el uso de los medidores de agua para el simulador de lluvias debido a las diferencias de la elevación entre los puntos y la difícil correlación de la tasa de flujo y la presión. La caja de control debe ser construida para soportar las cargas electrónicas situadas encima con un factor de seguridad para prevenir la fundición. Sería muy deseable el uso del programa LabVIEW de National Instruments -herramienta gráfica de test, control y diseño- o similar, dirigido por computador.

La certidumbre se basa en la fortaleza e idoneidad de la instrumentación del simulador. La certeza se relaciona con lo repetible de las tormentas. Una tormenta dirigida por computadora es la más confiable pues elimina el error humano inherente a las intensidades variables. La certidumbre también se incrementará mediante un adecuado monitoreo con la instrumentación correcta.

La precisión es conseguida mediante la creación de una lluvia uniforme a través de la parcela de prueba. Cuando se opta y se instala por una buena distribución de boquillas con el correcto tamaño de las gotas, en series con el adecuado espacio para permitir el traslape correcto, la uniformidad lateral es alcanzada. Cuando este brazo aspersor lateralmente uniforme es barrido hacia atrás y adelante a través del área, el regado será uniforme. El adecuado diseño y prueba de las cajas empleados para interrumpir el rociado es muy importante para crear lluvia uniforme.

Sin duda alguna, la característica más esperada de un simulador es el costo: debe ser el menor posible. El objetivo es diseñar y construir un simulador de precipitaciones que cueste menos de diez mil dólares -tomando como referencia los Estados Unidos. En nuestro país los costos deben ser mucho menores.

1.5.2. Parámetros Básicos

Los parámetros de la simulación de lluvias tales como la distribución de las dimensiones de la gota de lluvia, la velocidad de impacto y los patrones de

tormentas repetibles deben ser satisfechas para simular la energía cinética de las precipitaciones naturales.

$$K_E = m \cdot V^2 / 2 \quad (1.37)$$

La energía cinética es una medida simple de la pluviosidad empleada para correlacionar las tormentas naturales y las simuladas.

Distribución del Tamaño de las Gotas

Un tamaño adecuado de gota es esencial para la simulación de precipitaciones. Meyer (Ref. Bibl. N° 33), reportó que la lluvia natural consiste de una extensa variedad de tamaños de gotas, las cuales pueden registrar diámetros cercanos a cero hasta casi los 7.0 mm. El tamaño de las gotas de lluvia se incrementa con la intensidad de la lluvia hasta un determinada punto. Luego tiende a permanecer constante. Bubenzer (Ref. Bibl. N° 6), señala que el tamaño medio de las gotas y la distribución por tamaño de las gotas de lluvia natural son dependientes de la intensidad de la lluvia. Algunos investigadores han usado una ecuación exponencial para expresar esta relación. Muchos de los diferentes informes pueden ser atribuidos a extensas variaciones fortuitas dentro y entre tormentas, los factores geográficos que influyen el tipo de tormenta y una carencia de datos a los niveles de altas intensidades. A pesar de esa variación, los resultados indican que hay un rápido incremento en el diámetro medio de la gota con intensidades para tasas de lluvia

Velocidad de las Gotas

Meyer (Ref. Bibl. N° 33), afirma que la velocidad de caída de las gotas de lluvia varía desde cero para gotas pequeñas de llovizna, a más de 9 m/s. Un tamaño común de gota de 2.0 mm cae a velocidades de 6.0 y 7.0 m/s.

1.5.3. Tipos de Simulador de Lluvias

Los simuladores pueden ser separados en dos grandes grupos: simuladores formadores de gotas y simuladores de boquillas presurizadas.

Simuladores Formadores de Gotas

Los simuladores formadores de gotas emplean pequeñas piezas de hilado, tubos capilares, agujas hipodérmicas o tubos metálicos para formar gotas –Bubezzer (Ref. Bibl. N° 6). Los simuladores formadores de gotas son imprácticos y muy difícil de usar en el campo debido a que requieren de una enorme distancia (10 metros) para alcanzar la velocidad terminal. Estos simuladores no producen una adecuada distribución de gotas a menos que se usen varios tipos de tubos formadores de gotas. Otra desventaja de este tipo de simuladores es su aplicación limitada a pequeñas parcelas de prueba -Bubenzer (Ref. Bibl. N° 6). Diversos puntos de producción de gotas de lluvia deben ser empaquetados muy juntos para crear un aguacero lo suficientemente intenso.

Simuladores de Boquillas Presurizadas (Simulador Norton)

Los simuladores de boquillas presurizadas son adecuados para diversos usos. Pueden ser empleados en el campo y sus intensidades pueden variar en mayor medida que los simuladores formadores de gotas -Grierson y Oades (Ref. Bibl. N° 21). Desde que las gotas existentes en las boquillas tienen una velocidad inicial mayor que cero -debido a que la presión las expulsa- se requiere una menor distancia de caída para alcanzar la velocidad terminal. Las intensidades de las boquillas varían con el diámetro del orificio, la presión hidráulica sobre la boquilla, el espaciamiento entre las boquillas y el movimiento de las mismas – Meyer (Ref. Bibl. N° 33).

Los simuladores de boquillas presurizadas pueden producir tormentas de intensidades variables. Un continuo rocío desde una boquilla genera una tormenta innaturalmente intensa. Por eso son necesarias ciertas técnicas de inicio y finalización de tormentas. Las soluciones fueron un disco giratorio, un brazo aspersor rotatorio, un simulador solenoide controlado –Miller (Ref. Bibl. N° 36)- y un elaborado sistema de regaderas. El sistema más simple de usar es un brazo aspersor rotatorio u oscilante.

La boquilla más popular es la Veejet 80100, empleada a 41 kPa (6psi). Esta boquilla es la mas usada porque es la que más cercanamente recuerda la distribución de las gotas de lluvia de los modelos de lluvia erosiva en el Medio

Oeste –Bubbenzer (Ref. Bibl. N° 6)-; sin embargo para este trabajo se optará por las boquillas Floodjet. Siempre se debe realizar un adecuado análisis para certificar un adecuado alcance y uniformidad en la parcela.

El Simulador Norton

El Simulador de Precipitaciones Norton Tipo Escalera es un brazo aspersor que oscila a través una parcela de prueba a velocidades variables y que produce tormentas de intensidades variables. Scout McAfee y Darrel Norton diseñaron el Simulador de Precipitaciones Norton Tipo Escalera para el uso del Laboratorio de Investigación de Erosión de Suelos en la Purdue University. Las cajas alrededor de cada uno de las boquillas regulan el rocío para el adecuado traslape y anchura de corte. Una palanca de freno abre y cierra el brazo aspersor regulado por una señal de la caja de control. Un pequeño motor de engranajes impulsa la palanca del freno y el brazo aspersor. Las cuatro boquillas son alimentadas con agua en series de dos; cada serie de boquillas tiene su propia manguera y calibrador de presión para ajustar las diferencias en elevación, orientación de la manguera, etc.

El simulador de precipitaciones emplea el sistema de rociado con boquillas Veejet 80100. Normalmente, los usos de esta boquilla especificados por el fabricante incluyen control de polvo, lavado industrial y control de fuego. Sus usos son aplicaciones de agua a alta presión, alta velocidad y de alto volumen de agua, todas ellas cosas que lluvia natural no posee. El rango de presión de la boquilla es bastante amplio, desde 34 a 3400 kPa (5 a 500 psi), rindiendo tasas de 13.2 a 132 litros por minuto (3.5 a 35 gpm). Una presión de 41 kPa (6 psi) produce un tamaño de gota y una intensidad similar a los de la lluvia natural – Bubbenzer (Ref. Bibl. N° 6).

La mayoría de las boquillas tienden a producir regados irregulares cuando se las usa al límite de sus capacidades debido a las diferencias mecánicas. Así, cualquier diferencia entre las boquillas es amplificada por un pequeño psi empleado, que tiende a reducir la uniformidad. Una nueva boquilla se hace necesaria, una con un rango de operación más estrecho, pero intensidad y tamaño de gota similares.

1.5.4. Simulador de Lluvias del Departamento de Transportes del Estado California (Caltrans)

Blanquies (Ref. Bibl. N° 4) nos describe los detalles del diseño y construcción de un simulador de lluvias confiable, preciso y portátil que fue propuesto con fines de investigación orientada a la vegetación y el control de erosión en la California Polytechnic State University, San Luis Obispo, para el Departamento de Transportes del Estado California (Caltrans) y la California State University en Sacramento. Este simulador fue diseñado para ser instalado y mantenido fácilmente, así como para ser capaz de crear una amplia variedad de regímenes de lluvia. Las pruebas de desempeño de la boquilla y del espaciado lateral fueron efectuadas en el Laboratorio de Investigación de Control de Erosión del Cal Poly. El simulador fue diseñado y construido basado en los principios del Simulador de Precipitaciones Norton Tipo Escalera. Este simulador es el estándar para las investigaciones relacionadas con la simulación de lluvias. La construcción tuvo lugar en la granja de estudio de Cal Ploy. Este modelo es del tipo de boquilla presurizada con un brazo aspersor oscilatorio operado con cámara. Esta boquilla emite una lluvia uniforme sobre una parcela de 1 m de ancho por 3.56 m de largo. Las boquillas Floodjet 3/8K SS45 a 47.6 KPa (7 PSI) emiten una gota promedio de 1.7mm (0.07") en un rango de dimensiones de menos de 1mm hasta 7 mm (0.04" hasta 0.3"), relacionándose correctamente con tormentas de menos de 50 mm/h (2 pulg/h), que son comunes en la costa central de California. La estructura del simulador fue construída de aluminio, sosteniendo el brazo aspersor de cuatro boquillas. Las boquillas están espaciadas en 99 cm (39 pulgadas). Una caja con una abertura de 15 cm por 11 cm yace bajo cada boquilla para crear el ángulo adecuado de rocío, aspecto crítico para la uniformidad lateral del rociado. Una abertura adicional en la caja es añadida a un sistema que retorna el agua no utilizada hacia el tanque de abastecimiento. Los medidores del flujo controlan el aporte de agua del tanque de abastecimiento, asegurando que cada una de las boquillas tenga la misma tasa de descarga, sin importar la orientación del simulador. Un motor controlado por computadora y sistema de cámaras controla la intensidad de la tormenta. El número de oscilaciones por minuto de la boquilla a través de la apertura de la caja determina la intensidad. Las tormentas de diseño se asemejan a una curva de campana, típico de las tormentas de California. El sistema de apoyo es

desmontable, fácil de instalar y mantener. El simulador resultante es económico (menos de US \$ 7000 para construir), hecho de piezas comercialmente disponibles, de sencillo montaje y mantenimiento y de alta precisión.

Lluvia Simulada

El propósito primario de un simulador de lluvia es representar una precipitación natural con precisión. Las lluvias son complejas, con diversas interacciones entre sus propiedades (tamaño y velocidad de la gota, etc) y una amplia variación climática basada en la topografía e influencias marinas. La apropiada simulación de lluvias requiere de los criterios descritos en el sub capítulo 1.3.

La distribución de las dimensiones de la gota de lluvia, la velocidad de impacto y los patrones de tormentas repetibles deben ser satisfechas para simular la energía cinética de las precipitaciones naturales.

$$K_E = m \cdot V^2 / 2 \quad (1.38)$$

La energía cinética es una medida simple de la pluviosidad empleada para correlacionar las tormentas naturales y las simuladas.

La distribución del tamaño de las gotas depende de muchas de las características de la tormenta, especialmente la intensidad de la precipitación. La mayoría de los diseños estándar fueron basados en los estudios de Law y Parsons (Ref. Bibl. N° 27).

Desgraciadamente, la mayor parte de los estudios fueron realizados en Illinois, Washington DC, Washington, o localidades en el sur, lejos de California. Las montañas y los océanos intervienen en la variación de las características de la precipitación –McCool (Ref. Bibl. N° 32). California tiene tanto influencias topográficas como marinas. Ningún estudio en las características de la precipitación fue completado en el estado de California. Los parámetros pueden ser aproximados haciendo uso de los estudios de otras regiones, pero una simulación precisa de la precipitación californiana resulta difícil sin adecuados estudios de investigación de las condiciones en esta región.

La velocidad de la gota de lluvia es importante para diseñar un simulador de lluvias. Las gotas de las precipitaciones naturales se encuentran a mayor

velocidad terminal cuando impactan la superficie del terreno. Por lo tanto, un simulador de lluvias debe crear gotas de adecuado tamaño y velocidad para simular la misma condición, indicando la importancia entre una acertada altura de caída y una distribución del tamaño de las gotas. Existe una relación directa entre el diámetro de la gota y la altura de caída -Laws (Ref. Bibl. N° 26).

Un patrón de tormentas repetibles es posible de representar cuando un simulador puede ser ajustado a las intensidades y duraciones deseadas. El equipo del Estudio de Establecimiento y Conservación Vegetal (VEMS por sus siglas en inglés) controla sus simuladores creando patrones de tormentas con forma de campana, simulando la variación de intensidad inherente a la naturaleza.

Características más Importantes de los Simuladores

Basados en el uso y estudio del simulador de precipitaciones tipo escalera utilizados por el Estudio de Establecimiento y Manejo de Vegetación, determinadas metas y parámetros fueron considerados. Por encima de todo, un simulador de precipitaciones debe ser exacto y debe satisfacer los seis criterios exigidos líneas arriba para la adecuada simulación de precipitación. Cualquier otro criterio es responsabilidad del usuario. Estos pueden incluir peso, comodidad de uso, confiabilidad, precisión y economía.

El simulador y la estructura de soporte deben ser lo más ligeros posible. Debido a que la mayor parte de los usos del simulador son en el campo y sobre taludes inclinados, los investigadores deben poder instalar la estructura con facilidad. Las condiciones en el campo hacen necesarias la fuerza y ligereza del equipo. Además de ligero, el simulador debe ser fácil de usar e instalar. El sistema de soporte tiene que ser debidamente consistente para resistir cualquier viento y movimiento del simulador. La comodidad de uso también incluye instrumentación y sistemas de control de clara y fácil lectura. La instrumentación apropiada debe ser usada para controlar el flujo de agua de las boquillas. Estas deben ser situadas en tal posición que permita una medición precisa y permita la regulación del flujo de agua de las boquillas. Se prefiere el uso de los medidores de agua (flow gauge) para el simulador de lluvias debido a las diferencias de la elevación entre los puntos y la difícil correlación de la tasa de flujo y la presión. La caja de control debe ser construida para soportar las cargas electrónicas situadas

encima con un factor de seguridad para prevenir la fundición. Sería muy deseable el uso de un LabVIEW -herramienta gráfica de test, control y diseño- dirigido por computador.

La certidumbre se basa en la fortaleza e idoneidad de la instrumentación del simulador. La certeza se relaciona con lo repetible de las tormentas. Una tormenta dirigida por computadora es la más confiable pues elimina el error humano inherente a las intensidades variables. La certidumbre también se incrementará mediante un adecuado monitoreo con la instrumentación correcta.

La precisión es conseguida mediante la creación de una lluvia uniforme a través de la parcela de prueba. Cuando se opta y se instala por una buena distribución de boquillas con el correcto tamaño de las gotas, en series con el adecuado espacio para permitir el traslape correcto, la uniformidad lateral es alcanzada. Cuando este brazo aspersor lateralmente uniforme es barrido hacia atrás y adelante a través del área, el regado será uniforme. El adecuado diseño y prueba de las cajas empleados para interrumpir el rociado es muy importante para crear lluvia uniforme.

Sin duda alguna, la característica más esperada de un simulador es el costo: debe ser el menor posible. El objetivo es diseñar y construir un simulador de precipitaciones que cueste menos de diez mil dólares.

Ensayo

Diferentes boquillas necesitan diferentes espaciamientos laterales, para conseguir la uniformidad en el traslape. Este traslape es necesario para alcanzar la uniformidad.

Elección de la boquilla

La boquilla ensayada para el uso en este simulador fue la Floodjet SS3/8k-45 con un diámetro de orificio igual a 5.51mm (0.221 pulg). Estas boquillas de uso agrícola se asemejan a las tasas de flujo del Veejet 80100 (12.1 L/min a 34kPa para el Floodjet, comparado con el 13.2 L/min a 34kPa para el Veejet). El rango óptimo del Floodjet es mucho más estrecho que para el Veejet: desde 20.5 a 410 Kpa (3 a 60 psi). La distribución del tamaño de las gotas de las boquillas Floodjet

se encuentra especificada para asemejar a la precipitación natural en el catálogo del producto.

La piedra angular para las pruebas del tamaño de gota y la longitud del brazo aspersor es la boquilla. Las boquillas Floodjet SS3/8k-45 son largamente superiores a las Veejet para la simulación de precipitaciones. Las boquillas Veejet son usadas para rociado industrial, limpieza de tanques y otras aplicaciones de alta presión, mientras que las Floodjet son empleadas para prácticas de rociado agrícolas. Las Veejet que son empleadas en la simulación de lluvias tiene un rango de presión mucho mayor que la boquilla Floodjet, así, si hubiera un ligero cambio de presión en el brazo aspersor, la cantidad de agua aplicada variaría significativamente menos con la Floodjet que con la Veejet.

Prueba de tamaño de gota

Un tamaño adecuado de gota es esencial para la simulación de precipitaciones. La distribución de este parámetro fue ensayada empleando el método del aceite de Eigel y Moore (Ref. Bibl. N° 11). Este método consiste en la mezcla de 1 parte de aceite de tratamiento SPT y 1 parte de aceite mineral de sello. Las gotas varían desde 0.5 a 0.7mm (0.02 a 0.28in) que son atrapadas en un plato Petri de aceite y contenidas ahí por un tiempo suficiente para contarlas y medirlas. Este método es mucho más simple y fácil de ejecutar que otros, los cuales incluyen el uso de polvo mineral fino y fotografías secuenciales.

Conclusiones y Diseño Final

El diseño final del simulador de lluvias es similar al simulador original con algunos cambios determinantes. La estructura que sustenta al brazo aspersor y los componentes mecanizados de la caja de control son hechos de aluminio. Las boquillas fueron cambiadas a las Floodjet SS3/8k-45, el espaciamiento lateral de las boquillas fue cambiado a 99 cm. Las dimensiones de la caja también cambiaron a una abertura más grande y corta para regular el rociado.

CAPÍTULO 2

PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS Y EXPOSICION DE LA HIPOTESIS

La erosión que ocurre en un suelo por el paso del agua es un fenómeno que no puede ser descrito en forma analítica. Esta afirmación es válida para suelos sin ningún tipo de cobertura como para aquellos que tienen cobertura vegetal. Aún el uso de software especializado en modelar este comportamiento resulta insuficiente pues la interacción de cada uno de los componentes que constituye al fenómeno es extremadamente compleja. Se hace necesaria la experimentación en campo con modelos físicos que reproduzcan en forma empírica eventos hidrológicos y sus efectos erosivos.

Esta etapa de la investigación implica determinar la capacidad de la técnica de bioingeniería seleccionada, en este caso pasto Bermuda, para proteger al terreno de la erosión que pudiera generarse:

- Caracterización del talud a proteger.
- Intensidad y duración de la lluvia simulada.
- Propiedades del estrato de suelo.
- Características del sedimento colectado.
- Mantenimiento del pasto.

Para esta finalidad se hará uso del modelo físico de simulación de lluvias que fue construido en el Laboratorio Nacional de Hidráulica, el cual es parte de este trabajo de investigación y está descrito en el Capítulo 3.

Tomando en consideración lo planteado por Gray y Sotir (Ref. Bibl. N° 20), se puede decir que la erosión depende de los siguientes factores:

- Clima. Intensidad de las tormentas y su duración
- Suelo. Erosionabilidad inherente
- Topografía. Longitud e inclinación del talud
- Vegetación. Tipo y extensión de la cobertura

Entonces podemos afirmar que la Erosión por salpicadura (e), depende de las siguientes variables ponderables: Caudal de ingreso al sistema (Q), intensidad

del evento hidrológico (i), tiempo de exposición a la lluvia (t), pendiente del talud (S), densidad de la vegetación por unidad de área (M), altura de vegetación (h_v), porcentaje de materia orgánica (%org), diámetro representativo (D_s) y porcentaje de humedad (%h); así como el tipo de vegetación (veg), el cual es una variable no ponderable.

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

$$e = f(Q, i, t, S, M, h_v, \%org, D_s, \%h, veg) \quad (2.1)$$

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

$$e = f(S, t, \%h, M) \quad (2.2)$$

Esto significa que las pruebas se ejecutarán realizando variaciones en los parámetros descritos en la ecuación 2.2, tomando lo siguiente como hipótesis.

Hipótesis

En todas las pruebas, se toman los siguientes parámetros como constantes:

- Suelo. El parámetro involucrado es el diámetro representativo del suelo D_s .
- Especie de pasto y su altura. La altura no es necesariamente constante, pero debido a su uniformidad se considerará como tal.
- Caudal de ingreso.
- Intensidad de la lluvia. Correspondiente a una considerada intensa en extremo. Debido a las características del modelo se empleó solamente una intensidad constante cercana a lo máximo esperable en algunas regiones del Perú.
- Tipo de vegetación.
- Porcentaje de materia orgánica %org.

2.1. Parámetros considerados en los ensayos.

Los parámetros considerados en los ensayos (variables o no) son descritos a continuación:

□ **Pendiente:**

La pendiente es variable. El modelo tiene la capacidad de adoptar pendientes que van desde el 0% hasta el 35%. Esta versatilidad es extremadamente útil en la tarea de representar los taludes de diferentes estructuras hidráulicas en situaciones diversas. Para las pruebas el modelo adoptará pendientes de 5, 10 y 20%.

□ **Vegetación:**

Se empleará el grass Bermuda (*Cynodon dactylon*) variedad Mirage. Esta especie oriunda del norte de África y el sur de Europa es cultivada exitosamente bajo las siguientes condiciones:

- En climas cálidos y templados en todo el mundo entre 30° de latitud sur y 30° de latitud norte.
- Entre 500 y 2.800 mm de lluvias anuales (o mucho menos, si hay riego disponible).
- Desde el nivel del mar hasta los 2.200 msnm.
- Por encima de los 15°C, alcanzado su desarrollo óptimo entre los 24° y 37° C.

Por su fina textura, atractiva y uniforme, se usa en campos deportivos, jardines y obras de ingeniería como recubrimientos de relaves. En climas moderados se puede sembrar en cualquier temporada del año pero de preferencia en los meses cálidos pues las temperaturas inferiores a los 10° C pueden detener su crecimiento (latencia invernal). La altura ideal del tallo es de 3 a 3.5 cm. Pero puede llegar a los 10 cm. de altura y se desarrolla a partir de semillas, estolones y rizomas.

Por la rapidez de su crecimiento y su excelente resistencia al tránsito, las sequías y condiciones difíciles, se le suele denominar "pasto del diablo."

□ **Área de cobertura vegetal**

Se realizarán experimentos comparativos entre dos condiciones de suelo: sin protección y protegido por una especie de vegetación. Para ello se dividirá la parcela en dos mitades y en una de ellas se sembrará la especie de césped seleccionada, dejando la otra mitad desprotegida. La finalidad de recurrir a la siembra de la especie y no a otra técnica de implantación, tal como el uso de cespedones, obedece al deseo de no alterar la clasificación del suelo a estudiar, evitar fallas de talud por corte y verificar el desarrollo del pasto en dicho suelo desde su nacimiento.

La densidad de la vegetación (# de tallos / m²) está representada por el parámetro "M".

□ **Caudal de ingreso**

Se obtiene de las lecturas ofrecidas por el medidor volumétrico durante los ensayos entre el tiempo de duración de los mismos. La división da como resultado el caudal (Q).

□ **Intensidad**

Se ejecutarán pruebas con una intensidad constante de 85 mm/h. Este valor se escogió por ser el más alto de los valores obtenidos en el proceso de toma de datos del pluviógrafo y por lo tanto es el más crítico. Sin duda existe una íntima relación entre el caudal (Q) y la intensidad (i), pues esta depende de aquel. Esta relación debe ser comprobada más adelante.

□ **Tiempo**

Se producirán lluvias simuladas de 15 y 30 minutos. Tiempos que corresponderían a eventos hidrológicos severos, teniendo en cuenta que se trata de una intensidad de precipitación tan alta como la descrita en el párrafo anterior.

□ **Altura de vegetación**

Para los ensayos a realizar se considerará una altura promedio de 5 cm., la cual corresponde al desarrollo alcanzado por el césped Bermuda en un periodo de un mes desde su siembra en temporada fría, riego constante y a nivel del mar.

□ Tipo de suelo

El estrato de suelo empleado en los experimentos se obtuvo del Laboratorio Nacional de Hidráulica. Se recurrió a este suelo por encontrarse disponible tras las pruebas realizadas por un grupo del curso de titulación ofrecido por la Facultad de Ingeniería Civil, y por aparentar ser lo bastante apto para las pruebas proyectadas por este trabajo: presencia de arcillas y limos que aseguran la retención de la humedad y *mixtura de arena y finos* que, según Gray y Sotir, aseguran alta erosionabilidad (Capítulo 1). Ambas características son deseables pues esta resulta la más crítica (mayores índices de erosión) y por lo tanto la más deseable, mientras que aquella favorece el desarrollo de la especie vegetal.

2.2. Datos Obtenidos en Campo

De acuerdo a la teoría, deberíamos tener valores ya calculados para estos parámetros, pero sabemos que en la práctica no siempre se llega a los mismos valores por lo que se hace necesario obtenerlos en las pruebas y cotejarlos con sus correspondientes teóricos.

- Caudal de ingreso (Q). El cual es constante.
- Escorrentía Efectiva (Q_e). Es el caudal que discurre por el talud y consiste en la diferencia entre el caudal de entrada y la infiltración.
- Intensidad (i).
- Altura representativa del pasto (h).
- Número de tallos por unidad de área (M).
- Tasa de erosión (e). Los sedimentos en suspensión serán colectados y analizados.

2.3. Procedimiento de los Ensayos a Ejecutarse

Los ensayos se dividen en dos grupos: los preliminares y los definitivos. Los ensayos preliminares sirven para verificar las características más importantes de la simulación de la lluvia tales como su intensidad y uniformidad. Estos ensayos no deben alterar el estado del terreno que ha sido establecido en el modelo. Los ensayos definitivos se enfocan al comportamiento de dicho terreno (sin protección en una mitad y protegido en la otra) ante la acción de las lluvias, es decir el objetivo de este trabajo de investigación.

2.3.1. Verificación de las Características Importantes para la Simulación de Lluvia

En el Capítulo 1 se describieron algunas de las más importantes características usadas en las investigaciones de esta naturaleza para conseguir una apropiada simulación de lluvias. Dichas características son las siguientes:

1. Distribución del tamaño de las gotas cercana a la de las lluvias naturales.
2. Velocidad de impacto de la gota cercana a la velocidad terminal de la lluvia natural.
3. Intensidad natural de la precipitación.
4. Aplicación de la lluvia uniforme sobre toda la parcela de ensayo.
5. Angulo de impacto con respecto a la vertical. Aunque no es obligatorio pues la lluvia no es necesariamente vertical.

Algunas de las condiciones están predeterminadas por el comportamiento de la boquilla ante ciertas condiciones de trabajo. En este punto el fabricante de las boquillas asegura dicha conducta. A continuación se describirá los procedimientos a seguir en la comprobación de cada una de las características requeridas arriba mencionadas.

1. Distribución del tamaño de las gotas cercana a la de las lluvias naturales.

Contamos como sustento la información ofrecida por el productor de las boquillas, en la cual se tabula el tamaño de las gotas generadas respecto al tipo de boquilla a una presión de uso determinada (ver Anexo B).

2. Velocidad de impacto de la gota cercana a la velocidad terminal de la lluvia natural.

A diferencia de los simuladores formadores de gotas, los simuladores de boquillas presurizadas proporcionan a las gotas de agua velocidades muy cercanas a la velocidad terminal de las lluvias naturales si se trabaja a la presión adecuada. En este caso, se tomará como referencia la experiencia de los

simuladores Norton y del Departamento de Transportes del Estado de California, los cuales hicieron uso de boquillas presurizadas semejantes a las se utilizarán en este trabajo y a presiones muy cercanas (aproximadamente 0.5 bar de presión). Es estos casos se suele recurrir a las verificaciones mediante imágenes secuenciales, pero estas suelen requerir mucho más tiempo y recursos.

3. Intensidad natural de la precipitación

El conocimiento de la intensidad de la precipitación constituye un factor fundamental en el desarrollo de este estudio. En principio se cuenta con la relación presión – caudal que ofrece el fabricante de la boquilla usada en el modelo de simulación de lluvias. El comportamiento de la boquilla es función de las condiciones de presión y caudal ejercidas por la bomba empleada. Este caudal se pulveriza en la boquilla y se distribuye sobre la parcela de estudio convirtiéndose en lluvia artificial cuya intensidad se desea conocer.

En segundo lugar se cuenta con la lectura del caudalímetro, aparato que mide directamente el caudal que transcurre por la tubería de $\frac{3}{4}$ " aproximándonos a la realidad. La totalidad de este caudal se dirige al final del sistema (la boquilla) para luego caer en forma de lluvia sobre la parcela de prueba, por lo que su medición resulta sumamente útil. Finalmente contamos con la medida obtenida directamente a la salida de boquilla haciendo uso de una probeta graduada, o algún sustituto. Este dispositivo recolecta el agua durante un lapso de tiempo obteniendo un volumen de agua ponderable. Esta medición debería ser la más real pues en ella no interviene más que la lectura directa del volumen obtenido. Teóricamente las mediciones deben ser iguales, pero sabemos que es necesario cotejarlas y tener la mayor redundancia posible en ellas.

4. Aplicación de la lluvia uniforme sobre toda la parcela de ensayo.

Debido a la inclinación variable de la parcela de pruebas y la forma paraboloide de la lluvia simulada, será necesario verificar su uniformidad en diferentes puntos del área de ensayo. Sin duda es sumamente deseable que las intensidades sean iguales para todos los puntos de la parcela de pruebas, pero es probable que los registros de precipitación en la zona más cercana a la emisión de la lluvia sean mayores, por lo que es necesario verificar este hecho y hacer los ajustes que

sean necesarios. Para este fin se colocó un pluviómetro en diversos puntos de la parcela que registrará las intensidades de la lluvia generada.

5. Angulo de impacto con respecto a la vertical.

Aunque no es obligatorio pues la lluvia no es necesariamente vertical. Se sabe que el ángulo de impacto varía con la intensidad y la dirección del viento que acompaña al evento hidrológico y esta variante no forma parte de la investigación pero podría estar presente durante las pruebas.

La forma más sencilla de verificar este punto es mediante la observación durante los ensayos. En este caso se espera que el ángulo de impacto sea razonablemente uniforme y cercano a la vertical.

2.3.2. Ensayos Definitivos.

Los ensayos definitivos tienen como finalidad observar y describir el comportamiento del estrato de suelo seleccionado ante la lluvia simulada por el modelo. Estos ensayos fueron divididos en dos fases y cada una de las fases ocupa una de las mitades del modelo y se describen a continuación:

- Fase I. Se hizo uso de un suelo arcilloso arenoso SM (ver Anexo E) y no se utilizó ningún tipo de protección.
- Fase II. Se empleó el mismo suelo arcilloso arenoso y se aplicó sobre el mismo pasto Bermuda Mirage.

Matriz de prueba.

Para el desarrollo de las pruebas se han asumido como variables la pendiente del terreno, el tiempo de exposición al evento hidrológico simulado y el tipo de cobertura. Para estos ensayos la intensidad de la lluvia simulada será constante. La matriz de pruebas se ha dividido en dos fases, correspondiendo cada una a un tipo de cobertura. En cada una de las pruebas se irá variando el tiempo de exposición y la pendiente de la parcela de pruebas.

En la tabla 2.1 se describen las dos fases de los ensayos a ejecutarse:

Tabla 2.1. Fases 1 y 2 de los ensayos.

FASE	PRUEBA	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Tiempo de Lluvia (minutos)	Cobertura
I	I-1	85	5	15	Ninguna
	I-2	85	5	30	
	I-3	85	10	15	Ninguna
	I-4	85	10	30	
	I-5	85	20	15	Ninguna
	I-6	85	20	30	
II	II-1	85	5	15	Pasto Bermuda
	II-2	85	5	30	
	II-3	85	10	15	Pasto Bermuda
	II-4	85	10	30	
	II-5	85	20	15	Pasto Bermuda
	II-6	85	20	30	

Al finalizar los componentes de cada una de las fases se procederá a coleccionar el agua de escorrentía generada. Este volumen de agua, se entiende, ha de ser turbia, por lo que esa turbidez debe ser sedimentada y reunida para ser posteriormente medida, pesada y clasificada.

La medida de estos sedimentos debe reflejar las variables que se han introducido en el experimento, tales como la inclinación del talud o el tiempo de exposición a la lluvia artificial. Se entiende que a mayor pendiente las tasas de erosión deben ser superiores. Asimismo el terreno desprotegido debe arrojar mayor cantidad de sedimentos que aquel recubierto por el pasto Bermuda. Si los resultados obtenidos no se ajustaran a estas suposiciones, se ha de buscar la explicación correspondiente.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ANÁLISIS

En este capítulo se describe el área en la que se realizaron las pruebas de control de erosión, la caracterización del cada uno de los factores que intervienen en las pruebas -tales como la instalación de la cobertura vegetal, las características del terreno de las pruebas entre otros- y los elementos constituyentes del simulador que fueron construidos para hacer posible las pruebas -la estructura de acero, el sistema de bombeo y colección y la parcela de pruebas- que fueron realizadas desde el lunes 3 de diciembre de 2007 hasta el sábado 2 de febrero de 2008.

3.1. Descripción del Área de Trabajo

3.1.1. Laboratorio Nacional de Hidráulica

El Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) es una institución creada en 1960 gracias al convenio celebrado entre la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y la Dirección de Aguas e Irrigaciones del Ministerio de Fomento y Obras Públicas de aquellos años, según informa la página web del LNH. Actualmente es un Órgano Autónomo de la Universidad Nacional de Ingeniería que ocupa un área de 17000 m², de los cuales 12000 m² se emplean para pruebas en modelos hidráulicos.

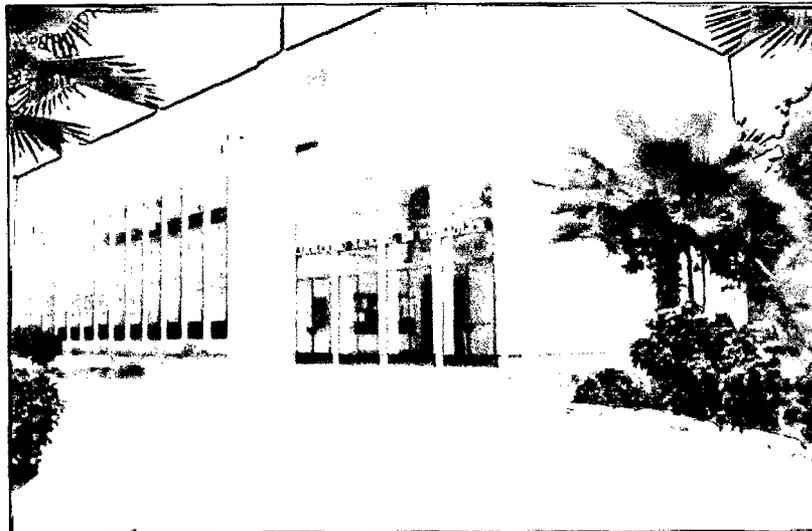


Foto 3.1. Fachada del Laboratorio Nacional de Hidráulica. Fuente: página web del Laboratorio Nacional de Hidráulica.

Las instalaciones del LNH son ocupadas en gran medida por modelos físicos de reproducción de proyectos hidráulicos a escala -los cuales permiten predecir el posible comportamiento de dichas estructuras después de su ejecución- y normalmente son objeto de observación y aprendizaje para los alumnos de la Universidad Nacional de Ingeniería.

El LNH facilitó al autor de esta tesis el área necesaria para la construcción del modelo, la cual se encuentra adyacente a la denominada División Didáctica y al tanque elevado, tal como se observa en la foto 3.2., que muestra una toma del área cedida previa a la construcción del modelo.



Foto 3.2. Interior del Laboratorio Nacional de Hidráulica. Esta área fue la elegida para construir el modelo.

El área mostrada es de cerca de 100 m² pero sólo se hizo uso de 18 m² aproximadamente. Fue escogida por su cercanía a la cisterna -que habría de alimentar con agua al modelo-, al canal de salida y a la cisterna.

3.1.2. Elementos constituyentes del Modelo de Simulación de Lluvias

El modelo fue construido sobre un área aproximada de 18 m² y consta de diversos elementos constituyentes, los cuales podemos clasificar de la siguiente forma:

- Soporte Estructural
 - Sub-estructura
 - Súper-estructura

- Sistema de Elevación
- Sistema de Bombeo y Colección
 - Bomba de Succión
 - Tubería
 - Boquilla aspersora
 - Sistema de colección de sedimentos
- Parcela de Pruebas

A continuación se describen los elementos enumerados líneas arriba.

□ Soporte Estructural

Los detalles de la construcción y el diseño de los principales elementos constituyentes del sistema están contemplados en el Anexo C. El diseño estructural de estos miembros ha sido ejecutado por el autor de esta tesis respetando las pautas establecidas por el American Institute of Steel Construction y de la NTE 090 de estructuras metálicas. Todos los elementos fueron construidos en acero A 36 con resistencia $f_y=2530 \text{ Kg/cm}^2$ producido por la empresa Aceros Arequipa.

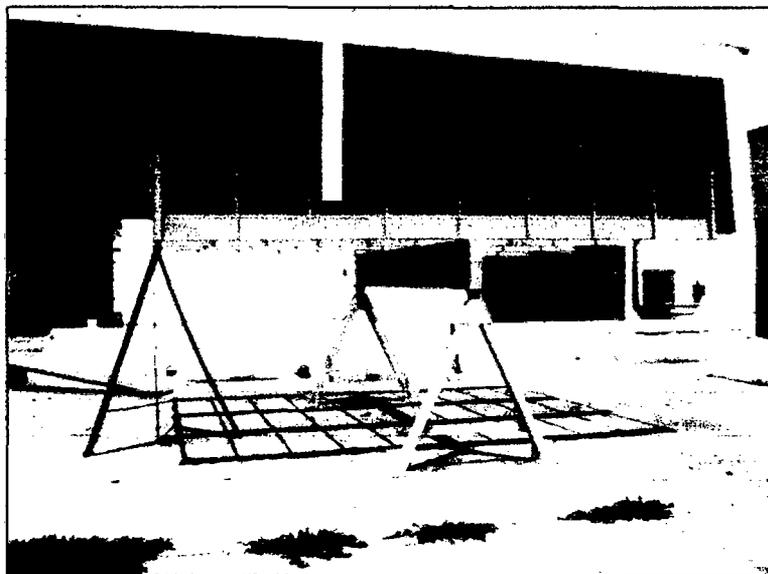


Foto 3.3. Vista general del soporte estructural durante la etapa de construcción.

-Sub-estructura

Cimentaciones

La cimentación consiste en cuatro zapatas de dimensiones de 0.6 m. X 0.6 m. X 0.4 m. de concreto de 175 Kg/cm². Estas zapatas fueron vaciadas incorporando en el interior de cada una dos pernos de anclaje de 5/8" de diámetro y 15 cm. de longitud, sumando ocho pernos en total. Estos pernos de anclaje tienen como finalidad fijar los tijerales -descritos líneas abajo- a las zapatas.



Foto 3.4. Cimentaciones después del proceso de endurecimiento del concreto.

En la foto 3.4. se observa a dos de las cimentaciones con los pernos de anclaje dispuestos para su uso. El diseño de estas cimentaciones tuvo como consideración la carga última de trabajo y la capacidad portante del terreno.

Tijerales

En número de dos, cada uno de estos tijerales está conformado por tubos estructurales cuadrados de 7.5 cm. X 4.3 mm de espesor y constituyen la sub-estructura o estructura de soporte del sistema, semejante un caballete. Estos miembros han sido diseñados considerando los requerimientos de flexión, compresión y torsión simultáneos, tal como se determina en el análisis estructural de cada elemento. En la foto 3.5 se puede ver con más detalle la configuración de estos miembros.

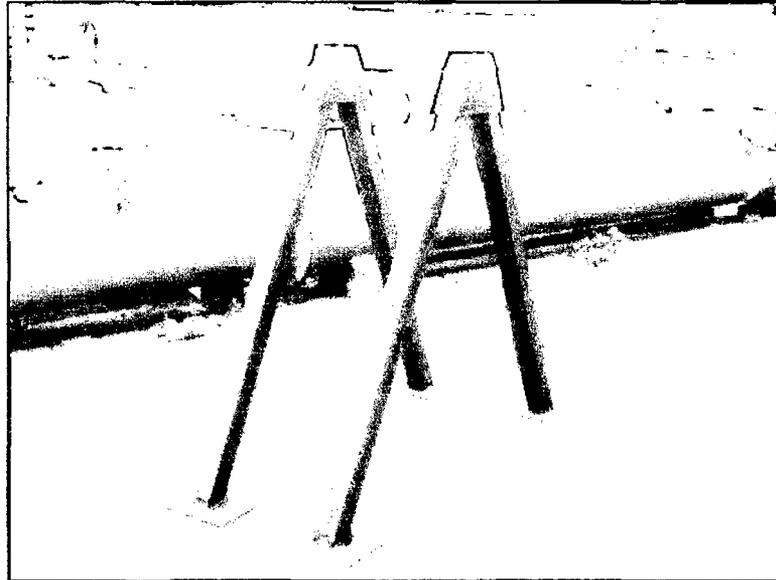


Foto 3.5. Tijerales que eventualmente constituirían la subestructura del modelo.

-Superestructura

Viga Principal

Esta es una viga W 16 X 31 de una longitud de 3.86 m., con rigidizadores cada 1.29 m. Este elemento se fija por los extremos a la subestructura gracias a las barras de ojo que contienen al eje de giro del sistema y fue diseñado bajo requerimiento de flexión. Esta viga sostiene la totalidad del sistema y fue formada gracias a la soldadura de tres planchas de acero A 36. Se optó por esta alternativa pues una viga semejante fabricada con esas dimensiones resultaba excesivamente costosa. La foto 3.6. muestra la viga principal durante la etapa de soldaduras.

Vigas Secundarias

Fueron construidas en número de cuatro, están apoyadas sobre la viga principal. Consisten en vigas W 12 X 14 de 4.8 m. de longitud que fueron diseñadas por flexión. Se encuentran apoyadas aproximadamente en el centro (apoyo principal sobre la viga W16 X 31) y en los extremos gracias a apoyos mecánicos. No tienen rigidizadores y, al igual que la viga principal, son producto de la unión de tres planchas de acero A 36.

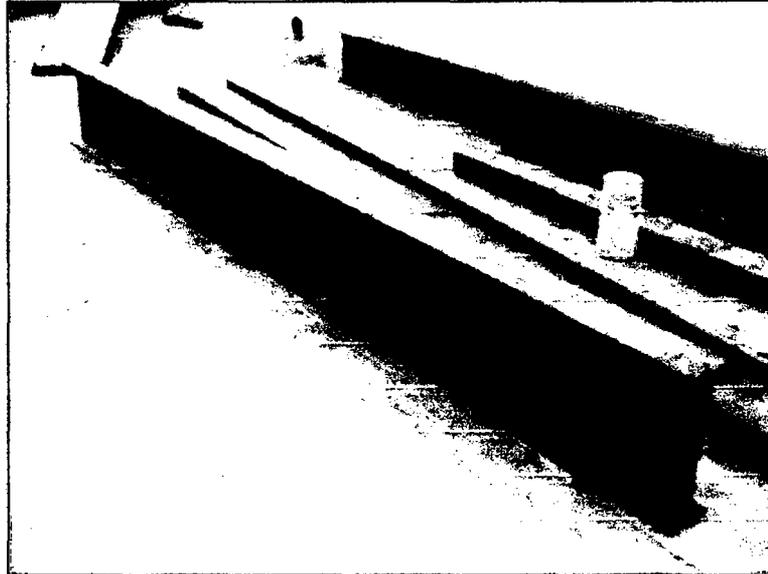


Foto 3.6. En primer plano se observa la viga principal. Más allá, una de las vigas secundarias

Viguetas

Estas viguetas son canales C 2 X 1 X 2mm de 1.22 m de longitud cada uno. Se encuentran soldadas por los extremos a las vigas secundarias, siendo perpendiculares a estas, y se encuentran distanciadas por luces de 0.66 m. El requerimiento de diseño es de flexión y tienen como finalidad servir de apoyo a las planchas de fibrocemento, reduciendo su luz de flexión y evitando su falla, así como rigidizar el total de la súper estructura, aproximándola al monolitismo. En el módulo experimental se instalaron treinta y seis.



Foto 3.7. Detalle de las viguetas firmemente soldadas a las vigas secundarias.

Planchas de Fibrocemento

Estas planchas fueron instaladas para soportar directamente el peso del estrato de suelo. En número de seis, fueron fijadas a las viguetas C 2 X 1 X 2mm y sus dimensiones son 1.22 m. X 2.44 m.

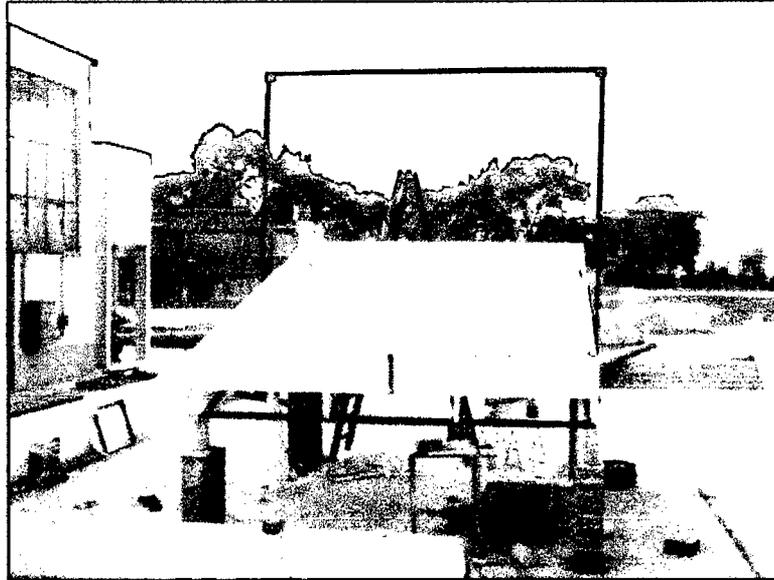


Foto 3.8. El revestimiento blanco del modelo está constituido por planchas de fibrocemento.

-Sistema de Elevación

El uso del modelo de simulación de lluvias a diferentes pendientes requiere de un sistema de elevación confiable, rápido y sobre todo, seguro. Es por ello que, gracias al consejo del Dr. Carlos Zavala Toledo, reconocido especialista en diseño en acero, se decidió hacer uso de dos tornillos sujetos a un vástago, tal como se muestra en la foto 3.9, a lo cual se denominará sistema de elevación. Este elemento, comúnmente llamado "gusano", ha sido diseñado para resistir una carga en compresión de 8 toneladas, siendo su requerimiento máximo de sólo 2 toneladas, por lo que se puede decir que ha sido sobredimensionado. Adicionalmente se le han soldado dos brazos de palanca a ambos lados, lo que hace su uso sencillo en extremo y lo bastante seguro para confiar en él.



Foto 3.9. Sistema de elevación. Obsérvese los tornillos -arriba y abajo- sujetos al vástago de acero A36.

□ Sistema de Bombeo y Colección

-Bomba de Succión

Consiste en una bomba de succión periférica Pedrollo con una potencia de 0.5 Hp y no. de serie 05000065. Tiene como finalidad otorgar a un caudal de 22 l/min la presión de 6 m. de agua aproximadamente, que es lo que la boquilla seleccionada necesita para trabajar en las condiciones deseadas. La capacidad de la bomba excede el requerimiento pero fue escogida pues no es fácil encontrar bombas de menor capacidad (0.375 Hp) y de esas características.

-Tubería

Consiste en una red simple de tubos de 3/4" de diámetro (aproximadamente 2 cm.). Esta tubería conduce al agua destinada a la

simulación desde la cisterna hasta la boquilla aspersora y cuenta con una serie de accesorios tales como codos y válvulas en el recorrido para complementar sus funciones. En el trayecto se instaló un medidor volumétrico que determina el volumen de agua que circuló por la tubería. Este dispositivo fue situado con la finalidad de determinar el caudal dividiendo la diferencia de lecturas volumétricas por el tiempo transcurrido entre cada lectura.

-Boquilla Aspersora

La boquilla elegida fue la Fulljet SQW ¾ HH-71WSQ. Este dispositivo es un producto de la empresa norteamericana Spraying Systems y tiene como características principales las siguientes:

- El emitir un chorro cónico, cuadrado, lleno y aproximadamente uniforme, lo que la hace conveniente para los fines que este trabajo de investigación persigue.
- De acuerdo a las especificaciones del fabricante, esta boquilla emite un chorro pulverizado de 22 l/min a una presión de 0.5 bar. Esto fue comprobado en las pruebas preliminares realizadas en esta investigación.
- Las gotas que genera bajo 0.6 bar. de presión son semejantes en tamaño y velocidad a las de las lluvias naturales intensas (suponiendo lluvias de 100 mm/h).

Estas características son las que motivaron su elección por sobre otros modelos y marcas de boquillas.

-Sistema de Colección de Sedimentos

Consiste en dos tanques de fibra de vidrio que tienen como finalidad almacenar el agua con los sólidos en suspensión producto de los ensayos realizados. Cada uno de los tanques tiene una capacidad de 250 L y las instalaciones destinadas al uso de accesorios han sido inutilizadas.



Foto 3.10. En la parte inferior de esta foto, se observa uno de los tanques de fibra de vidrio empleados en los ensayos.

□ Parcela de Pruebas

Es un estrato de suelo con 15 cm. de espesor aproximadamente. Las características de este suelo pueden variar de acuerdo a los intereses y objetivos del investigador contando con la atribución de instalar cualquier tipo de suelo. De hecho que el espesor del estrato se puede aumentar hasta los 30 cm. pues el modelo está diseñado estructuralmente para soportar semejante requerimiento. En la foto 3.11 se aprecia cómo es que la parcela ha sido dividida en dos sub parcelas o parcelas mellizas y una de ellas ha sido protegida con una especie vegetal, mientras que la otra permanece sin cobertura. Cada parcela melliza tiene 4.8 m de largo por 1.78 m de ancho.

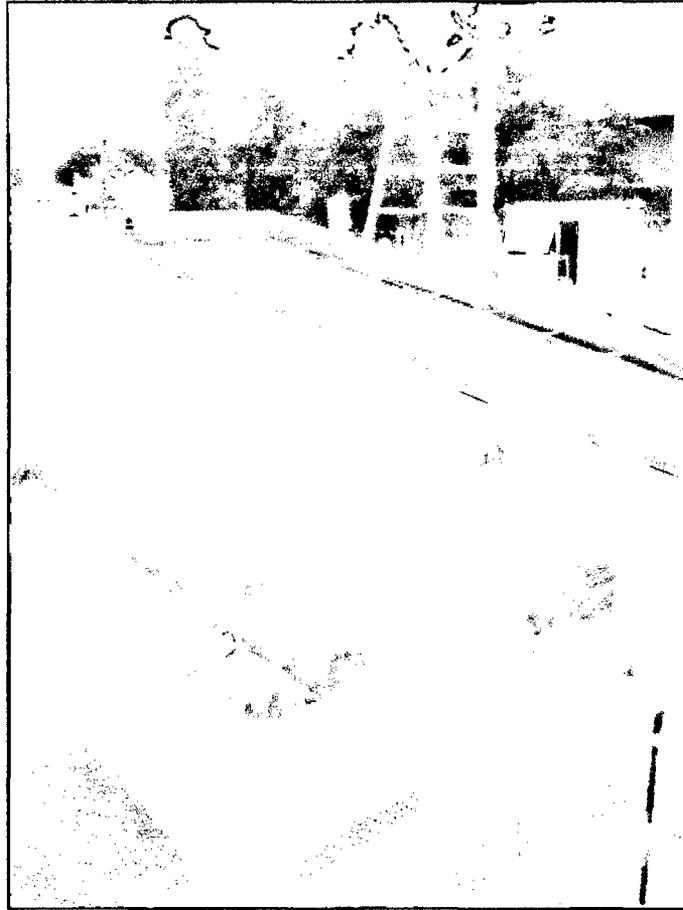


Foto 3.11. Parcela de pruebas durante ejecución de los ensayos.

3.2. Caracterización

3.2.1. Caracterización Geométrica y Topográfica

Las pruebas se realizaron bajo las siguientes características topográficas:

- Pendientes de 5, 10 y 20%, escogidas por cubrir un amplio rango de situaciones: la menor correspondería a una pendiente relativamente suave y poco exigente, mientras que la mayor de las pendientes correspondería a un caso crítico en donde se debería registrar mayores problemas en lo que a erosión se refiere.
- La parcela de prueba ha sido dividida en dos parcelas mellizas y cada una tiene dimensiones de 4.8 m X 1.78 m. La inclinación se encuentra en dirección de la mayor de las dimensiones, lo que favorece la formación de escorrentía.
- La superficie del terreno es aproximadamente plana.

Se debe recordar que esta parcela de pruebas no corresponde a la representación de ninguna cuenca en particular: sus dimensiones fueron escogidas de esa forma pues en el Laboratorio Nacional de Hidráulica se dispone de un modelo de simulación de escorrentía -empleado por los investigadores Luis Alberto de La Cruz Fallaque y Dashiell Arias Mamani en sus respectivas investigaciones- cuyas dimensiones fueron aproximadamente reproducidas en el modelo descrito en este trabajo con la finalidad de poder realizar comparaciones en futuros trabajos de investigación. Sin embargo es posible simular en la parcela de pruebas una topografía específica que represente un caso en particular de nuestra geografía, si ello es parte de un objetivo de investigación.

3.2.2. Caracterización Hidrológica

Los ensayos se realizaron bajo las siguientes características hidrológicas:

- Una intensidad aproximadamente constante de 85 mm/h, lo que corresponde a lluvias de alta intensidad buscando con esto el caso más crítico.
- Tiempos de exposición son de 15 y 30 minutos.

Se sabe que los eventos hidrológicos reales son de intensidad variable y en muchos casos de mayor duración a las indicadas. Las características descritas tratan de simular un evento hidrológico real mediante una lluvia de menor duración y de una intensidad alta y constante.

La intensidad y los tiempos detallados en este capítulo fueron escogidos en base a un trabajo de calibración realizado por el autor de la tesis que consistió en el registro de diversas lluvias acontecidas en la ciudad de Tingo María en el verano del año 2007. Los detalles de esta calibración se encuentran en el Anexo D.

3.2.3. Caracterización Geotécnica

El suelo elegido para las pruebas fue el que se encontró en Laboratorio Nacional de Hidráulica producto de una serie de ensayos de corte y relleno realizados por la Facultad de Ingeniería Civil en 2007. El análisis granulométrico reveló que se trataba de una arena limosa o SM (10% de grava, 60% de arena y 30% de finos, aproximadamente), combinación que, de acuerdo a Gray y Sotir (Ref. Bibl. N°

20), resulta crítica en los fenómenos de erosión y por lo tanto deseable para las pruebas en este campo. Esta doble ventaja –disponibilidad inmediata y alta propensión a la erosión- decidieron el uso de este suelo en las pruebas. Sin embargo se observó también que -al ser éste un material de subsuelo- carecía de los nutrientes esenciales para el establecimiento de cualquier tipo de vegetación, por lo que se decidió someterlo a un proceso de fertilización descrito en el siguiente subtítulo.

3.2.4. Caracterización Botánica

La especie escogida fue el grass Bermuda Mirage (*Cynodon dactylon*) debido a las siguientes características:

- Es frecuentemente empleado en obras de ingeniería civil en muchas partes del mundo como medida de protección contra la erosión.
- Es capaz de prosperar bajo un amplio rango de temperatura y altitudes.
- Su siembra y mantenimiento resultan económicos y sencillos.
- Prospera con facilidad bajo condiciones difíciles y es resistente al pisoteo.
- No fue empleado para investigaciones previas en el LNH.



Foto 3.12. Pasto Bermuda.

Técnica de establecimiento y fertilización del terreno

La técnica de establecimiento empleada en la siembra de las semillas fue la de siembra por voleo. Como se mencionó en el subtítulo anterior, el material escogido provenía de un estrato inferior del suelo y carecía de la fertilidad necesaria para permitir el crecimiento del pasto seleccionado, por lo que se procedió a fertilizarlo.

El procedimiento de siembra siguió los siguientes pasos:

- Se batió el terreno para ganar oxigenación y retirar las piedras que pudieran perjudicar el desarrollo de la vegetación.
- Se hizo uso de humus de lombriz incrementando su contenido orgánico de 0% a 3.27% (ver Anexo F), siendo este porcentaje suficiente para asegurar el crecimiento del pasto.
- Se procedió a nivelar el terreno y compactarlo muy suavemente dando leves golpes de ladrillo.
- Las semillas del pasto Bermuda fueron mezcladas con arena para ser esparcidas al voleo con mucho cuidado y manteniendo su uniformidad.



Foto 3.13. Terreno recientemente removido y enriquecido con humus de lombriz

- Luego de haberse sembrado las semillas en toda la extensión de la parcela, se procedió a protegerlas esparciendo sobre ellas humus de

lombriz. Después se procedió a regar con sumo cuidado aplicando 9 gramos por metro cuadrado.

- Finalmente se tendió una malla sobre la parcela para evitar que las aves coman las semillas.



Foto 3.14. Sembrado de las semillas al voleo.



Foto 3.15. Terreno luego de haber sido sembrado y ligeramente compactado.

A diferencia de otras formas de establecimiento de la vegetación en el terreno, la siembra de las semillas directamente sobre el terreno permite un óptimo desarrollo radicular, consiguiendo con ello cumplir con el doble rol asignado a la vegetación en el control de erosión: protección y cohesión del terreno.



Foto 3.16. Acá se observa el tendido de la malla que ha de proteger a las semillas recién sembradas de las aves.

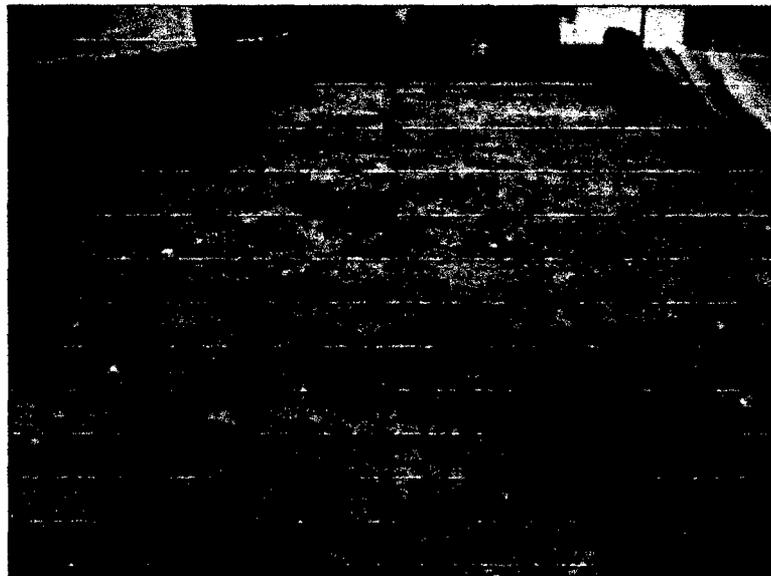


Foto 3.17. .Crecimiento del pasto sin uso de fertilizantes

Debe tomarse en consideración que antes de realizar la siembra sobre el terreno reforzado con humus y otros nutrientes, se intentó establecer la vegetación sobre el mismo terreno sin fertilización. El resultado no fue el esperado pues el desarrollo del pasto apenas alcanzó un 5% o menos del área de la parcela. Debido a ello se optó por un eficiente proceso de fertilización descrito el Anexo F.



Foto 3.18. Desarrollo del pasto con el uso de fertilizantes

3.3. Uso de floculación en la poza de sedimentación

Los floculantes son químicos que al disolverse en el agua aglomeran los sólidos en suspensión tales como limos y arcillas propiciando su decantación. Sus usos son variados y van desde el proceso de potabilización del agua hasta los de la minería, pasando por la limpieza de piscinas y el tratamiento de aguas de autolavados. Estos químicos son sin duda de gran ayuda para la optimización en el uso del agua.

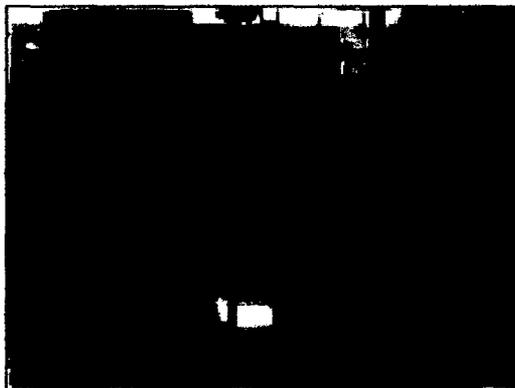


Foto 3.19. Acción del floculante en una prueba preliminar.

Sin embargo en el presente trabajo de investigación se le dará un uso distinto: nos permitirá separar los sólidos en suspensión producto de la erosión facilitando su análisis y medición. En la foto 3.19 se puede apreciar el efecto que se desea

obtener gracias al uso de los floculantes: la clara diferenciación de la fase sólida de la líquida nos facilitó la tarea de determinar las tasas de erosión en cada uno de los experimentos. La foto 3.20 nos muestra la acción del floculante durante los ensayos: se observa una fase líquida de agua verdosa y al fondo del tanque de fibra vidrio una fase sólida claramente diferenciada.

El químico elegido es el floculante aniónico Sedipur AF 205, producto elaborado y comercializado por la compañía química Basf, empresa que tuvo la gentileza de donar el floculante necesario para este trabajo de investigación.

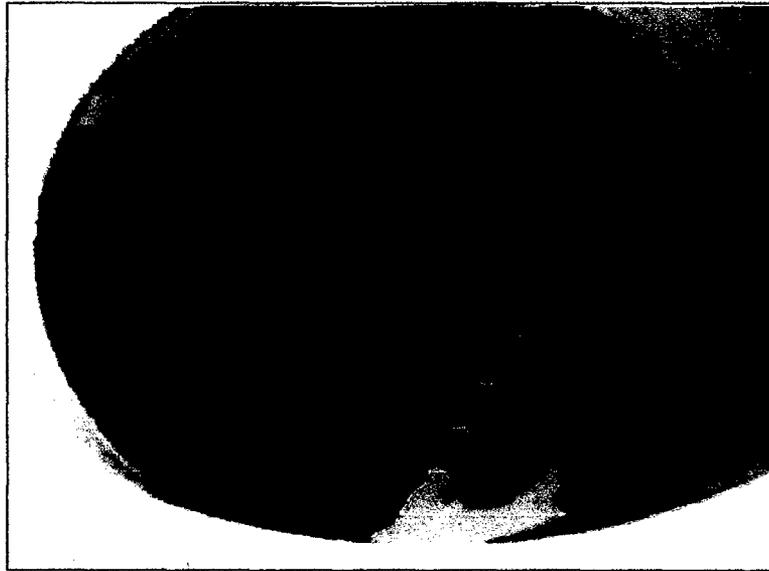


Foto 3.20. Acción del floculante en la fase de ensayos.

CAPÍTULO 4

DATOS ADQUIRIDOS EN LA INVESTIGACION

En este capítulo se describe el procedimiento de toma de datos correspondiente a cada uno de los ensayos realizados y se presentan los resultados obtenidos en los mismos. Además se procederá a examinar y discutir esta información, cotejándola con los valores proyectados por otros estudios para fenómenos similares y bajo las mismas condiciones.

4.1. Procedimiento de toma de datos

4.1.1. Ensayos preliminares

Los ensayos preliminares tienen como finalidad determinar que las características de la lluvia simulada se aproximen a las de la lluvia natural. Para esto se tomó como referencia las lluvias registradas en la ciudad de Tingo María durante el verano del año 2007 (Anexo D). El procedimiento de los ensayos preliminares se describe a continuación.

1. Intensidad natural de la precipitación.

En este punto se determinará experimentalmente la cantidad de agua que cae sobre la parcela de ensayos. Para esto se tomará como referencia las siguientes mediciones:

- Lecturas del medidor volumétrico. Se tomarán lecturas antes y después de cada prueba.
- Volumen de agua medido directamente a la salida de la boquilla. Tal como se muestra en la foto 4.1, se reunirá el agua justo después de haber sido expulsada por la boquilla aspersora en un lapso de tiempo determinado.

Teóricamente ambas mediciones deben arrojar resultados aproximadamente iguales. De todas formas estas mediciones nos permitirán calcular la intensidad promedio alcanzada en las pruebas, dividiendo el volumen de agua circulado entre el producto del área de incidencia y el tiempo transcurrido en el ensayo.

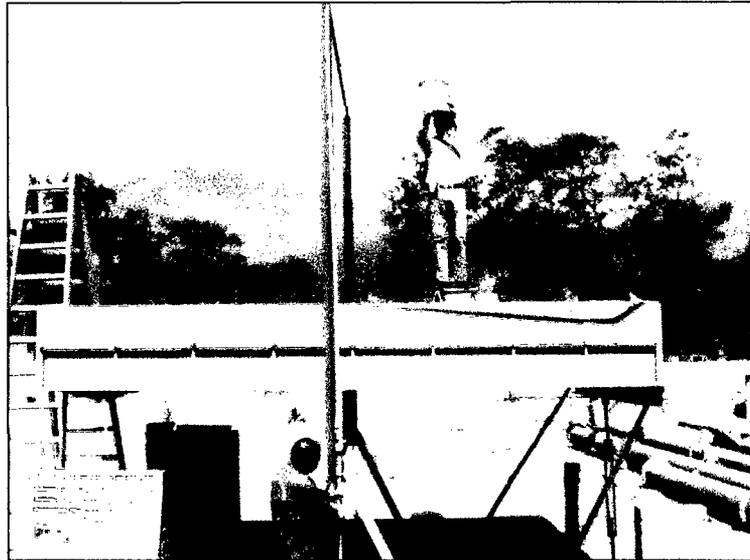


Foto 4.1. Obtención del agua directamente de la boquilla aspersora.

2. Aplicación de la lluvia uniforme sobre toda la parcela de ensayo.

Para determinar si la precipitación simulada se encuentra uniformemente distribuida sobre la parcela de pruebas se procedió a situar un pluviómetro marca Tru Check en diferentes puntos de la parcela y en cada uno de los ensayos definitivos ejecutados. En teoría las intensidades en los puntos de la parcela deben ser aproximadamente iguales, pero es necesario determinar las variaciones que éste parámetro pueda presentar entre la zona central y la periferia de la parcela.



Foto 4.2. Uso del pluviómetro durante la ejecución de los ensayos.

4.1.2. Ensayos definitivos

Los ensayos definitivos nos permitirán observar, describir y medir los fenómenos que se producen cuando un terreno se expone a los efectos de un evento hidrológico experimental ejecutado en condiciones de laboratorio. Entre estos fenómenos podemos adelantar que los más importantes son la formación de surcos y cárcavas, la erosión por salpicadura, la formación de escorrentía en condiciones de laboratorio y la comprobación del rol de la vegetación en el control de la erosión.

□ Matriz de Pruebas

Descrita en el último ítem del Capítulo 2, la matriz de pruebas es el marco en el cual se ha de desarrollar la etapa de los ensayos definitivos. Se divide en dos fases, totalizando doce pruebas finales, y se presenta a continuación:

Tabla 4.1. Matriz de pruebas. Fases 1 y 2 de los ensayos.

FASE	PRUEBA	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Tiempo de Lluvia (minutos)	Cobertura
I	I-1	85	5	15	Ninguna
	I-2	85	5	30	
	I-3	85	10	15	Ninguna
	I-4	85	10	30	
	I-5	85	20	15	Ninguna
	I-6	85	20	30	
II	II-1	85	5	15	Pasto Bermuda
	II-2	85	5	30	
	II-3	85	10	15	Pasto Bermuda
	II-4	85	10	30	
	II-5	85	20	15	Pasto Bermuda
	II-6	85	20	30	

□ Procedimiento de los ensayos finales

a) Nivelación de las parcelas mellizas.

Esta etapa de los ensayos se hizo uso de un nivel y una mira para tomar medidas de altura en todos los puntos de la cuadrícula. Esta nivelación se realizó

antes de aplicar la lluvia simulada en cada uno de los ensayos y tiene como finalidad tomar la referencia del nivel del terreno antes del evento hidrológico simulado. Una vez realizada la lluvia artificial y las mediciones correspondientes –descritas líneas abajo- se procede a repetir la nivelación en los mismos puntos de nivelación anterior. El objetivo de este procedimiento es el de calcular la diferencia de niveles que se produce por la acción erosiva de las lluvias entre nivelación y nivelación.

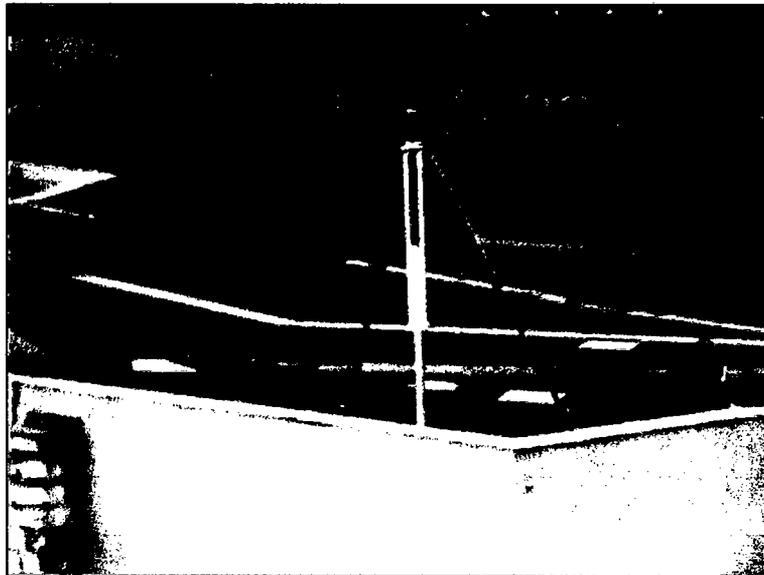


Foto 4.3. Equipo empleado en la etapa de nivelación.

b) Lecturas del medidor volumétrico

Este dato es de gran importancia pues nos permitirá conocer el volumen de agua que fluye por la tubería del sistema y que finalmente colisiona en el terreno de pruebas. Las lecturas se tomarán antes y después de cada lluvia artificial siendo la diferencia de estas lecturas el parámetro que se usará en posteriores cálculos.

c) Ejecución de la lluvia artificial

Sin duda el momento más importante de las pruebas y el que despierta el mayor interés. Se simularon seis lluvias, siendo la duración de tres de ellas 15 minutos y de las restantes 30 minutos. El impacto de la lluvia sobre el terreno –erosión por salpicadura, Capítulo 1- y la formación de cárcavas y surcos característicos de este fenómeno dan origen a los sedimentos cuyo análisis son el fin de este estudio.

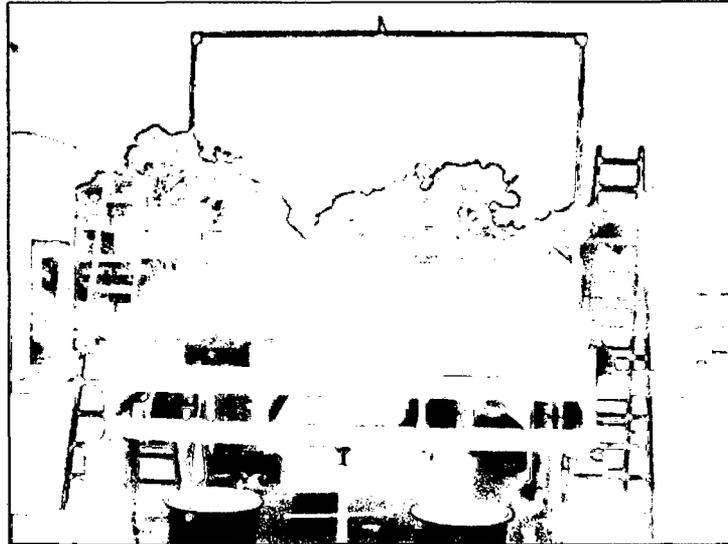


Foto 4.4. Parcela de pruebas durante la ejecución de los ensayos.

d) Lecturas en las tanques graduados durante el evento

El volumen de cada tanque de fibra de vidrio fue graduado con una escala de lectura de 10 litros. Esto tiene como finalidad determinar el volumen de agua generado por escorrentía en cada parcela durante los eventos de lluvia simulada, lo que permitirá dibujar hidrogramas de las pequeñas cuencas para cada caso. La lectura final nos dio el volumen de agua de escorrentía total generada por la lluvia simulada.

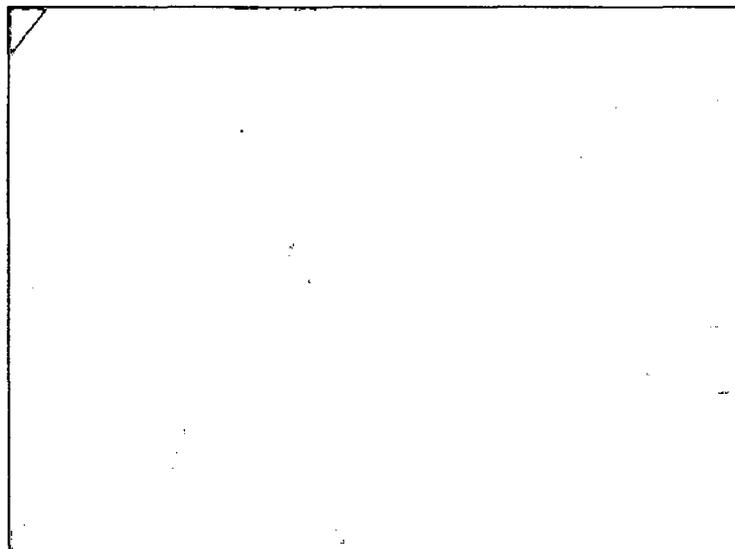


Foto 4.5. Aplicación del floculante sobre una de las muestras después de la aplicación de la lluvia simulada. Los pequeños números en el interior del tanque permiten calcular el volumen de agua recolectada.

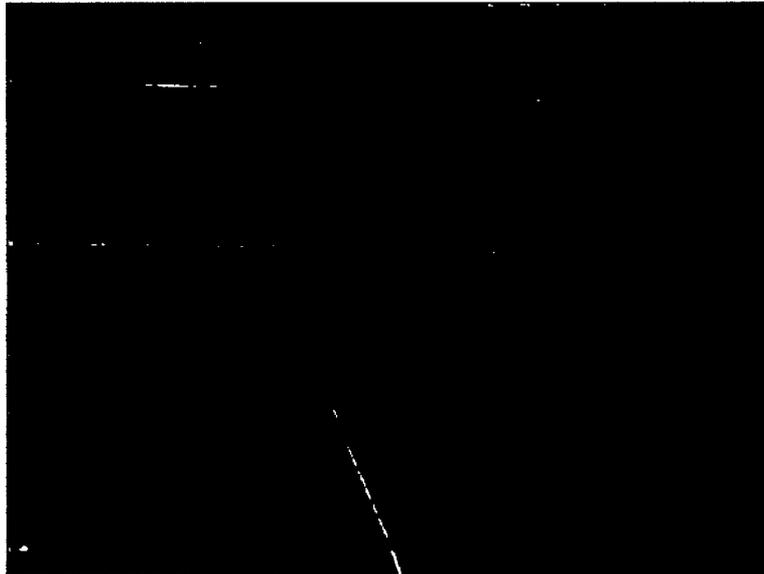


Foto 4.6. La ventana de salida mostrada nos permite recolectar el agua cargada de sedimentos en suspensión con eficiencia para su posterior análisis.

e) Aplicación del floculante

Una vez finalizado el evento de lluvia simulada se procederá a aplicar el floculante aniónico Sedipur AF 205 sobre el agua turbia producto de la escorrentía. Este volumen de agua contiene en suspensión a los sólidos que deberán ser analizados posteriormente por lo que es necesario separarlos del volumen de agua que los contiene. El floculante Sedipur AF 205 permite obtener fácilmente una fase sólida claramente diferenciada de la fase líquida.

f) Evacuación del agua sobrante y retiro del sólido decantado

Luego de realizada la aplicación del floculante es sencillo separar la fase sólida de la fase líquida, por lo que se procede a eliminar la segunda y conservar la primera. Posteriormente la fase sólida, conformada fundamentalmente por limos y arcillas, fue retirada de los tanques de fibra de vidrio.

g) Análisis del sedimento recolectado

El sólido decantado fue enviado luego al Laboratorio de Mecánica de Suelos para obtener su peso seco y granulometría. Esto fue posible para las muestras obtenidas en la Fase I, mas no se pudo obtener la granulometría del total de las muestras de la Fase II pues el peso seco no superó los 500 gr. necesarios para realizar las pruebas de granulometría.

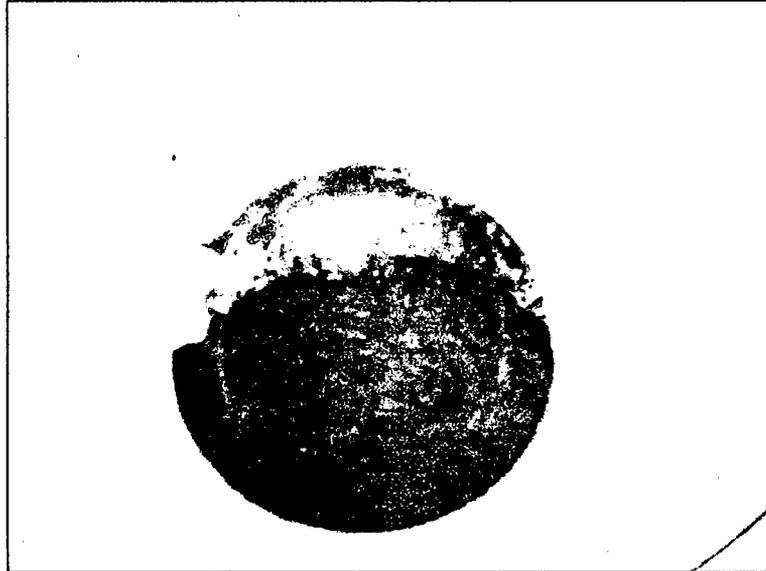


Foto 4.7. Fase sólida lista para ser separada y analizada.

h) Reposición del terreno erosionado

En esta etapa de las pruebas se procede a reponer el terreno erosionado con material de las mismas características para tratar de reproducir las condiciones iniciales.

□ Empleo de la cuadrícula

Para realizar el control de los puntos en la nivelación descrita líneas arriba se hizo uso de una cuadrícula de puntos distanciados unos de otros 40 cm. El objetivo de esta cuadrícula es ayudar a determinar la variación topográfica en toda la extensión de la parcela tomando lecturas antes y después de cada evento. La diferencia de estas lecturas da como resultado el desgaste que ha experimentado el terreno por la acción erosiva de las lluvias.

La cuadrícula está conformada por once filas –de la fila 1 a la 11- y ocho columnas –de la columna A hasta la H-, constituyendo de esta forma 88 puntos uniformemente distribuidos en toda la extensión de la parcela de 15.6 m².

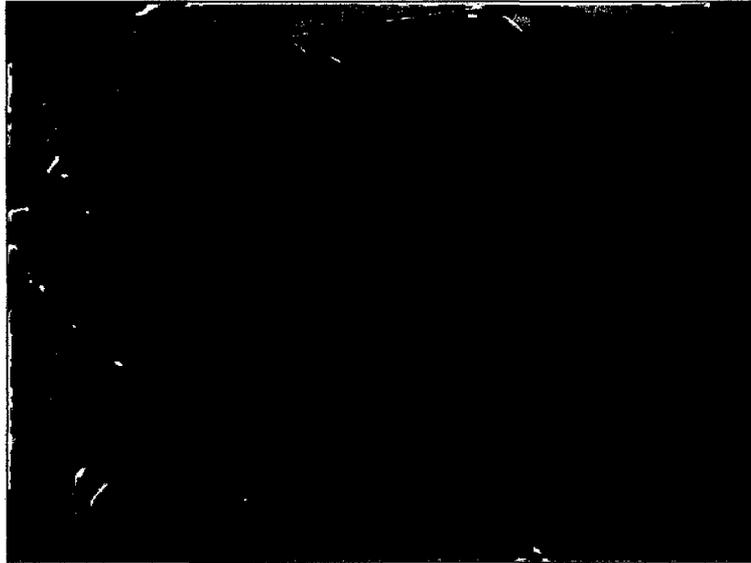


Foto 4.8. Se aprecia uso de la cuadrícula durante los ensayos.

□ **Orden en la ejecución de los ensayos**

Las doce pruebas presentadas en la tabla 4.1 fueron realizadas en siguiendo la siguiente secuencia:

Tabla 4.2. Secuencia de la ejecución de los ensayos para las Fases 1 y 2.

Lluvia	Prueba	Fecha de Ejecución
1	I-1 II-1	09/01/2008
2	I-2 II-2	10/01/2008
3	I-3 II-3	11/01/2008
4	I-4 II-4	14/01/2008
5	I-5 II-5	15/01/2008
6	I-6 II-6	16/01/2008

Como se puede apreciar, las pruebas I-1 y II-1 fueron practicadas simultáneamente: I-1 en la zona de la parcela que carece de cobertura y II-1 en el área protegida. Lo mismo vale para los demás ensayos

4.2. Mediciones Hidráulicas y de Erosión de Suelo

El presente subcapítulo resume los resultados de los ensayos realizados entre los meses de diciembre de 2007 y febrero de 2008. Asimismo describe el tipo de

suelo en el que se realizaron los experimentos y el desarrollo del pasto Bermuda desde su siembra en noviembre de 2007.

4.2.1. Propiedades del suelo empleado

Para determinar el tipo de suelo que fue evaluado en la etapa de pruebas se procedió a realizar los ensayos de clasificación SUCS en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Peso específico relativo de sólidos	:	2.67 gr/cm ³
Límite líquido	:	18.7%
%grava	:	10%
%arena	:	60%
%finos	:	30%
Clasificación SUCS ASTM D2487	:	SM

Gracias al estudio de mecánica de suelos podemos afirmar que el suelo utilizado en el estudio es una arena limosa (SM). Las arenas limosas tienen como características bajos valores de permeabilidad y altos de erosionabilidad, que hacen a este suelo ideal para los objetivos de esta investigación pues se trata de uno que nos presentará situaciones críticas de erosión.

4.2.2. Desarrollo del Pasto Bermuda

Como se hizo mención antes, el pasto Bermuda Mirage fue elegido por el diverso uso que se le da en las obras de control de erosión de la ingeniería civil - Ven Te Chow (Ref. Bibl. N° 8). Para asegurar el adecuado desarrollo radicular y un firme establecimiento en el terreno de pruebas se decidió que la técnica a manejarse fuera la de siembra al voleo. El primer intento por establecer las semillas del pasto Bermuda fue muy poco exitoso, tal como se recuerda en el Capítulo 2, decidiéndose hacer un segundo intento empleando técnicas de fertilización con humus y nutrientes específicos como Potasio, Nitrógeno y Urea (ver Anexo F).

La segunda siembra se llevó a cabo el día 17 de noviembre de 2007 y el pasto Bermuda presentó el siguiente desarrollo.

Tabla 4.3. Crecimiento del pasto Bermuda respecto al tiempo.

Día	Longitud (cm)	Etapas de desarrollo
7	0	germinación
13	0.5	
16	1	desarrollo de los tallos
20	2.8	
23	6.4	
29	12	
32	14.4	
40	22	plenitud de crecimiento

4.2.3. Erosión de Suelo

□ Tasas de Erosión (Kg.)

Para determinar la cantidad de suelo erosionado se recurrió a dos procedimientos distintos: el uso de floculantes después del evento hidrológico simulado y nivelación topográfica antes y después de cada lluvia.

1. Uso de floculantes después del evento hidrológico simulado. Mediante este procedimiento se obtiene la cantidad de sedimentos expresada en kilogramos. El floculante empleado fue el Sedipur AF 205, tal como se describe líneas arriba.

Tabla 4.4. Tasas de erosión producto de cada uno de los ensayos.

FASE	PRUEBA	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Tiempo (min)	Cobertura	Erosión (Kg)
I	I-1	85	5	15	Ninguna	0.415
	I-2	85	5	30	Ninguna	0.886
	I-3	85	10	15	Ninguna	2.014
	I-4	85	10	30	Ninguna	5.611
	I-5	85	20	15	Ninguna	17.430
	I-6	85	20	30	Ninguna	27.740
II	II-1	85	5	15	Pasto	0.000
	II-2	85	5	30	Bermuda	0.000
	II-3	85	10	15	Pasto	0.001
	II-4	85	10	30	Bermuda	0.002
	II-5	85	20	15	Pasto	0.065
	II-6	85	20	30	Bermuda	0.001



Foto 4.9. Sedimento recolectado.

2. Nivelación topográfica.- Se empleó el equipo del Laboratorio Nacional de Hidráulica (nivel y mira) para obtener la diferencia de niveles en el terreno antes y después de cada lluvia. La variación del terreno se encuentra expresada en metros y se hizo uso de cada uno de los puntos de la cuadrícula descrita en él.

Tabla 4.5. Degradación del terreno por acción de los ensayos.

FASE	PRUEBA	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Tiempo (min)	Cobertura	Erosión (cm)
I	I-1	85	5	15		-0.06
	I-2	85	5	30	Ninguna	0.2
	I-3	85	10	15		0.07
	I-4	85	10	30	Ninguna	-0.03
	I-5	85	20	15		0.1
	I-6	85	20	30	Ninguna	-0.07
II	II-1	85	5	15	Pasto	0.09
	II-2	85	5	30	Bermuda	0.3
	II-3	85	10	15	Pasto	0.13
	II-4	85	10	30	Bermuda	-0.18
	II-5	85	20	15	Pasto	0.08
	II-6	85	20	30	Bermuda	0

Como se puede observar, los resultados de erosión calculados como una degradación del terreno expresada en centímetros no parecen resultar coherente pues en algunos casos se aprecia lo opuesto a erosión: agradación. La

agradación, o acumulación de sedimentos, no se debería dar en este tipo de fenómenos y se puede atribuir su aparente existencia a dos posibles factores:

- El uso de equipo topográfico deficiente. Se empleó un antiguo nivel marca Kern que, se comprobó luego, se encontraba descalibrado por lo que los datos obtenidos del mismo son solo referenciales.
- La dificultad de tomar datos exactos con la ayuda de la mira pues ésta, al encontrarse el terreno completamente húmedo y reblandecido por la intensa lluvia simulada, se hundía con extrema facilidad en el punto tomado arrojando lecturas irremediablemente erróneas.

Es por esto lo que los resultados de la tabla 4.5. sólo son referenciales y no serán tomados en consideración en el análisis y las conclusiones.

□ **Composición del suelo erosionado**

Las masas de suelo erosionado mostradas en la tabla 4.4 (expresadas en Kg.) tienen diferentes características granulométricas que pueden variar por la pendiente del terreno o el tiempo de exposición a la lluvia. En la siguiente página (tabla 4.6) se muestra la composición granulométrica de las muestras de sedimento recolectadas.

Tabla 4-6. Composición del suelo erosionado para cada prueba.

FASE	PRUEBA	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Tiempo (min)	Cobertura	Erosión (Kg)	% grava	%arena	%finos
I	I-1	85	5	15	Ninguna	0.415	0.3	10.7	89
	I-2	85	5	30		0.886	0	7.8	92.2
	I-3	85	10	15	Ninguna	2.014	0	10	90
	I-4	85	10	30		5.611	0	52.2	47.8
	I-5	85	20	15	Ninguna	17.43	0.2	57.1	42.7
	I-6	85	20	30		27.74	0.4	64.9	34.7
II	II-1	85	5	15	Pasto Bermuda	0	NR	NR	NR
	II-2	85	5	30		0	NR	NR	NR
	II-3	85	10	15	Pasto Bermuda	0.001	NR	NR	NR
	II-4	85	10	30		0.002	NR	NR	NR
	II-5	85	20	15	Pasto Bermuda	0.065	NR	NR	NR
	II-6	85	20	30		0.001	NR	NR	NR

□ **Formación de surcos y cárcavas**

La formación de surcos y cárcavas en la parcela sin vegetación como parte del fenómeno de erosión se hizo más evidente a medida que los parámetros de pendiente y tiempo aumentaban. En las últimas pruebas (I-5 e I-6 con pendiente de 20%) la aparición de estas formaciones generó graves pérdidas de suelo en dicha parcela. La parcela protegida con pasto Bermuda no presentó en lo absoluto ninguno de estos fenómenos.

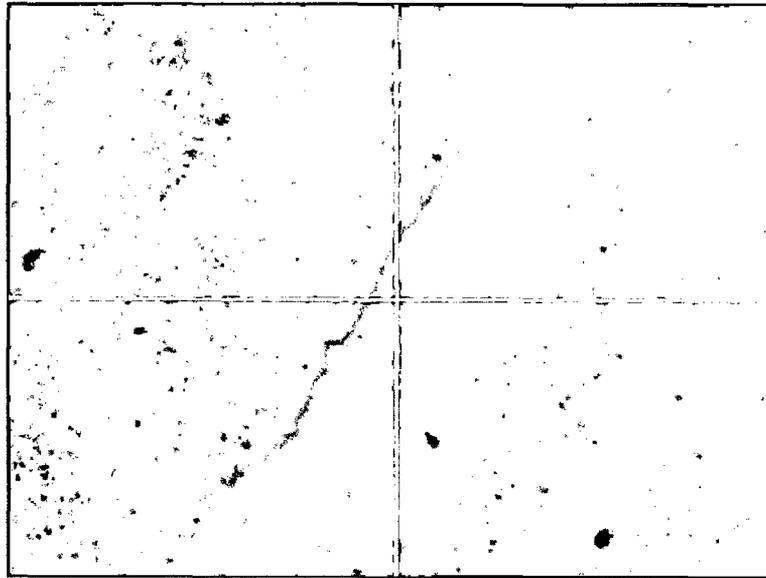


Foto 4.10. Surco producto de la prueba II-4.

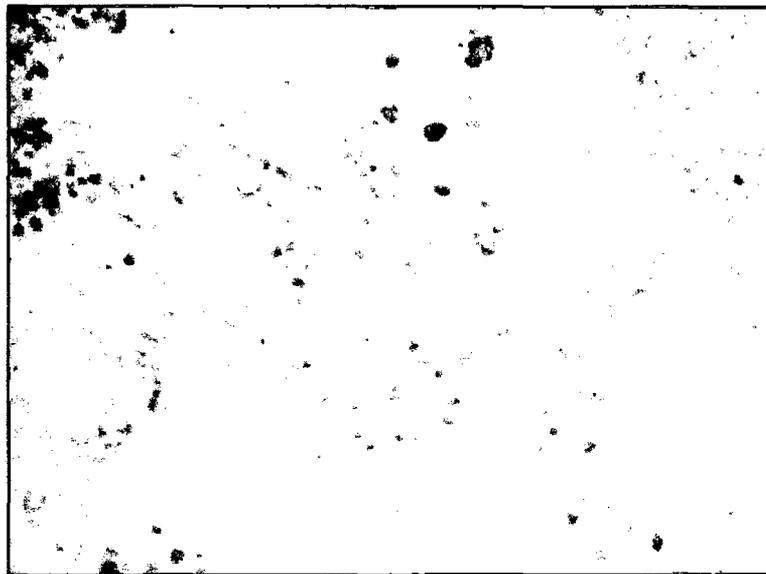


Foto 4.11. Pequeña cárcava originada por II-3.



Foto 4.12. Grave cuadro de pérdida de suelos: cárcavas desarrolladas y crecientes. Prueba II-6.

4.2.4. Hidrología

□ Volúmenes Acumulados

A continuación se presenta el volumen de agua acumulada por tiempo durante el desarrollo de cada uno de los doce ensayos efectuados en este trabajo de investigación. Estos datos fueron tomados directamente en campo.

Tabla 4.7. Lluvia 1. Pruebas I-1 e II-1.

I-1		II-1	
t (min)	Vol (L)	t (min)	Vol (L)
0.00	0	0.00	0
2.42	0	11.17	0
3.63	10	11.87	10
5.07	20	13.12	20
6.60	30	15.33	30
7.55	40	22.17	38
8.63	50		
9.88	60		
10.97	70		
12.13	80		
13.45	90		
14.47	100		
15.90	110		
20.93	112		

Tabla 4.8. Lluvia 2. Pruebas I-2 e II-2.

I-2		II-2	
t (min)	Vol (L)	t (min)	Vol (L)
0.00	0	0.00	0
2.62	0	6.50	0
4.17	10	8.80	10
6.03	20	9.97	20
7.08	30	11.18	30
8.32	40	12.25	40
9.23	50	13.58	50
10.18	60	14.63	60
11.33	70	15.52	70
12.60	80	16.63	80
13.53	90	17.58	90
14.83	100	18.63	100
15.95	110	19.55	110
16.97	120	20.73	120
18.05	130	21.73	130
19.13	140	22.67	140
20.30	150	23.63	150
21.52	160	24.83	160
22.60	170	26.03	170
23.70	180	26.83	180
24.67	190	27.90	190
25.97	200	28.88	200
27.25	210	29.83	210
28.33	220	30.80	220
29.43	230	32.97	230
30.70	240	40.95	236
35.12	242		

Tabla 4.9. Lluvia 3. Pruebas I-3 e II-3.

I-3		II-3	
t (min)	Vol (L)	t (min)	Vol (L)
0.00	0	0.00	0
1.10	0	4.08	0
2.33	10	5.75	10
3.28	20	6.83	20
4.33	30	7.98	30
5.33	40	9.08	40
6.17	50	10.30	50
7.03	60	11.28	60
8.08	70	12.28	70
9.20	80	13.12	80
10.13	90	14.23	90
11.12	100	15.05	100
12.08	110	16.25	110
13.23	120	23.45	120
14.13	130	26.92	121
14.88	140		
19.17	146		

Tabla 4.10. Lluvia 4. Pruebas I-4 e II-4.

I-4		II-4	
t (min)	Vol (L)	t (min)	Vol (L)
0.00	0	0.00	0
1.03	0	6.42	0
2.40	10	8.62	10
3.07	20	10.25	20
3.92	30	11.83	30
4.97	40	13.23	40
5.87	50	14.50	50
6.95	60	15.83	60
7.83	70	17.10	70
8.92	80	18.08	80
9.83	90	19.40	90
11.08	100	20.70	100
11.97	110	21.37	110
12.82	120	22.58	120
13.80	130	23.63	130
14.67	140	24.73	140
15.75	150	25.37	150
16.95	160	26.47	160
17.85	170	27.37	170
18.67	180	28.42	180
19.62	190	29.38	190
20.62	200	30.33	200
21.55	210	32.40	210
22.45	220	40.75	214
24.38	240		
25.22	250		
26.08	260		
26.98	270		
27.95	280		
28.90	290		
29.78	300		
35.48	305		

Tabla 4.11. Lluvia 5. Pruebas I-5 e II-5.

I-5		II-5	
t (min)	Vol (L)	t (min)	Vol (L)
0.00	0	0.00	0
1.03	0	3.75	0
1.83	10	5.68	10
2.65	20	7.25	20
3.67	30	8.42	30
4.83	40	9.27	40
5.83	50	10.22	50
6.75	60	11.03	60
7.52	70	11.88	70
8.68	80	12.93	80
9.58	90	14.00	90
10.45	100	14.83	100
11.18	110	15.17	110
12.17	120	25.50	119
13.15	130		
13.88	140		
15.17	150		
19.60	155		

Tabla 4.12. Lluvia 6. Pruebas I-6 e II-6.

I-6		II-6	
t (min)	Vol (L)	t (min)	Vol (L)
0	0	0	0
1.33	0	2.93	0
2.82	10	4.88	10
4.43	20	6.48	20
5.23	30	7.60	30
6.35	40	8.60	40
7.50	50	9.70	50
8.48	60	10.88	60
9.57	70	12.13	70
10.70	80	13.02	80
12.00	90	13.92	90
12.80	100	15.12	100
13.72	110	15.93	110
14.73	120	16.97	120
15.73	130	17.93	130
16.68	140	18.93	140
17.80	150	20.10	150
18.62	160	20.98	160
19.93	170	21.93	170
20.70	180	22.83	180
21.57	190	23.75	190
22.63	200	24.75	200
23.52	210	25.72	210
24.42	220	26.68	220
25.40	230	27.72	230
26.53	240	28.67	240
27.42	250	29.62	250
28.32	260	30.73	260
29.15	270	41.32	268
30.07	280		
32.23	285		

□ **Hidrogramas de entrada y salida**

Los siguientes gráficos nos muestran los hidrogramas de entrada y salida de todas las pruebas realizadas en el Laboratorio señalando el caudal pico (Q_p) y el tiempo de concentración (t_c) para cada caso. El hidrograma de entrada presente un valor constante de 12.45 l/min y los valores de los hidrogramas de salida fueron calculados con la siguiente expresión:

$$Q_i = \frac{V_{i+1} - V_i}{t_{i+1} - t_i} = \frac{dV}{dt} \quad (4.1)$$

Donde: Q_i = el caudal en un periodo i

V = volumen

t = tiempo

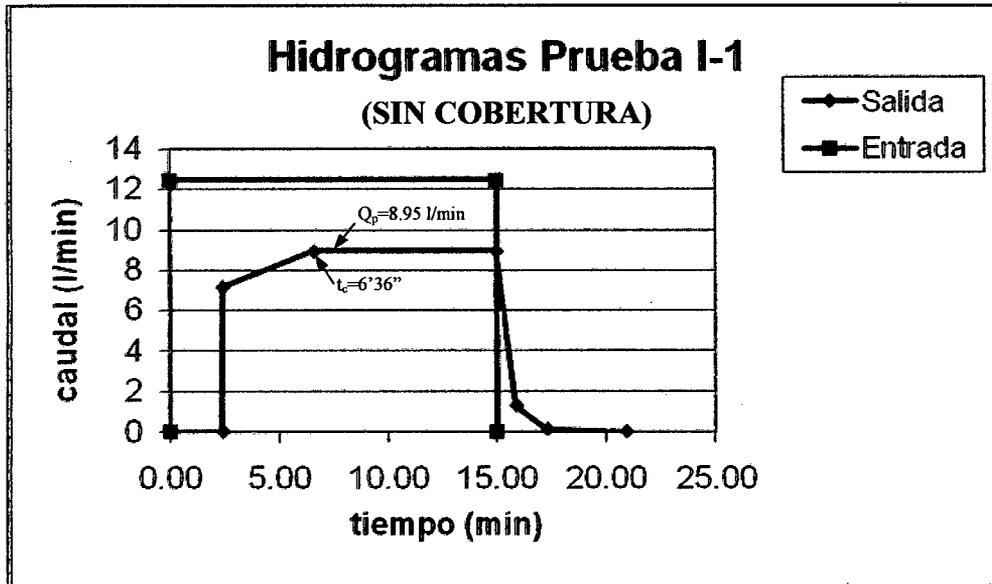


Figura 4.1. Hidrogramas de la prueba I-1: 5%, 15 min.

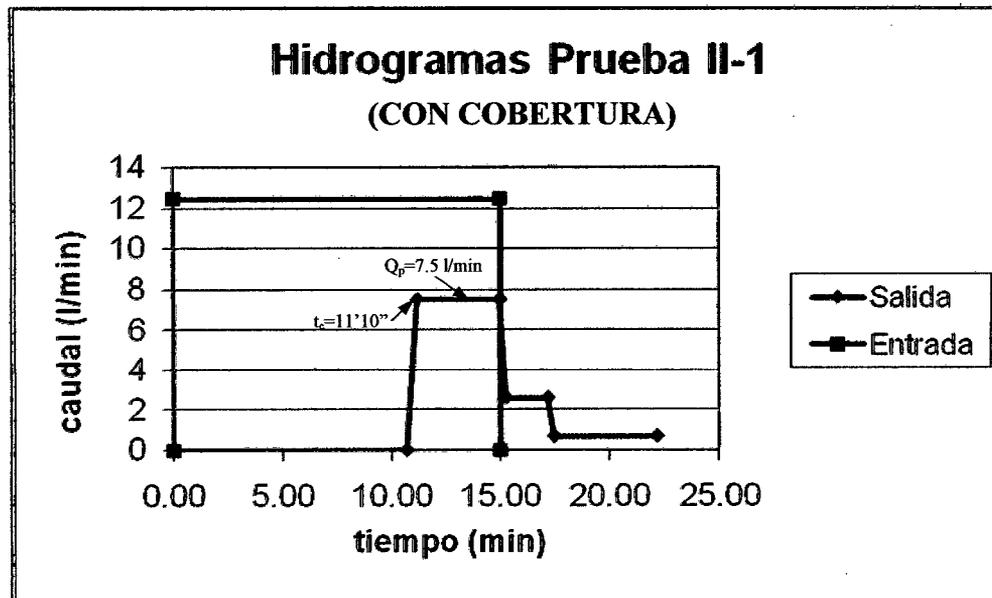


Figura 4.2. Hidrogramas de la prueba II-1: 5%, 15 min.

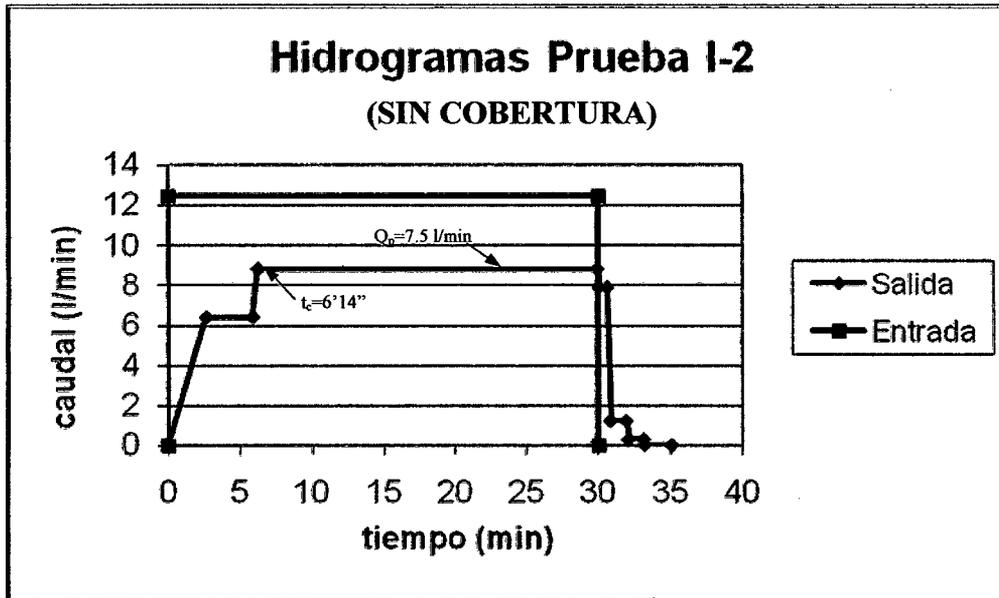


Figura 4.3. Hidrogramas de la prueba I-2: 5%,30 min.

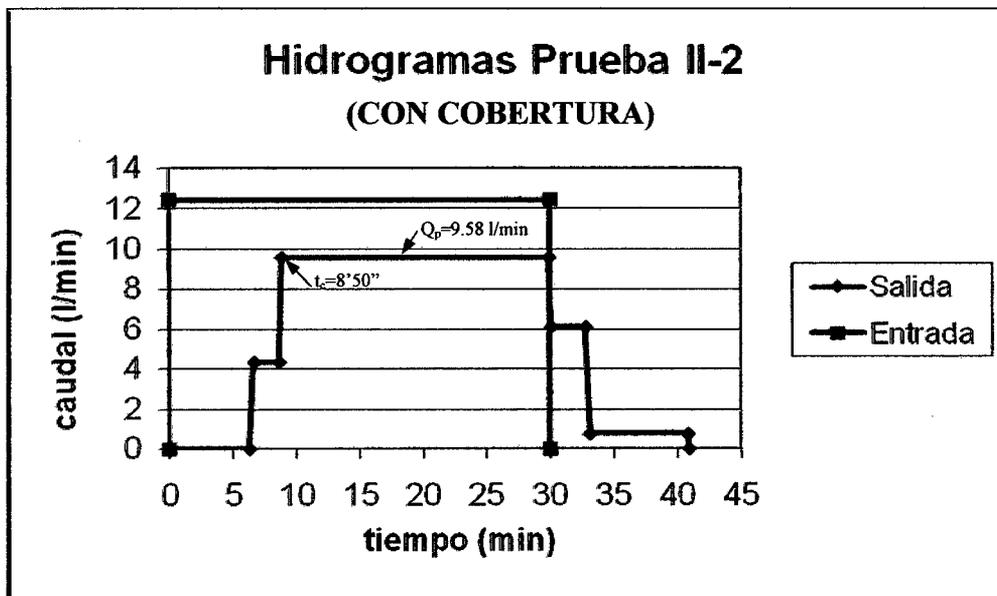


Figura 4.4. Hidrogramas de la prueba II-2: 5%,30 min.

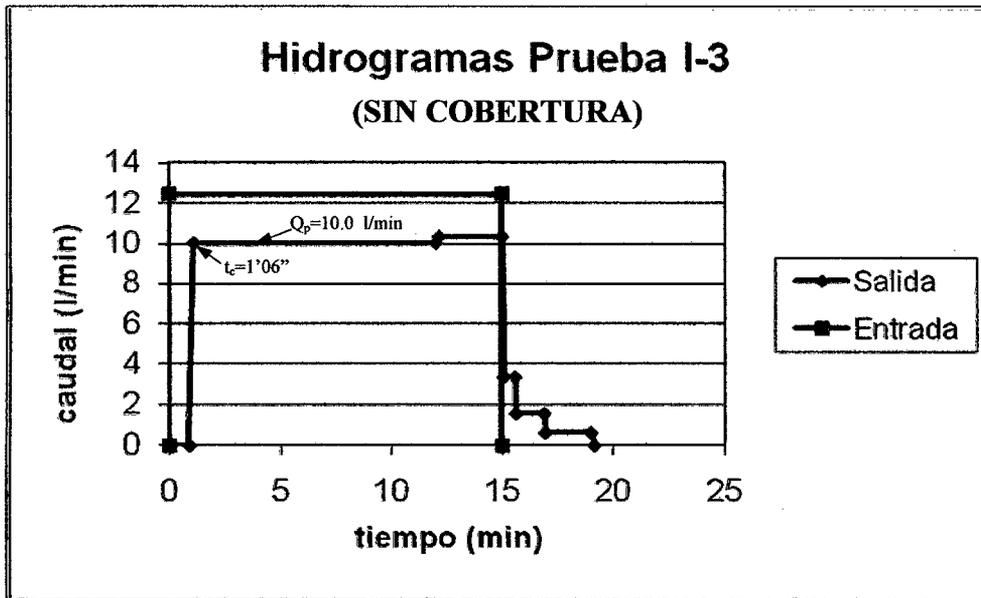


Figura 4.5. Hidrogramas de la prueba I-3: 10%, 15 min.

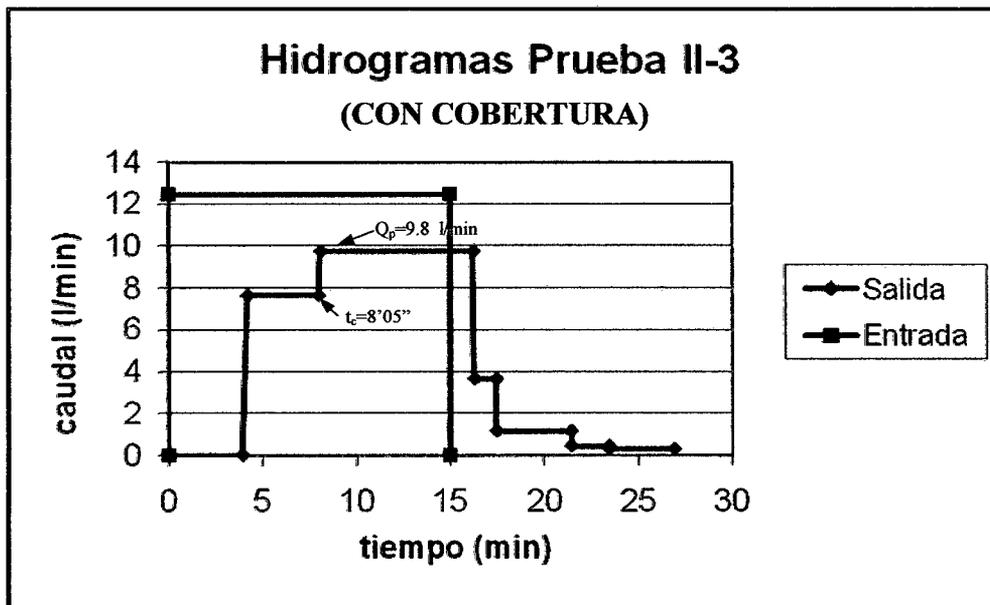


Figura 4.6. Hidrogramas de la prueba II-3: 10%, 15 min.

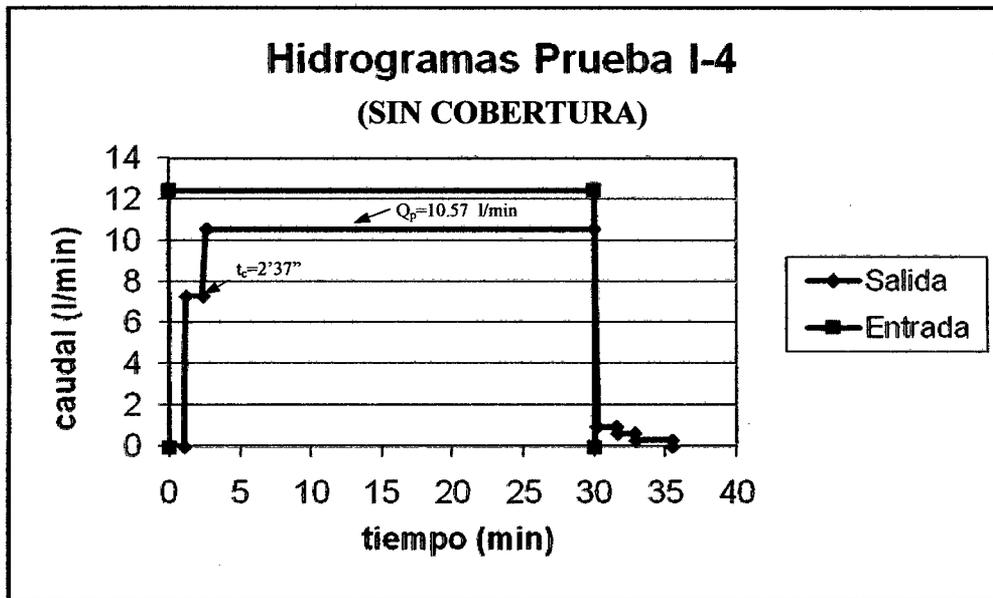


Figura 4.7. Hidrogramas de la prueba I-4: 10%,30 min.

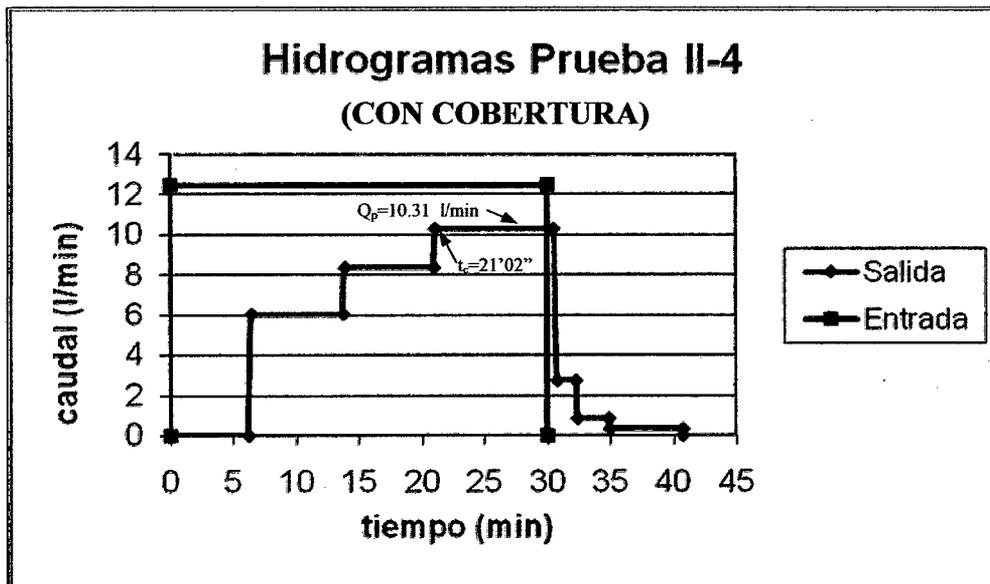


Figura 4.8. Hidrogramas de la prueba II-4: 10%,30 min.

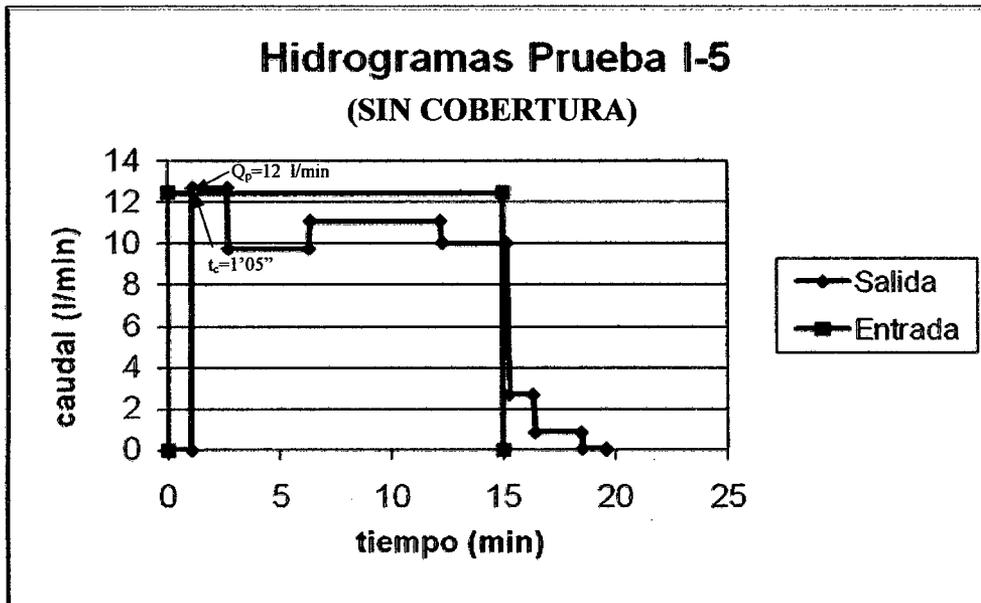


Figura 4.9. Hidrogramas de la prueba I-5: 20%, 15 min.

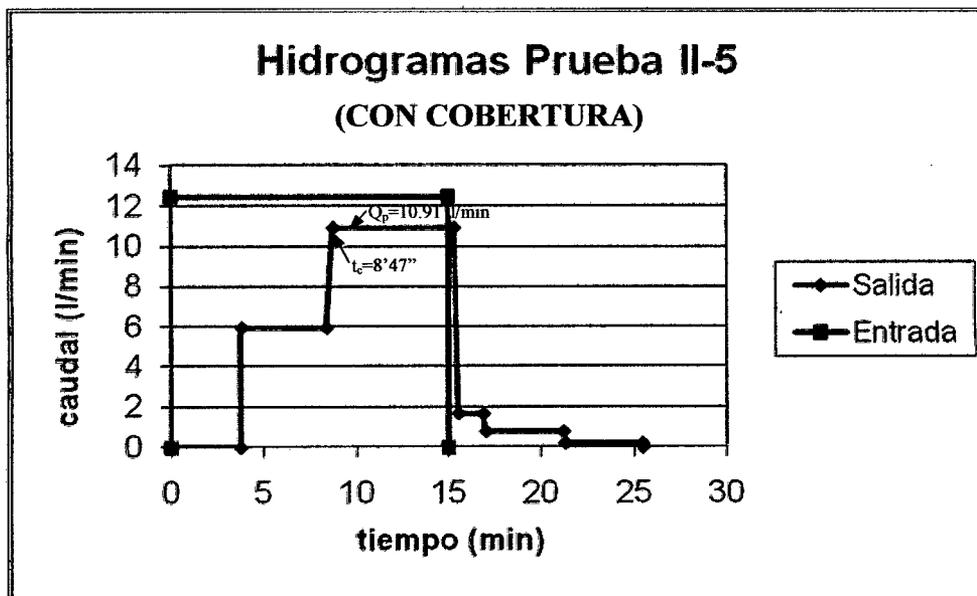


Figura 4.10. Hidrogramas de la prueba II-5: 20%, 15 min.

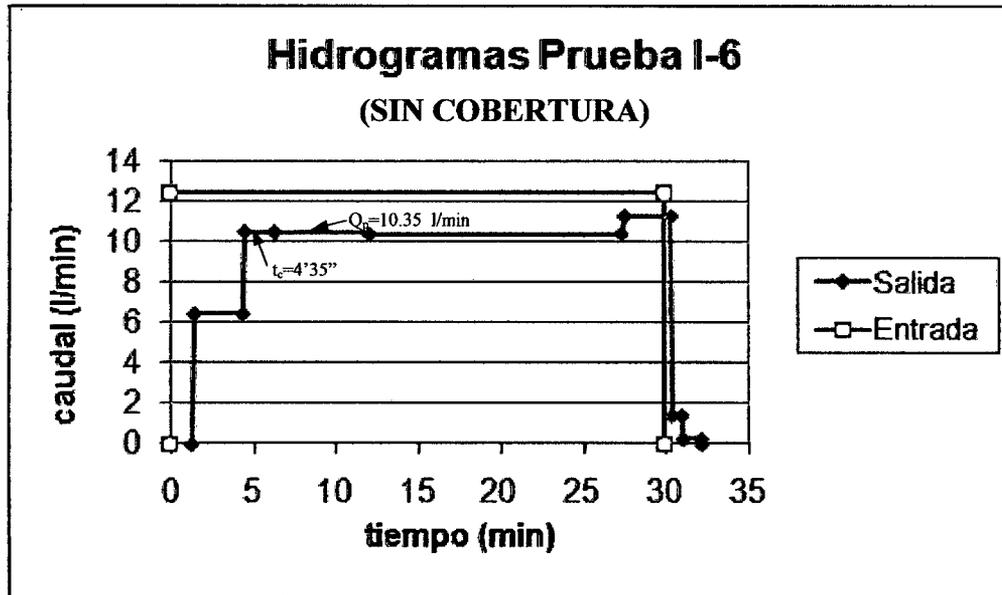


Figura 4.11. Hidrogramas de la prueba I-6: 20%,30 min.

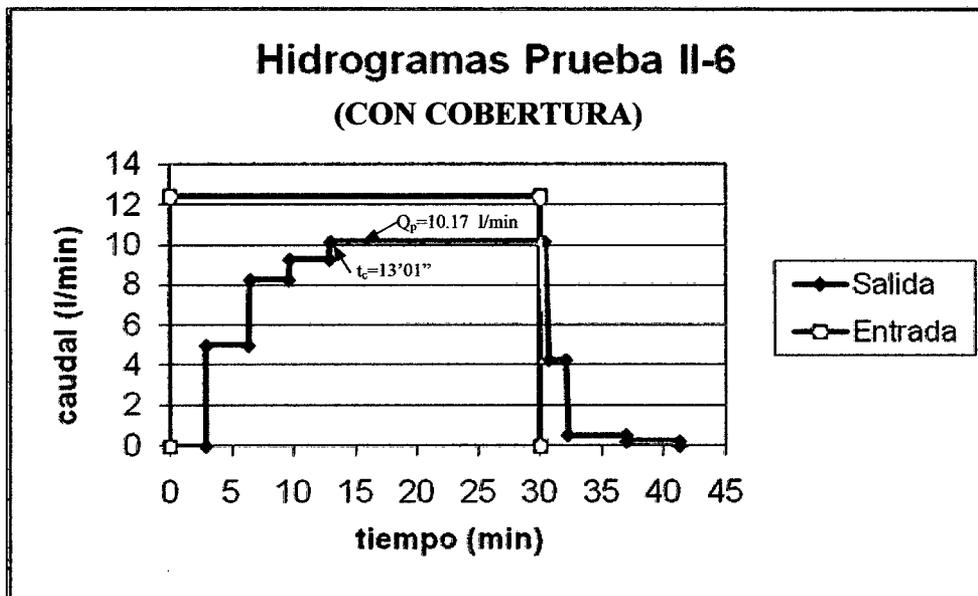


Figura 4.12. Hidrogramas de la prueba II-6: 20%,30 min.

Estos gráficos nos permiten observar interesantes patrones del comportamiento de los hidrogramas de salida en función de los parámetros que cambian durante la ejecución de los ensayos. Por ejemplo el tiempo de concentración (t_c) es

mucho mayor en la parcela que cuenta con vegetación y se acorta en taludes con mayor pendiente. Asimismo el caudal pico aumenta conforme lo hace la pendiente. Estos puntos, y otros más, se detallan en la parte final de este capítulo y en las recomendaciones y conclusiones. Esto se resume a continuación en la tabla 4.13:

Tabla 4.13. Tiempo de concentración.

FASE	PRUEBA	I (mm/h)	Pendiente (%)	Tiempo (min)	tc (min)
I (sin cobertura)	I-1	85	5	15	6'36"
	I-2	85	5	30	6'14"
	I-3	85	10	15	1'06"
	I-4	85	10	30	2'37"
	I-5	85	20	15	1'05"
	I-6	85	20	30	4'35"
II (con cobertura)	II-1	85	5	15	11'10"
	II-2	85	5	30	8'50"
	II-3	85	10	15	8'05"
	II-4	85	10	30	21'02"
	II-5	85	20	15	8'47"
	II-6	85	20	30	13'01"

□ Cálculos Hidrológicos

a) Coeficiente de Escorrentía

Haciendo uso de la fórmula racional (ecuación 4.2), se procederá a despejar el coeficiente de escorrentía (c), tal como se muestra en la ecuación 4.3.

$$Q = \frac{1}{3.6} \cdot c \cdot I \cdot A \quad (4.2) \quad , \quad c = \frac{3.6 \cdot Q}{I \cdot A} \quad (4.3)$$

Donde: Q= caudal pico en m³/s.

c= coeficiente de escorrentía (adimensional).

I= intensidad del evento hidrológico simulado en mm/h.

A= área de la cuenca en km².

Así se llega a la tabla 4.14 presentada a continuación:

Tabla 4.14. Coeficiente de escorrentía despejado de la fórmula racional.

FASE	PRUEBA	I (mm/h)	Q _p (m ³ /s)	A (km ²)	C
I (sin cobertura)	I-1	85	0.00015	8.54E-06	0.74
	I-2	85	0.00015	8.54E-06	0.73
	I-3	85	0.00017	8.54E-06	0.83
	I-4	85	0.00018	8.54E-06	0.87
	I-5	85	0.00021	8.54E-06	1
	I-6	85	0.00017	8.54E-06	0.86
II (con cobertura)	II-1	85	0.00013	8.54E-06	0.62
	II-2	85	0.00016	8.54E-06	0.79
	II-3	85	0.00016	8.54E-06	0.81
	II-4	85	0.00017	8.54E-06	0.85
	II-5	85	0.00018	8.54E-06	0.9
	II-6	85	0.00017	8.54E-06	0.84

Promedio de c: 0.82

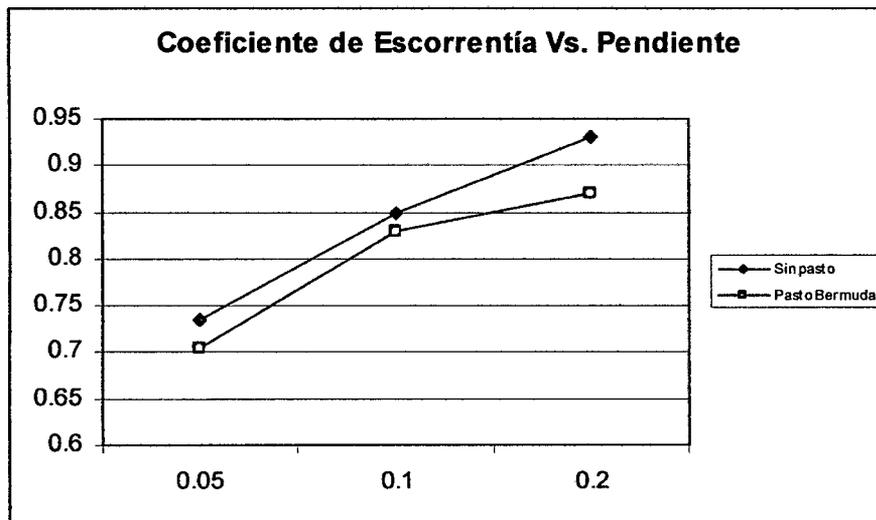


Figura 4.13. Relación entre el caudal pico Q_p (l/s) y la pendiente del terreno S (%).

Entonces, para las condiciones representadas en los experimentos ejecutados, se logra la siguiente expresión:

$$Q = \frac{1}{3.6} \cdot 0.82 \cdot I \cdot A \quad (4.4)$$

O lo que es lo mismo:

$$Q_p = 0.228 \cdot I \cdot A \quad (4.5)$$

b) Relación entre el Caudal Pico (Qp) y la pendiente del terreno (S)

De acuerdo a los anteriores gráficos podemos hallar una relación entre la pendiente del terreno y el caudal pico promedio, tal como se muestra en la figura 4.14:

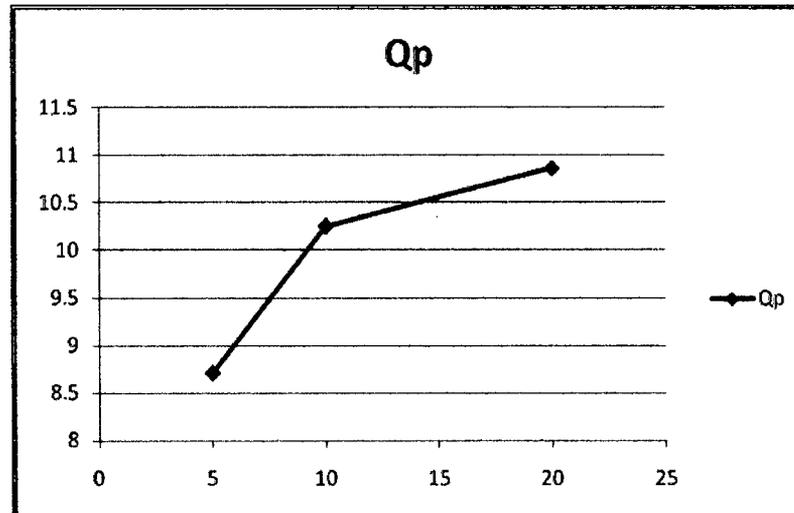


Figura 4.14. Relación entre el caudal pico Qp (l/s) y la pendiente del terreno S (%).

Como se puede evaluar la figura 4.14, el caudal máximo de salida observado en los ensayos aumenta conforme la pendiente lo hace, llegando en algunos instantes a igualar al caudal constante de entrada en los ensayos de mayor inclinación.

c) Tiempo de concentración (tc)

En este punto se hará una comparación entre los tiempos de concentración obtenidos en la matriz de pruebas y aquellos estimados por las expresiones planteadas a continuación:

$$\text{Ecuación de Kirpich } tc = 3.97 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385} \quad (4.6)$$

$$\text{Ecuación de Bransby } tc = 14.6 \cdot L \cdot S^{-0.2} \cdot A^{-0.1} \quad (4.7)$$

De esta forma obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 4.15. Comparación del t_c estimado y obtenido en las pruebas.

F	Prueba	I (mm/h)	Pendiente (%)	T (min)	Cober- tura	t_c (pruebas) (min)	t_c (Kirpich) (min)	t_c (Bramby) (min)
I	I-1	85	5	15	Ninguna	6.6	0.21	0.41
	I-2	85	5	30		6.23	0.21	0.41
	I-3	85	10	15		1.1	0.16	0.36
	I-4	85	10	30	Ninguna	2.6	0.16	0.36
	I-5	85	20	15	Ninguna	1.08	0.12	0.31
	I-6	85	20	30		4.57	0.12	0.31
II	II-1	85	5	15	Pasto	11.16	0.21	0.41
	II-2	85	5	30	Bermuda	8.83	0.21	0.41
	II-3	85	10	15	Pasto	8.08	0.16	0.36
	II-4	85	10	30	Bermuda	21	0.16	0.36
	II-5	85	20	15	Pasto	8.77	0.12	0.31
	II-6	85	20	30	Bermuda	13.01	0.12	0.31

De la tabla 4.15, se puede inferir que no existe mayor relación entre los resultados obtenidos en los ensayos de la matriz de prueba y aquellos calculados por las expresiones de Kirpich y Bransby-Williams, pues las diferencias son poco menos que abismales –se observan discrepancias entre valores de pocos segundos contra otros de 10 minutos, por ejemplo-. De esta forma se puede sugerir una revisión de dichas expresiones o una consideración del orden de las dimensiones de las cuencas en las que estas ecuaciones son aplicables.

d) Uniformidad de la Lluvia Simulada

La lluvia simulada no es completamente uniforme: en la periferia de la parcela la intensidad es menor que en el centro de la misma.

A continuación se presentan valores de intensidad en distintos puntos del área de pruebas tal como se describe:

A:	22 mm/h	J:	105 mm/h
B:	4.8 mm/h	K:	48 mm/h
C:	36 mm/h	L:	70 mm/h
D:	60 mm/h	M:	124 mm/h
E:	66 mm/h	N:	80 mm/h
F:	58 mm/h	O:	5 mm/h
G:	76 mm/h	P:	5.2 mm/h
H:	96 mm/h	Q:	7 mm/h
I:	106 mm/h		

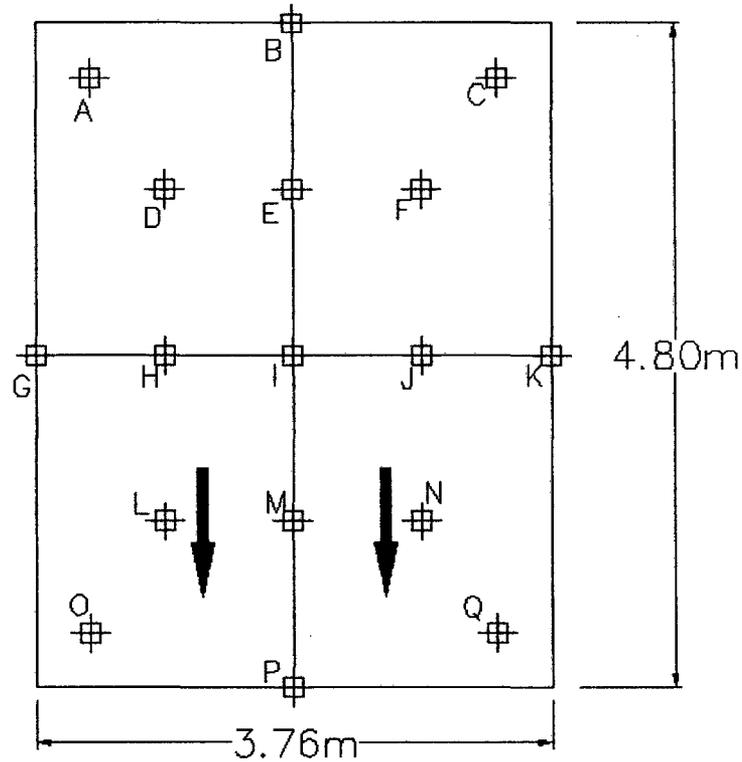


Figura 4.15. Puntos de control de la uniformidad de la lluvia (sin escala definida).

Obteniéndose las siguientes curvas isoyetas:

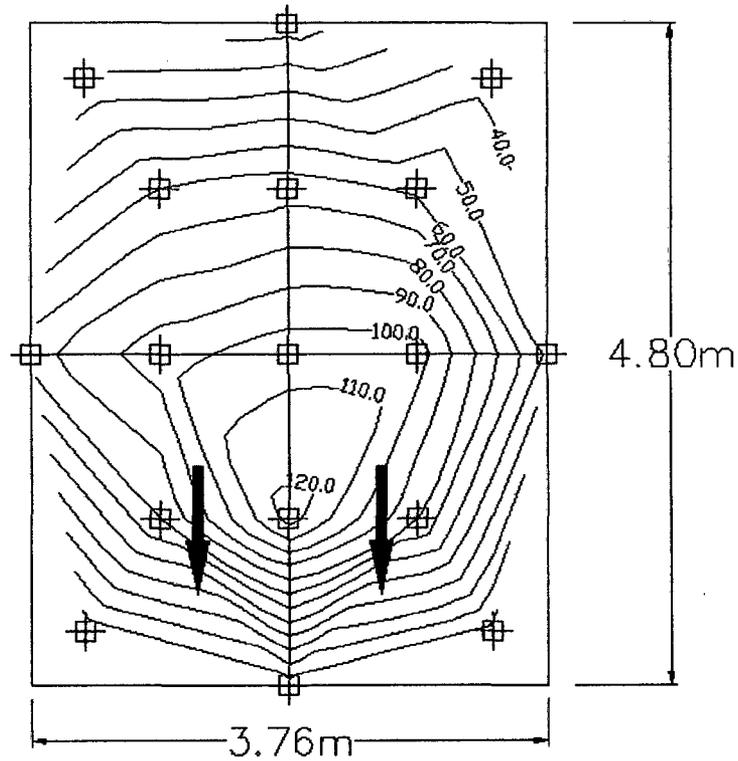


Figura 4.16. Curvas isoyetas de la parcela de pruebas (sin escala definida) representan la intensidad de la lluvia simulada en mm/h.

4.2.5. Estimación de la pérdida de suelos con el empleo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) es una expresión semi-empírica desarrollada por el Servicio de Investigación de Agricultura (ARS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). La ecuación es la que sigue:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (4.8)$$

Donde: A = suelo calculado por acre para un periodo de tormentas dado,
R = factor de precipitación,
K = erosionabilidad del suelo
L = factor de longitud de talud
S = factor de pendiente
C = factor de vegetación
P = factor de sistema de control de erosión

Tabla 4.16. Tasas de erosión calculadas haciendo uso de la USLE.

FASE	PRUEBA	K	R	LS	C	P	A (ton/ha)	A* (kg/7.8m ²)
I	I-1	0.45	49.24	0.28	0.45	1.30	3.64	2.84
	I-2	0.45	98.48	0.28	0.45	1.30	7.28	5.68
	I-3	0.45	49.24	0.72	0.45	1.30	9.36	7.30
	I-4	0.45	98.48	0.72	0.45	1.30	18.72	14.60
	I-5	0.45	49.24	1.78	0.45	1.30	23.14	18.05
	I-6	0.45	98.48	1.78	0.45	1.30	46.29	36.11
II	II-1	0.45	49.24	0.28	0.00	0.90	0.02	0.01
	II-2	0.45	98.48	0.28	0.00	0.90	0.03	0.03
	II-3	0.45	49.24	0.72	0.00	0.90	0.04	0.03
	II-4	0.45	98.48	0.72	0.00	0.90	0.09	0.07
	II-5	0.45	49.24	1.78	0.00	0.90	0.11	0.08
	II-6	0.45	98.48	1.78	0.00	0.90	0.21	0.17

*El valor de A (tasa de erosión) se ha tomado para el área de la parcela de pruebas, que es igual a 7.8 m².

Los parámetros que intervienen en esta ecuación y los pasos para calcular los valores de cada uno de ellos son descritos en el Capítulo 1 de este trabajo. En la tabla 4.16 se presentan los parámetros calculados en la matriz de pruebas así como los valores de pérdida de suelo para las condiciones simuladas en los

ensayos. De este modo se está tratando de predecir las tasas de erosión, calculadas en gabinete con la aplicación de la USLE, para compararlas con los resultados obtenidos en el laboratorio.

4.3. Análisis y discusión de datos

4.3.1. Erosión de suelo

En las siguientes líneas se hace un breve análisis de los resultados de pérdida de suelo obtenidos en los ensayos. Se ha enfocado el análisis desde la perspectiva de cada uno de aquellos factores que varían en las pruebas: tiempo, pendiente y cobertura. Al final de este subtítulo se analizará la relación entre los resultados obtenidos en campo y los calculados en gabinete empleando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, además de la calibración de la USLE respecto a los resultados de la matriz de pruebas.

□ Tiempo

Respecto al tiempo se observa que existe una relación aproximadamente lineal de la erosión respecto del tiempo. Refiriéndonos a las pruebas de 5% y 10% los resultados de pérdida de suelo se duplican al pasar de lluvias de 15 minutos a las de 30 minutos. Sin embargo en las dos últimas pruebas (las de 20%) se puede ver que esta relación no se cumple como en los otros casos: la degradación del suelo en la prueba de 30 minutos es considerablemente menor a la de 15 minutos multiplicada por dos. Esto puede encontrar explicación en el fenómeno de acorazamiento: después de haber sufrido graves pérdidas de sedimentos durante un evento hidrológico prolongado, el suelo se acoraza exponiendo solo las partículas más gruesas como arenas y gravas –pues los finos ya fueron erosionados- evitando el progreso de la erosión. La USLE estima que las tasas de erosión deben ser directamente proporcionales al tiempo, pero luego de los ensayos podemos decir que mientras mayor sea el tiempo, menor la velocidad en el avance de la erosión, por lo que el tiempo es un parámetro que eventualmente pierde importancia.

□ Pendiente

La influencia de la pendiente resulta evidente durante las pruebas. En las de 5% la formación de escorrentía tardó hasta 11 minutos, mientras que en las pruebas de máxima pendiente la escorrentía se presentó casi de inmediato. Las tasas de erosión (Kg.) también presentan grandes diferencias. Según la USLE los valores del parámetro de pendiente (LS) correspondiente al cálculo de la erosión presentan un desarrollo aproximadamente parabólico haciendo que sutiles variaciones en el cambio de pendiente induzcan montos de pérdida de suelo ampliamente mayores.



Foto 4.13. Acorazamiento.

□ Tipo de cobertura

La de la cobertura es, sin duda, la más importante de las variables observadas en los ensayos. El uso del pasto Bermuda Mirage puede representar en algunos casos una reducción en la tasa de erosión de hasta 40 000 veces. Esto demuestra ampliamente la efectividad de esta especie de pasto en el control de la erosión y en su función de protección-cohesión del terreno. La multiplicación de los factores C y P de la USLE –los que involucran el uso y tipo de vegetación–

predice que el uso de vegetación semejante a la empleada en los ensayos reduciría las tasas de erosión en doscientas veces; pero podemos decir que esta disminución es muchísimo mayor pudiendo en algunos casos anular por completo la degradación del suelo.

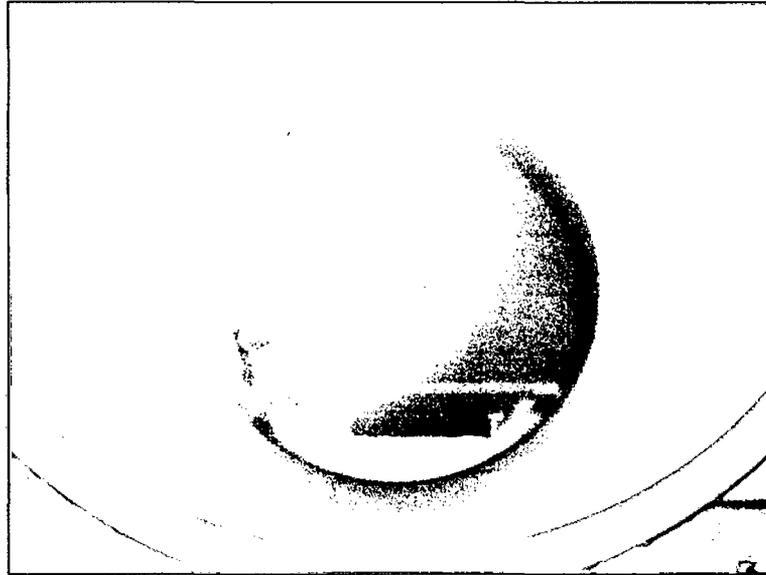


Foto 4.14. Escorrentía generada por la parcela con vegetación.

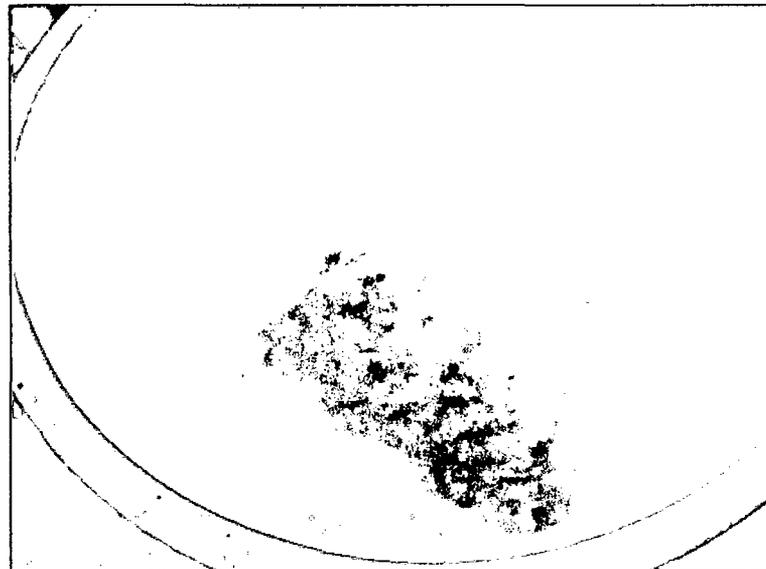


Foto 4.15. Escorrentía generada por la parcela sin vegetación.

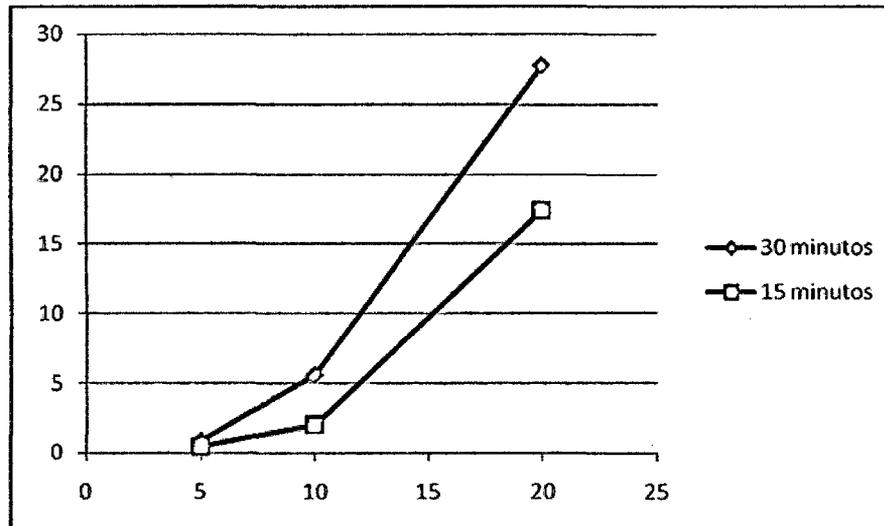


Figura 4.17. Erosión (Kg.) vs. pendiente (%) y tiempo (min.) para los ensayos sin cobertura vegetal.

□ **Relación entre los resultados obtenidos en campo y los calculados por la USLE**

Los resultados de pérdida de suelo calculados por la USLE presentan un interesante parecido con aquellos obtenidos en el Laboratorio, sobre todo las pruebas de mayor pendiente. Nótese que en la tabla 4.17 los valores de erosión en Kg. alcanzados en las pruebas I-5, II-5, I-6 e II-6 comparados con los valores obtenidos con la USLE son prácticamente los mismos o muy parecidos. De esta forma se puede hacer la siguiente comparación:

Tabla 4.17. Tasas de erosión alcanzadas en los ensayos y calculadas por la USLE.

FASE	PRUEBA	I (mm/h)	Pend. (%)	t (min)	Cobertura	Erosión USLE* (Kg)	Erosión en pruebas (Kg)
I	I-1	85	5	15	Ninguna	2.840	0.415
	I-2	85	5	30		5.680	0.886
	I-3	85	10	15	Ninguna	7.302	2.014
	I-4	85	10	30		14.605	5.611
	I-5	85	20	15		18.053	17.43
	I-6	85	20	30		36.106	27.74
II	II-1	85	5	15	Pasto	0.013	0
	II-2	85	5	30	Bermuda	0.026	0
	II-3	85	10	15	Pasto	0.034	0.001
	II-4	85	10	30	Bermuda	0.067	0.002
	II-5	85	20	15	Pasto	0.083	0.065
	II-6	85	20	30	Bermuda	0.167	0.001

*El valor de Erosión (USLE) se ha tomado en forma proporcional al área de la parcela de pruebas, que es igual a 7.8 m², para hacer a este valor comparable con la erosión de los ensayos.

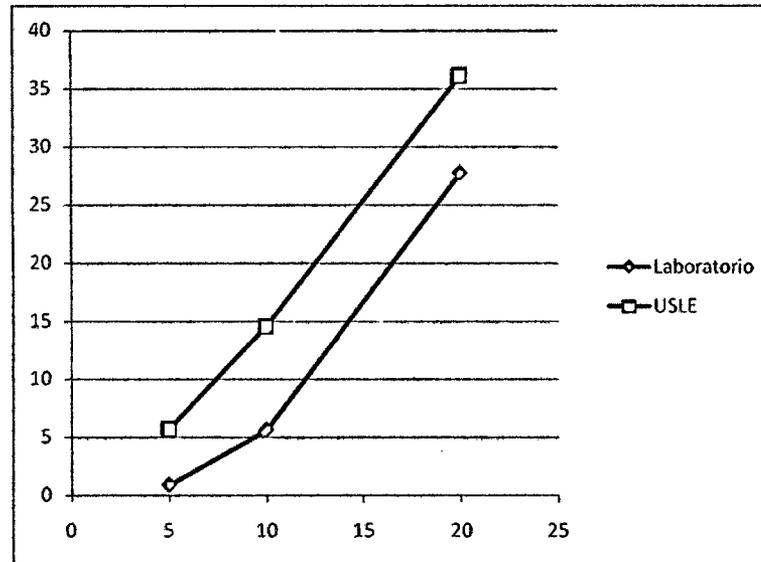


Figura 4.18. Erosión (Kg.) vs. pendiente (%) ensayos sin cobertura vegetal y de 30 min.

Por lo anterior se puede decir que la Fórmula Universal de Pérdida de Suelos, ajustada a las condiciones dadas mediante la calibración, puede ser usada sin mayores restricciones en la predicción de tasas de erosión para terrenos sin protección o con fuertes pendientes –aquellos en los que la erosión es mayor-, pero se deben tener reservas al momento de calcular la degradación de un área recubierta por pasto, pues las tasas de erosión reales suelen ser mucho menores a las calculadas por la USLE.

□ Calibración de la USLE

Como se puede advertir en los resultados de pérdida de suelo –la calculada en gabinete y aquella proveniente de los ensayos en el laboratorio-, resultaría sumamente útil hallar una correlación lineal entre los resultados obtenidos en los ensayos y aquellos logrados por la USLE para que los resultados alcanzados por ésta sean más fieles a la realidad. Para esto se hace necesario un proceso de calibración que sólo tendrá en cuenta los valores de la Fase 1 de la matriz, es decir en aquellos ítems donde los resultados del laboratorio y el gabinete resultan prácticamente proporcionales.

Relacionando las dos últimas columnas de la tabla 4.17 mediante una regresión lineal, considerando a “Erosión USLE” como el eje de las abscisas y “Erosión en pruebas” el de las ordenadas, obtenemos la siguiente relación:

$$(Erosión \text{ en pruebas}) = (Erosión \text{ USLE}) \times 0.882 - 3.42 \quad (4.9)$$

La ecuación 4.9 (expresada en Kg.) sería válida para la pequeña parcela de ensayos de 7.8 m² de extensión. Pero si lo que deseamos es calibrar la USLE (ton/ha) debemos proceder a la escala correspondiente, por lo que obtenemos la siguiente ecuación USLE calibrada de acuerdo a nuestras necesidades:

$$A = 0.882 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P - 3.43 \text{ (ton/ha)} \quad (4.10)$$

Haciendo uso de esta USLE calibrada, se obtienen resultados mucho más parecidos a los conseguidos en los ensayos, tal como se describe en la tabla 4.18:

Tabla 4.18. Tasas de erosión alcanzadas en los ensayos y calculadas por la USLE calibrada.

FASE	PRUEBA	Intensidad (mm/h)	Pend. (%)	Tiempo (min)	Cobertura	Erosión calculada (Kg)	Erosión obtenida en pruebas (Kg.)
I	I-1	85	5	15		-0.91	0.415
	I-2	85	5	30	Ninguna	1.59	0.886
	I-3	85	10	15		3.02	2.014
	I-4	85	10	30	Ninguna	9.46	5.611
	I-5	85	20	15		12.50	17.43
	I-6	85	20	30	Ninguna	28.43	27.74

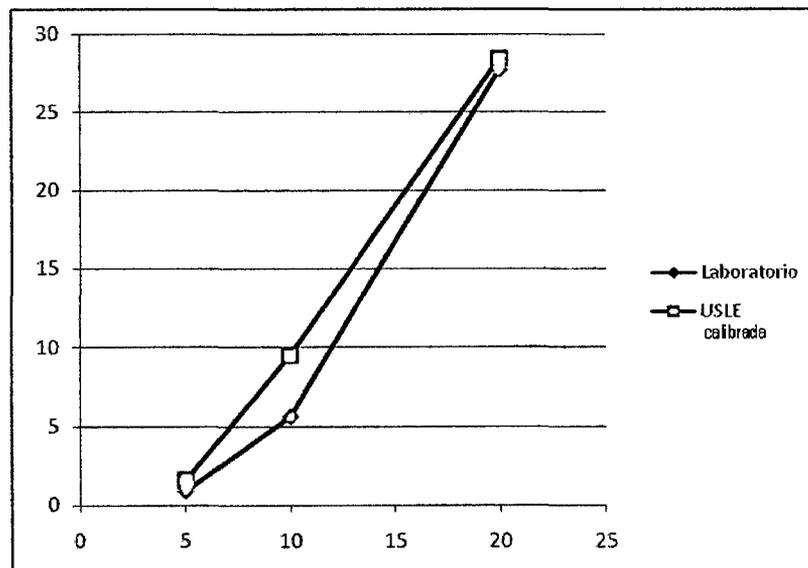


Figura 4.19. Erosión (Kg.) vs. pendiente (%) ensayos sin cobertura vegetal y de 30 min con la USLE calibrada.

En la figura 4.19 se puede advertir que los valores conseguidos por la USLE después de la calibración son mucho más cercanos a los valores obtenidos en el laboratorio que aquellos obtenidos con la USLE original (comparar con la figura 4.18)

La ecuación 4.10 puede resultar sumamente útil pero presenta la desventaja de poseer un término independiente producto inherente de la regresión lineal (el valor de 3.42) . Si lo que deseamos es una ecuación USLE calibrada semejante a la ecuación 4.10 pero prescindiendo de dicho término, para facilitar los cálculos y mejorar la presentación, se puede recurrir al promedio ponderado de las relaciones existentes entre la erosión conseguida en el laboratorio y la calculada por la USLE. El resultado de esta ponderación es una relación proporcional entre ambas magnitudes expresada por la ecuación 4.11. La tabla 4.19 muestra la forma en la que se obtuvo esta relación considerando que se trabajan tasas de erosión en un área de 7.8 m².

Tabla 4.19. Calibración alterna de la USLE.

FASE	PRUEBA	I	S	T	Cob.	Erosión USLE (Kg)(E1)	Erosión obtenida en pruebas (Kg.) (E2)	$(E2/E1) \cdot (E1+E2)$ Prom (E) (coef.)
		(mm/h)	(%)	(min)				
I	I-1	85	5	15	Ninguna	2.840	0.415	0.021
	I-2	85	5	30		5.680	0.886	0.044
	I-3	85	10	15		7.302	2.014	0.111
	I-4	85	10	30		14.605	5.611	0.336
	I-5	85	20	15		18.053	17.43	1.482
	I-6	85	20	30		36.106	27.74	2.122
Promedio coef								0.686

Por lo tanto llegamos a la siguiente ecuación alterna USLE calibrada:

$$A = 0.69 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \text{ (ton/ha)} \quad (4.11)$$

Esta ecuación no proporciona resultados tan cercanos a la realidad como la ecuación 4.9, pero si lo bastante próximos como para tomarla en consideración.

4.3.2. Hidrogramas

Al igual que en la erosión, se analizarán los hidrogramas tomando en consideración aquellos factores que varían de ensayo a ensayo.

□ **Tiempo**

El tiempo de duración de las lluvias simuladas no influye más allá de lo esperado: prolonga la duración de escorrentía y entre las pruebas de 15 y las de 30 minutos el volumen final del agua se duplica aproximadamente.

□ **Pendiente**

Se puede decir que la pendiente del terreno juega un papel importante en el caudal máximo mostrado por cada hidrograma: de 8.5 a 9 l/s para 5%, de 10 a 11 l/s para 10% y de hasta más de 12 l/s para 20 %. Asimismo el tiempo de evacuación del agua después de finalizada la lluvia disminuye con el aumento de la pendiente, de forma que las parcelas con 5% de pendiente pueden seguir generando escorrentía por muchos minutos más.

□ **Tipo de cobertura**

Al inicio del evento el desarrollo de la escorrentía en la parcela con pasto es notablemente lento respecto al presentado por la parcela sin protección. De esa forma los hidrogramas de la parcela sin protección alcanzan los máximos caudales en tiempos muy cortos. Conforme transcurre el tiempo el caudal de la parcela sin pasto se mantiene constante mientras que el otro aumenta, así que después de unos minutos lo alcanza y se mantienen aproximadamente iguales hasta que el evento finaliza. Cuando esto ocurre, la parcela sin pasto inmediatamente empieza a mostrar caudales menores hasta que finalmente se seca. Por el contrario, la parcela con pasto sigue generando escorrentía con mismo caudal por algunos minutos para luego menguar lentamente y terminar de fluir mucho después que la otra parcela.

CONCLUSIONES

- La presencia de la cobertura vegetal –en este caso pasto Bermuda Mirage- puede representar una reducción en la tasa de erosión de hasta 40 000 veces y en algunos casos anularla por completo. Esto demuestra fehacientemente la efectividad de esta especie de pasto en el control de la erosión y en su función de protección del terreno hasta pendientes del 20 %. Por el contrario la parcela sin pasto se ve sometida a severos procesos de erosión en todas las pruebas que se realizaron siendo los casos más notorios aquellos en los que la pendiente era mayor.
- El suelo erosionado en las pruebas de menor pendiente está constituido casi en su totalidad por finos. En los ensayos de mayor pendiente se observa cada vez mayor presencia de arena hasta representar gran parte del sedimento erosionado. Este hecho – comprobado en los estudios de granulometría posteriormente- se debe a que a medida que la capacidad de erosión de la lluvia se incrementa, las partículas arrastradas por la misma son cada vez de mayor tamaño.
- En la primera siembra se observó que el crecimiento del pasto Bermuda no llegó al 5% del total del terreno estudiado. Esto se debió sin duda a la escasa fertilidad del terreno seleccionado y la casi nula presencia de materia orgánica. Por otro lado, la segunda siembra de semillas de pasto Bermuda –en la que se hizo uso de fertilizantes- fue exitosa cubriendo la totalidad del terreno sembrado.
- En los experimentos con mayores tasas de erosión se comprobó la ocurrencia del fenómeno de acorazamiento, que consiste en la protección que el terreno genera con las partículas más gruesas (arenas y gravas) cuando ya ha perdido una gran cantidad de partículas finas. Esto es particularmente claro en las pruebas de máxima pendiente y tiempo. El acorazamiento es un mecanismo que la naturaleza despliega cuando un terreno sufre las agresiones de lluvias demasiado intensas y prolongadas.

- El comportamiento hidrológico de las parcelas –enfocadas como si fueran dos pequeñas cuencas- presenta el siguiente patrón:
 - Parcela sin vegetación. Cuando la lluvia artificial se inicia, la parcela sin vegetación alcanza el caudal pico de escorrentía con rapidez, pues ésta se genera de inmediato sobre la superficie de la parcela. El caudal pico se mantiene hasta que el evento hidrológico finaliza, entonces el caudal disminuye de inmediato hasta secarse con celeridad.
 - Parcela con pasto. Al momento de iniciarse la prueba la parcela con vegetación genera escorrentía algunos minutos después que la otra parcela. Luego el caudal se incrementa poco a poco hasta alcanzar el de la parcela sin protección, manteniéndose constantes y aproximadamente iguales hasta que el evento termina. Cuando esto ocurre el caudal de escorrentía de la parcela con vegetación se mantiene aproximadamente constante por algunos minutos para disminuir lentamente y dejar de fluir algunos minutos después que la parcela sin pasto.Aproximadamente el mismo patrón se ve en todas las pruebas, con las variaciones propias de las pendientes y los tiempos de exposición. Entonces se puede afirmar que la presencia de pasto en estas cuencas modifica el comportamiento de su hidrología resultando evidente el efecto “esponja” de las cuencas con vegetación: retención del agua en temporada de lluvias y descarga controlada en época de sequías.
- El coeficiente de escorrentía se ve influenciado por la pendiente -crece a medida que la pendiente lo hace variando de 0.7 a 0.86 para taludes de 5 y 20% respectivamente- y la cobertura vegetal –la presencia de pasto produce una leve caída en este coeficiente, cercana al 10%.
- El tiempo de concentración experimenta variaciones en el sentido inverso: disminuye con el aumento de la pendiente y la presencia de cobertura extiende el tiempo de concentración.
- La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos fue capaz de predecir la pérdida de suelos en las pruebas de mayores tasas de erosión con razonable proximidad. Dicha ecuación puede ser calibrada y mejorada con la finalidad de obtener mejores resultados a partir de ella. Este

proceso de calibración se puede observar en el Capítulo 4 con la obtención de un coeficiente adimensional estimado con los resultados obtenidos en el laboratorio y aquellos estimados gracias al uso del USLE. Se debe tener en cuenta que este ensayo es a pequeña escala y en condiciones controladas.

- La lluvia no es completamente uniforme pues la intensidad, como era de esperarse, es mayor en la parte central de la parcela que en la periferia, hecho que fue comprobado con el uso de un pluviómetro en diferentes puntos del área de pruebas. Esta inexactitud en la representación de la lluvia simulada es producto del uso de una sola boquilla de aspersión.
- La lluvia no cubre con exactitud el área total de la parcela. Una pequeña parte del agua se pierde en las áreas laterales de la parcela cayendo fuera de la misma. Este volumen de agua, aunque mínimo, debe ser cuantificado o calculado para los posteriores cálculos.
- El uso del floculante Sedipur fue sumamente útil. Su acción permitió la recolección de los sedimentos erosionados con gran facilidad y poquísimas pérdidas.
- La estructura diseñada y construida en acero, concreto y fibrocemento no mostró deformaciones ni fisuras. El sistema de cambio de pendiente es sencillo y seguro de usar pues no es necesario mayor esfuerzo para variar la pendiente.
- Las planchas de fibrocemento empleadas en este trabajo de investigación funcionan satisfactoriamente bajo requerimientos de flexión, pues en condiciones normales este material presenta una respuesta óptima. Sin embargo, durante las pruebas se observó que las planchas se humedecieron a pesar de haber sido protegidas con plástico. Este hecho no es deseable pues, eventualmente, la humedad perjudica el desempeño del fibrocemento.

Se observó que la medición de niveles en la cuadrícula de la parcela presenta un inconveniente: es sumamente difícil determinar el nivel exacto del terreno recién sometido a la aspersión, pues la mira –instrumento de medición de niveles– deforma el terreno con sorprendente facilidad. Es por ello que esta forma de determinar la pérdida de suelos no resulta confiable.

RECOMENDACIONES

- Es menester de todo investigador que pretenda sembrar una especie vegetal en el modelo verificar la fertilidad del terreno estudiado, así como los requerimientos de la especie. La escasa fertilidad del suelo empleado puede dar lugar a intentos fallidos de siembra. Asimismo, es muy recomendable proteger con una malla a las semillas recién sembradas de las aves que habitan en los alrededores del Laboratorio.

- Se recomienda a futuros investigadores contemplar las posibilidades de realizar trabajos de investigación en el Modelo de simulación de lluvias pues sus características lo hacen propicio para la investigación en diversos tópicos relacionados con la hidrología, hidráulica y el control de erosión. Se puede investigar, por ejemplo, el efecto de la lluvia sobre diversos tipos de superficie en condiciones hidrológicas cambiantes, la estimación por calibración de diferentes expresiones relacionadas hidrológicas –coeficientes de escorrentía por ejemplo- e hidráulicas para adaptar dichas fórmulas a nuestras necesidades y condiciones. Las posibilidades de investigación son ilimitadas.

- En caso sea necesario, se recomienda a los posteriores investigadores evaluar la posibilidad de diseñar un sistema de elevación que permita el uso de la parcela de pruebas con mayores pendientes sin exponer al modelo a una situación de inestabilidad. El actual sistema tiene limitaciones y sólo nos permite un rango de pruebas de 0% hasta 25%, pero con un sistema de elevación más seguro, se pueden alcanzar pendientes de hasta 40%.

- Es importante considerar la instalación de más de una boquilla aspersora. El uso de una sola boquilla tiene ventajas tales como la facilidad de uso y el menor costo, pero también presenta la desventaja de generar una intensidad poco uniforme. Por otro lado el uso de varias boquillas puede mostrar problemas de traslape pero también lluvias más uniformes y controlables. Posteriores tesis pueden proponer otras formas de generar la lluvia modificando el sistema existente.

- Los futuros tesisistas pueden evaluar la posibilidad de instalar en la boquilla aspersora un PLC (Programmable Logic Controller), el cual es un accesorio electrónico con infinidad de usos, que facilitaría la difusión de un chorro intermitente de pulsaciones controlables que permitiría la simulación de lluvias con intensidades variables.
- Se recomienda hacer uso, para ulteriores investigaciones, de vertederos en la salida de cada parcela, con la finalidad de poder realizar lecturas del caudal de escorrentía que nos permitan tener redundancia respecto a la lectura de este parámetro.
- Se recomienda que durante el uso del equipo, el operador use accesorios de seguridad tales como cascos, guantes y botas. El equipo ha sido diseñado para soportar enormes cargas –de hecho mucho mayores que las que de resistir en la práctica – y teóricamente no debe fallar, pero al ser un aparato de construcción inédita no es posible saber con certeza cuál será su respuesta a determinadas condiciones extremas de carga, por lo que es necesario siempre operar el equipo con todo cuidado y responsabilidad.
- En muchos casos las parcelas pueden presentar problemas de filtraciones o fugas. Es necesario evitar y/o medir estas pérdidas de agua.
- Se recomienda usar geomembranas para proteger las planchas de fibrocemento de la humedad. Su respuesta es, sin duda, superior a la de los plásticos empleados aunque su disponibilidad es mucho más limitada. Sin embargo no es difícil conseguir donaciones de empresas que producen o comercializan estos productos.
- Si se desea realizar mediciones en las variaciones de niveles del terreno por la acción erosiva de las lluvias, es necesario que el investigador verifique la exactitud del equipo topográfico a ser utilizado para obtener lecturas confiables.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Institute of Steel Construction. (2005) Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois. EEUU.
2. Arias, Dashiell. (2006) Análisis de Técnicas de Bioingeniería para Control de la Erosión Hídrica en Taludes con la Gramínea Kikuyo. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. Perú.
3. Bennett, J.P. (1974) Concepts of mathematical modeling of sediment yield. *Water Resources Research* 10(3):485-492.
4. Blanquies, J. (2003). The Design and Construction of a Rainfall Simulator. California State University, Sacramento. California. EEUU.
5. Bras, Rafael. (1990) Hydrology. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, Massachusetts. EEUU.
6. Bubenzer G.D. (1979) Inventory of Rainfall Simulators. Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop. Tucson, Arizona. Department of Agriculture Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals. ARM-W 10/July 1979.
7. Chepil, W. S. (1945) Dynamics of Wind Erosion: I. Nature of Movement of soil by wind. *Soil Science* 60: 305-320.
8. Chow, V. T. Hidrología Aplicada. (1994). Mc.Graw-Hill. Santa_Fe de Bogota. Colombia.
9. De La Cruz, Luis Alberto. (2005) Uso de la Bioingeniería de Suelos para el Control de Erosión Hídrica en Taludes. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima. Perú.
10. Eagleson, P. S. (1970) Dynamic Hydrology. New York: Mc Graw-Hill.

11. Eigel, J. D., y Moore, I. D. 1983. A simplified technique for measuring raindrop size and distribution. Transactions of the ASAE:1079-1084
12. Engelund, F., y Hansen, E. (1967) A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams, Teknisk Forlag, Copenhagen, 62 pp.
13. Fair, G.M., y Geyer, J.C. (1954) Water Supply and Wastewater Disposal. John Wiley y Sons, New York, 973 pp.
14. Gary, D. H. y Leiser A. T. (1982) Biotechnical Slope Protection and Erosion Control. New York: Van Nostrand Reinhold.
15. Georgakakos, K. P., y Bras, R. L. (1982) "A Precipitation Model and Its Use in Real-Time River Flow Forecasting." Cambridge, Mass.: MIT Department of Civil Engineering, Ralph M. Parsons Laboratory. (Technical Report no. 286.)
16. Georgakakos, K. P., y Bras, R. L. (1984 a) "A Hydrologically Useful Station Precipitation Model: 1, Formulation." Water Resources Res. 20(11): 1585-1596.
17. Georgakakos, K. P., y Bras, R. L. (1984 b) "A Hydrologically Useful Station Precipitation Model: 2, Case Studies." Water Resources Res. 20(11): 1597-1611.
18. Goldman S. J., K. Jackson, y Bursztynsky, T. A. (1986) Erosion and Sediment Control Handbook. New York: Mc Gaw-Hill.
19. Govers, G. (1990) Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. Erosion, Transport and Deposition Processes (Proceedings of the Jerusalem Workshop, March-April 1987). IASH Publicación no. 189, pp. 45-63
20. Gray, Donald; Sotir, Robin. (1996). Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control. 1^{era} Edición. John Wiley & Sons, INC. New York. EEUU.

21. Grierson, I. T. y Oades, J.M. 1977. A rainfall simulator for field studies of run-off and soil erosion. *Agricultural Engineering Res.* 22:37-44
22. Gunn, K. L. S., y Marshall, J. S. (1958) "The Distribution with Size of Aggregate Snowflakes." *J. Meteorol.* 15: 452-461.
23. Hutchinson, J. N. (1978). Assessment of the effectiveness of corrective measurements in relation to geologic conditions and type of slope movement. *Bulletin at the International Association of Engineering Geologists* 16: 131-155.
24. Israelson, E. (1983). Erosion Control during highway construction- Manual on principles and practices. Transportation Research Program Report No. 221, NAS-NRC, Transportation Research Board, Washington, DC.
25. Larson, L. W., y Peck, E. L. (1974) "Accuracy of Precipitation Measurements for Hydrologic Modeling." *Water Resources Res.* 10(4): 857-863.
26. Laws, J. O., 1941. Measurements of fall velocity of water drops and raindrops. *Transactions of American Geophysics. Union* 22:709-721.
27. Laws, J. O., y Parsons, D.A., 1943. The relationship of raindrop-size to Intensity. *Transaction of American Geophysics. Union* 24:452-459.
28. Lintz, T., y Simonett, D. S. (1976) *Remote Sensing of Environment.* Reading, Mass.: Addison-Wesley.
29. López, C. G. y Trillo, G. LL. (1999). *Manual de estabilización y revegetación de taludes.* López Jimeno. Mostoles. Madrid.
30. Marshall, J. S. y Palmer, W. McK. (1984) "The distribution of Raindrop with Size." *J. Meteorol.* 5: 165-166.
31. Mason, B. J. (1971) *The Physics of Clouds.* 2nd ed. Oxford: Clarendon Press.

32. McCool, D. K. 1979. Regional differences in rainfall characteristics and their influence on rainfall simulator design. Pages 17- in Proceedings of the Rainfall Simulator Workshop, Tucson Arizona, March 7-9, 1979. U.S. Department of Agriculture Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals. ARM-W-10/July 1979.
33. Meyer, L.D. (1979). Methods for Attaining Desired Rainfall Characteristics in Rainfall. Proceeding of the Rainfall Simulator Workshop. Tucson, Arizona. Department of Agriculture Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals. ARM-W 10/July 1979. pp.35-45.
34. Meyer, L. D. y Harmon, W. C. 1979. Multiple- intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 22:100-103.
35. Meyer, L.D., and Wischmeier, W.H. (1969) Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 12(6):754-762.
36. Miller, W. P. 1987. A solenoid-operated, variable intensity rainfall simulator. Soil Science Society of America Journal 51:832-834.
37. Peck, R. (1967). Stability of Natural Slopes. Journal of Geotechnical Engineering (ASCE) 93(4): 437-451.
38. Pruppacher, H. R., y Klett, J. D. (1978) Microphysics of Clouds and Precipitation. Boston: D. Reidel.
39. Shields, F. D. y Gray, D. H. (1993). Effects of woody vegetation on the structural integrity of sandy levees. Water Resources Bulletin 28 (5): 917-931.
40. Schuster, R. L. (1992). Recent advances in slope stabilization. Keynote paper, Session G.3 (Stabilization and Remedial Works), Proceedings, 6th Intl. Conference on Landslides, Christchurch, New Zealand, Feb. 10-14.

41. Suarez, J. (2001). Control de Erosión en Zonas Tropicales.. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga. Colombia.
42. U.S.D.A., SOIL CONSERVATION SERVICE. (1978). Predicting rainfall erosion losses.- A guide to conservation planning, Agriculture Handbook núm.537, Washington D.C.
43. Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. In: "Landslide and Engineering Practice," editado por Eckel, Highway Research Board Special Report No. 29, NAS-NRC, Washington, D., pp 20-47.
44. Varnes, D. J. (1978). Slope movements types and processes. En: "Landslides, Analysis and Control," editado por R. L. Schuster y R. J. Krizek, Transportation Research Board Special Report No. 176, NAS-NRC, Washington, DC., pp. 11-33.
45. Wilcox, Bradford; Wood, Karl; Tromble, John; Ward, Timothy.(1986). A Hand-Portable Single Nozzle Rainfall Simulator Designed for Use on Steep Slopes. Journal of Range Management. July ,1986. pp.376-377.
46. Zaruba, Q. y Mencl, V. (1969). Landslides and Their Control, New York: Elsevier, y Prague: Academia.

ANEXO A

Predicciones de la Estabilidad de Taludes

A. Predicciones de la Estabilidad de Taludes

1. Planteamientos del Análisis

Existen dos planteamientos básicos para predecir la estabilidad de taludes: (1) análisis del equilibrio límite, y (2) análisis de la deformación. La mayoría de los métodos en la actualidad se basan en la primera categoría. Explícitamente, los métodos de equilibrio límite toman en cuenta los principales factores que afectan el esfuerzo de corte y la resistencia al corte. Estos métodos son más sencillos de aplicar que aquellos que se basan en el análisis de deformación.

2. Análisis del Equilibrio Límite

El análisis del equilibrio límite es usado para determinar el factor de seguridad para un talud determinado. También puede ser empleado para determinar el efecto de la variación de uno o más parámetros sobre la estabilidad. Un conjunto de métodos y procedimientos basados en los principios del equilibrio límite ha sido desarrollado para este propósito. Los siguientes principios son comunes a todos los métodos de análisis de equilibrio:

- Se Propone una Superficie o Mecanismo de Falla.- En el caso más simple, se asumen taludes idealizados para fallar a lo largo de superficies de deslizamiento planas o circulares, como se muestra en la figura A.1. Superficies de falla más complejas también pueden ser propuestas y analizadas cuando los taludes no son uniformes.
- La Resistencia al Corte Requerida para Equilibrar la Masa de Falla es Calculada por medios Estáticos.- La masa potencial de falla es asumida en un estado de "equilibrio límite", y la resistencia al corte del suelo o roca en la masa de falla es liberada a lo largo de la superficie de deslizamiento.
- Una vez Calculada la Resistencia al Corte Requerida para el Equilibrio, se Compara con la Resistencia al Corte Disponible.- La comparación se hace en términos del factor de seguridad, que generalmente se define como el factor por el cual el parámetro de la resistencia al corte debe ser reducido con la finalidad de mantener al talud en un estado de equilibrio límite a lo largo de una superficie de deslizamiento.

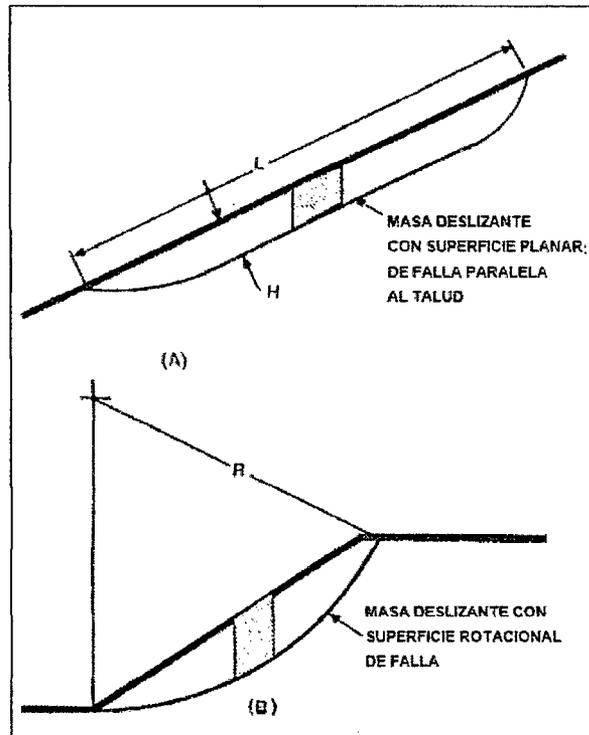


Figura A.1. Mecanismos o modelos de falla de taludes para análisis de estabilidad (a) Traslacional, modelo de "talud infinito". (b) Rotacional, modelo de arco circular. (Fuente: Gray y Sotir, 1996.)

- El Mecanismo o Superficie de Falla con el Factor de Seguridad más bajo se obtiene por medio de iteraciones.- La superficie con el menor factor de seguridad es la crítica de deslizamiento. Si la localización de la superficie de deslizamiento está predeterminada o limitada por control estratigráfico, otros ensayos suelen ser innecesarios.

Los requerimientos esenciales para realizar un análisis de estabilidad de taludes son los siguientes:

- Una detallada descripción de la geometría del talud.
- Propiedades confiables del suelo (c , ϕ , γ).
- Correcta definición de las cargas externas; dígame sobrecarga, líneas de ruedas y cargas sísmicas.
- Correcta descripción de la hidrología del talud, es decir, nivel freático y condiciones de filtración.
- Correcto método de análisis.

3. Parámetros de la Resistencia al Corte

La determinación del factor de seguridad por los métodos de equilibrio límite requiere de una estimación de la resistencia al corte que puede ser liberada a lo

largo de una superficie de falla asumida. La resistencia al corte en suelos o rocas no consolidadas es dada por el criterio de falla de Coulumb:

$$s = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{A.1})$$

Donde: s = resistencia al corte del material
 σ = esfuerzo normal sobre la superficie de falla
 ϕ = ángulo de fricción interna
 c = cohesión

El ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c) son conocidos como los parámetros de la resistencia al corte. Ellos pueden ser determinados a través de diversas pruebas de laboratorio sobre muestras de suelo, o alternativamente calculados desde análisis a porciones de taludes que ya fallaron, asumiendo un factor de seguridad igual a la unidad.

Un aspecto importante en el análisis es decidir si se emplea un esfuerzo total o efectivo. Esta decisión determina qué tipo de parámetros de resistencia al corte deben ser empleados en el análisis. Las reglas generales para seleccionar el apropiado tipo de parámetros son discutidas a continuación y también son presentados en la tabla A.1 para taludes arenosos.

Análisis de Esfuerzo Total: Un análisis de esfuerzo total usando parámetros de resistencia al corte sin drenar (c, ϕ) está limitado a taludes donde la presión de poros es gobernada por cambios totales del esfuerzo por agentes externos en los cuales ha transcurrido un tiempo insuficiente para disipar la presión de poros.

Análisis del Esfuerzo Efectivo: Cuando la presión de poros es gobernada por condiciones de infiltración estables, o si se considera estabilidad para el largo plazo, el análisis debe ser realizado considerando los parámetros del esfuerzo efectivo. Esta es la condición usual tanto en taludes de suelo como en roca. Todos los rellenos o cortes permanentes deben ser analizados en las condiciones de largo plazo para ver si estas condiciones controlan el diseño (tabla A.1). Algunas arenas agrietadas o fisuradas responden al drenaje tan rápidamente que deberían ser analizadas en términos del esfuerzo efectivo sin importar el tiempo de carga o descarga. Los parámetros de la resistencia efectiva al corte (c', ϕ') pueden ser obtenidos por medio de pruebas triaxiales

drenadas o pruebas con mediciones de presión de poros sobre muestras sin drenar (Bowles, 1970).

Tabla A.1. Parámetros de Resistencia al Corte para Problemas de Estabilidad de Taludes Arenosos

Tipo de Arena	Cortes		Taludes Naturales	
	Corto Plazo	Largo Plazo	En orden de Los 100 años	En orden de Los 1000 años
Sin deslizamiento preexistente				
Suave, normalmente consolidado, intacto	$\chi \cdot c_u$		$c' \phi'$	
Ligeramente sobre-Consolidado, intacto		$c' \phi'$	$c' \phi'$	
Rígido, intacto			$c' \phi'$	
Rígido, fisurado	$f \cdot \chi \cdot c_u$	$r \cdot c', \phi'$	$c' = 0, \phi'$	$c' = 0, \phi' \rightarrow \phi_r'$
Arena agrietada	$c' = 0, \phi'$			
Deslizamiento preexistente	$c' \phi_r'$	$c_r' \phi_r'$		$c_r' \phi_r'$

Fuente: De Skempton y Hutchinson (1969)

c_u = resistencia máxima, sin drenar

$c' \phi'$ = parámetros de resistencia máxima, drenado

$c_r' \phi_r'$ = parámetros de resistencia residual ($c_r = 0$)

χ = factor de reducción para razón de prueba, anisotrópico, etc.

f = factor de reducción por fisuras

r = tiempo que depende del factor de reducción

Un análisis de esfuerzo efectivo requiere que los parámetros de resistencia al corte sean empleados y que la posición del nivel freático o distribución de la presión de poros en el talud sean conocidos por estudios piezométricos. Si la presión de poros no es conocida o no puede ser determinada, deberá hacerse uso de un análisis de esfuerzo total.

4. Fallas Transicionales de Taludes

Una gran cantidad de fallas puede ser caracterizada por deslizamientos superficiales y transicionales. Este es el tipo de fallas de taludes más sensibles a ser influenciadas por vegetación y tratamientos de suelos. La estabilidad de taludes simples y naturales donde todos los límites (superficie del terreno, nivel freático y superficie de deslizamiento) son aproximadamente paralelos puede ser modelada por ecuaciones de "talud infinito". En este análisis se asume que la superficie del terreno y la de deslizamiento son aproximadamente paralelas. Este

tipo de análisis es apropiado cuando el deslizamiento se da en taludes donde la relación entre la profundidad y la longitud de deslizamiento es pequeña, como se muestra en la figura A.1. Los siguientes tipos de taludes, condiciones de taludes, corresponden al criterio indicado:

1. Pérdidas producidas por intemperismo (suelo residual) recubriendo un lecho de roca inclinado.
2. Planos de estratificación inclinados húmedos subyacidos por estratos más fuertes.
3. Taludes de lecho rocoso cubiertos con morrenas glaciares o suelos coluviales.
4. Taludes homogéneos de textura gruesa, suelos sin cohesión (dunas de arena, terraplenes arenosos, o rellenos)

En los primeros tres taludes la superficie de deslizamiento es predeterminada por control estratigráfico. En el cuarto caso la superficie de deslizamiento está limitada por la superficie de desprendimiento pues el corte crece con la profundidad.

Debido la geometría de un talud infinito, la estabilidad general puede ser analizada por la estabilidad de un elemento vertical simple del talud, como se muestra en la figura A.2. Las condiciones de borde en el talud pueden ser despreciadas así como las fuerzas laterales sobre cada lado del elemento vertical, que suelen ser consideradas iguales y opuestas. El factor de seguridad basado en un análisis de talud infinito para las condiciones mostradas en la figura A.2 está dado por la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{[c' / \cos^2 \beta \tan \phi' + (q_o + \gamma H) + (\gamma_{Buoy} - \gamma) H_w] \tan \phi' / \tan \beta}{[(q_o + \gamma H) + (\gamma_{satd} - \gamma) H_w]} \quad (A.2)$$

Donde:

- ϕ' = ángulo efectivo de fricción;
- c' = cohesión efectiva
- β = ángulo de talud del terreno natural
- γ = densidad húmeda del suelo
- γ (buoy) = densidad flotante del suelo
- γ_{satd} = densidad saturada del suelo
- H = profundidad de la superficie deslizante

H_w = altura piezométrica por encima de la superficie deslizante
 q_0 = sobrecarga uniforme vertical sobre el talud

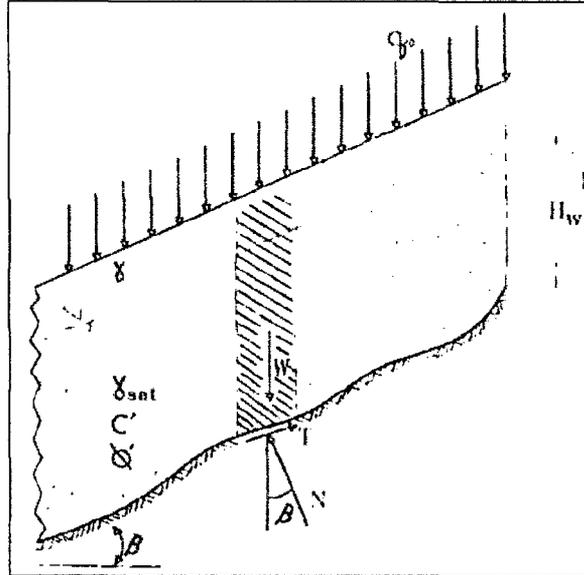


Figura A.2. Representación esquemática del idealizado "talud infinito". (Fuente: Gray y Sotir, 1996.)

Esta expresión es bastante general y toma en consideración la influencia de la sobrecarga (q_0), la presencia de una superficie freática o nivel freático en el talud (H_w), y la existencia de cohesión (c'). La influencia del refuerzo de las raíces en el suelo, que afecta solo la cohesión pero no la fricción del suelo, puede ser contabilizada añadiendo un término de "cohesión por raíces" (c_r) al numerador de la ecuación A.2, como se explica en el capítulo siguiente. Cuando el nivel freático es paralelo al talud, figura A.2, la filtración también ocurre paralela a la superficie. Una serie de casos particulares puede ser derivada de la ecuación general para un talud infinito. Estos casos especiales son los siguientes:

Caso i) Taludes sin Cohesión y sin Sobrecarga ($c'=0$, $q_0=0$)

$$FS = \frac{[\gamma(H - H_w) + \gamma_{Buoy} H_w] \tan \phi' / \tan \beta}{[\gamma(H + H_w) + \gamma_{sat} H_w]} \quad (A.3)$$

Esta ecuación muestra la influencia de una elevación en el nivel freático en un suelo superficial y sin cohesión yacente sobre un lecho inclinado de roca. Nótese que el factor que controla no es la elevación, sino más bien la relación

(H_w/H). En otras palabras, la misma elevación en el nivel freático es más seria en una capa delgada de suelo, que en una gruesa.

Caso ii) Taludes sin Cohesión y Saturados. Sin Sobrecarga ($c'=0$, $q_0=0$, $H_w=H$)

$$FS = \left\{ \gamma_{Buoy} / \gamma_{satd} \right\} \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (A.4)$$

Pero para la mayoría de suelos:

$$\gamma_{Buoy} = 0.5 \gamma_{satd} \quad (A.5)$$

Por lo tanto,

$$FS = 0.5 \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (A.6)$$

Esta ecuación determina el factor de seguridad para el peor de los casos, es decir, el de completa saturación. Este factor es aproximadamente la mitad que el factor de seguridad del caso seco.

Caso iii) Talud Seco, sin Cohesión ni Sobrecarga ($c'=0$, $q_0=0$, $H_w=0$)

$$FS = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \quad (A.7)$$

Esta ecuación muestra que en un material seco y sin cohesión, el ángulo crítico es igual al ángulo de fricción interna del suelo.

Caso iv) Talud Estable, con Cohesión, sin Sobrecarga ($q_0=0$, $F>1$)

(a) Talud Seco ($H_w=0$)

$$c_d / \gamma H = FS \cdot \cos^2 \beta \{ \tan \beta - \tan \phi' \} \quad (A.8)$$

Donde: F = factor de seguridad deseado

c_d = cohesión requerida

(b) Talud Saturado ($H_w=H$)

$$c_d / \gamma H = FS \cdot \cos^2 \beta \left\{ \tan \beta - \left(\gamma_{Buoy} / \gamma_{satd} \right) \tan \phi' \right\} \quad (A.9)$$

Estas ecuaciones son útiles para determinar la medida de cohesión que debe ser desarrollada, por ejemplo desde el refuerzo de las raíces, para alcanzar un

factor de seguridad determinado ($FS > 1$) para una profundidad de deslizamiento (H), ángulo de inclinación (β), y ángulo de fricción (ϕ). Nótese que la cohesión requerida es directamente proporcional al espesor de la masa deslizante.

Selección de los Parámetros del Suelo: La densidad del suelo debería ser determinada en campo empleando procedimientos estándar para el examen de densidad de suelos (Bowles, 1970). Los parámetros de la resistencia efectiva al corte c' y ϕ' deberían ser usados cuando las condiciones de infiltración y aguas subterráneas son tomadas explícitamente en cuenta. Estos parámetros de corte pueden ser obtenidos reconstituyendo las muestras en el laboratorio para obtener la densidad in-situ y ejecutando pruebas triaxiales o de corte directo (Bowles, 1970). Los parámetros de la resistencia al corte también pueden ser obtenidos en campo por medio de una prueba de corte por penetración (Wineland 1975). Una estimación del ángulo de fricción puede ser obtenida a partir de los datos de graduación y densidad empleando el nomograma de la figura A.3. Para muchos propósitos esta aproximación es satisfactoria en lugar de las pruebas de corte en laboratorio, que suelen ser más costosas y extensas.

Estabilidad de Rellenos en Carreteras: Los deslizamientos de detritos que se originan en los rellenos de las carreteras son generalmente caracterizados por un movimiento a lo largo de una superficie aproximadamente plana. Un tipo de falla se da por el desplazamiento superficial del margen externo de un relleno. Este tipo de falla puede ser analizada por el modelo convencional de talud infinito, suponiendo que la profundidad de la masa deslizante es relativamente pequeña en comparación con la longitud del relleno.

El otro tipo de falla es el deslizamiento de todo el relleno a lo largo del contacto con el terreno natural subyacente. Este tipo es común en rellenos sueltos laterales sobre terreno abrupto. En este caso la carretera se encuentra apoyada en parte sobre el relleno y en parte sobre el corte, tal como está mostrado esquemáticamente en la figura A.4. Muchas carreteras son construidas de esta forma. Las suposiciones asumidas en el modelo de talud infinito no son estrictamente seguidas en este caso de falla. En su lugar, análisis del tipo "cuña deslizante" parece ser más apropiado. De todas formas, los resultados de tales análisis muestran que ecuaciones análogas describen el factor de seguridad.

esquemáticamente en la figura A.4. En este caso, el factor de seguridad está dado por una expresión análoga a la ecuación del talud infinito:

$$FS = \frac{[\gamma \cdot A_1 + \gamma_{Buoy} A_2] \tan \phi' / \tan \beta}{[\gamma \cdot A_1 + \gamma_{satd} \cdot A_2]} \quad (A.11)$$

Donde: A_1 = área de la sección transversal del relleno por encima del nivel freático;

A_2 = área de la sección transversal saturada del relleno por debajo del nivel freático

Las áreas A_1 y A_2 corresponden a las alturas $(H-H_w)$ y H_w en la ecuación A.3.

En algunos casos las fallas de rellenos son más complicadas e involucran al material que se encuentra por debajo del relleno, el cual es activado por la carga adicional del relleno. En tales casos la superficie de falla puede cortar por debajo de la superficie de contacto del relleno natural con el terreno natural, y la superficie de falla puede ser rotacional.

10. Control de Desperdicio de Masas

Las medidas para controlar o prevenir el desperdicio de masas recaen en dos categorías básicas: (1) medidas que disminuyen las fuerzas de corte, y (2) medidas que incrementan la resistencia al corte. Estos planteamientos son correctivos de los factores que causan las fallas de taludes. Schuster (1992) presentó una excelente y completa revisión de los planteamientos y técnicas de la estabilización de taludes.

El agua juega un papel de gran importancia en la estabilidad de taludes pues disminuye la resistencia al corte al mismo tiempo que incrementa los esfuerzos de corte. Es por ello que los sistemas de drenaje y de derivación de aguas son extremadamente importantes en la estabilización de taludes.

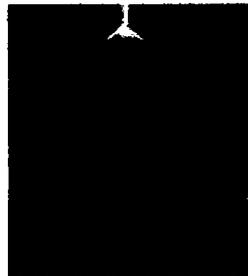
Los trabajos en suelos incrementan la estabilidad principalmente desarrollando la resistencia al corte así como reforzando el suelo con raíces. Algunas medidas aplicadas sobre el terreno suelto también proporcionan estabilidad al modificar el régimen hidrológico del suelo ya sea transportando la humedad del suelo o actuando como drenes.

ANEXO B

Especificaciones de la Boquilla Aspersora

FullJet Spray Nozzles • Wide Angle Square Spray Medium Capacity

BB
FULL CONE NOZZLES



H-WSQ



One-piece body
2/4"-1" NPT or BSPT (F)

H-WSQ



One-piece cast body
1-1/4"-3" NPT or BSPT (F)

HH-WSQ



One-piece body
3/4"-1" NPT or BSPT (M)

DESIGN FEATURES

Wide angle square spray FullJet nozzles feature a solid cone-shaped spray pattern with a square impact area and spray angles of 102° to 115°.

Their uniform spray distribution of medium to large drops is the result of the unique FullJet nozzle vane design, exacting

internal proportions, and precision machining. The nozzles are ideal for installations requiring uniform coverage of rectangular areas or zones.

Sizes 1-1/4" and larger are cast-type nozzles with renewable vanes.

COMMON APPLICATIONS

- Cooling and quenching
- Product washing
- Air and gas washers
- Scrubbers
- Liquor washers
- Dust control
- Fire protection

ACCESSORIES

- Split-eyelid Connector
 - Adjustable Ball Fittings
 - Strainers
 - Pressure Gauges
 - Pressure Regulators
 - Pressure Relief Valves
 - Control Valves
 - Solenoid Valves
 - Check Valves
- See Section L for more info.

PERFORMANCE DATA

Nozzle Inlet Conn. NPT or BSPT	Nozzle Type		Capacity Size	Orifice Dia. Nom. (mm)	Max. Free Passage Dia. (mm)	Capacity (liters per minute)										Spray Angle				
	Gen. F	Gen. M				0.3	0.5	0.7	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	18	20
	H-WSQ	HH-WSQ				bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar
3/4	•	•	71WSQ	9.9	4.4	18.4	29	27	31	42	51	58	64	69	115°	130°	182°			
1	•	•	130WSQ	13.1	5.6	34	42	49	57	78	93	106	116	126	107°	130°	107°			
1-1/4	•		190WSQ	15.5	6.4	49	62	71	88	113	136	154	169	184	108°	131°	108°			
1-1/2	•		250WSQ	18.3	7.3	74	92	107	125	170	205	230	256	273	111°	134°	109°			
2	•		500WSQ	25	11.1	144	181	210	246	335	400	456	500	541	110°	134°	109°			
2-1/2	•		830WSQ	31.8	14.3	215	270	316	365	495	600	680	750	811	110°	134°	109°			
3	•		1870WSQ	39.8	17.5	295	365	426	495	680	811	920	1010	1090	110°	135°	109°			

* Foreign water with maximum diameter orifice can pass through nozzle without clogging.



Spraying Systems Co.*

Phone 1-800-95-SPRAY, Fax 1-940-96-SPRAY
Outside the U.S., Phone 1(630) 666-5900, Fax 1(630) 288-0892
Visit our Web Site: www.spray.com, email: info@spray.com

106



FullJet Spray Nozzles • Wide Angle Square Spray

Medium Capacity

FULL CONE NOZZLES

DIMENSIONS & WEIGHTS

Model	Material	Length (mm)	Length (in)	Weight (kg)	Weight (lb)
H-6700 Bar Chuck	3/4"	55.5	2.2	21	46
	1"	70	2.8	27	59
H-6700 Cast	1-1/4"	82.5	3.3	57	125
	1-1/2"	103	4.1	63	139
HH-6700	2"	123	4.9	1.7	3.7
	2-1/2"	175	6.9	2.2	4.8
	3"	155	6.1	8.2	18.1
HH-6700 Ball	3/4"	43.5	1.7	.10	.22
	1"	53	2.1	.20	.44

Based on largest dimensions of each type.

MATERIALS

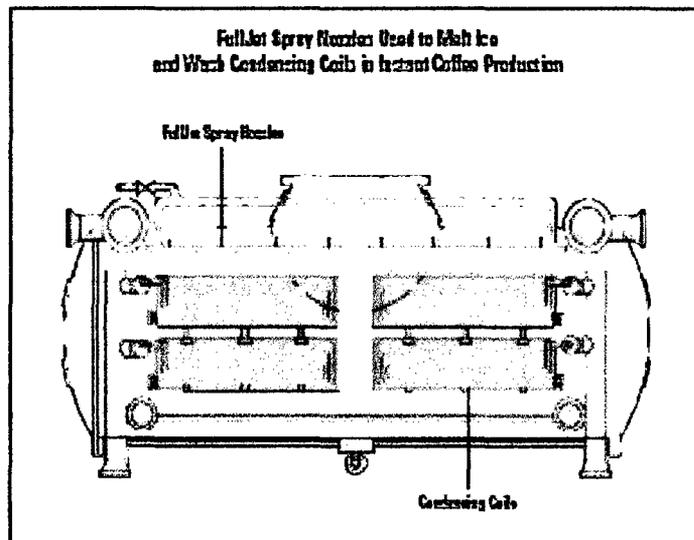
Material	Material	H-6700	HH-6700
Bar Chuck			
Brass	(none)	•	•
Mild Steel	1	•	•
303 Stainless Steel	8S	•	•
316 Stainless Steel	31638	•	•
Polyvinyl Chloride	PVC		•
Cast			
Brass	(none)	•	
Cast Iron	1	•	
316 Stainless Steel	8S	•	

Other materials available upon request.

ORDERING INFO

STANDARD SPRAY NOZZLE			
3/4 HH - SS 71WSQ			
Size Code	Model Type	Material Code	Capacity Code

FullJet Spray Nozzles Used to Melt Ice
and Wash Condensing Coils in Instant Coffee Production

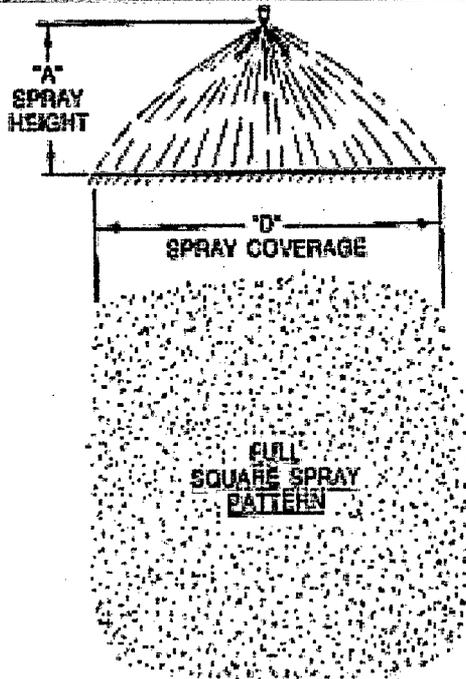


Spraying Systems Co.

Phone 1-800-45-SPRAY, Fax 1-820-85-SPRAY
Outside the U.S., Phone (320) 855-8223, Fax (320) 263-0342
Visit our Web Site: www.spray.com, email: info@spray.com

100

NOZZLE NO.	"A" m	SPRAY COVERAGE "D" IN METERS AT VARIOUS PRESSURES				
		0.35 bar	0.7 bar	1.4 bar	2.8 bar	5.5 bar
1/4HH14WSQ	0.3	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
	1	1.2	1.4	1.6	1.8	1.5
	1.5	1.8	2	2.4	2.6	2.1
	2	2.1	2.8	3	3	2.4
3/8HH20WSQ	0.3	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
	1	1.4	1.6	1.8	1.8	1.5
	1.5	2	2.1	2.8	2.7	2.3
	2	2.3	2.7	3.2	3.2	2.6
1/2HH35WSQ	0.3	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	1	1.5	1.7	1.8	2	1.7
	1.5	2.1	2.3	2.7	2.7	2.4
	2	2.4	2.9	3.2	3.4	2.7
3/4HT1WSQ 3/4HT71WSQ	0.3	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	1	1.5	1.7	2	2	1.7
	1.5	2.1	2.4	2.7	2.9	2.4
	2	2.4	3	3.4	3.5	2.9



NOZZLE NO.	"A" m	SPRAY COVERAGE "D" IN METERS AT VARIOUS PRESSURES				
		0.2 bar	0.35 bar	0.7 bar	1.4 bar	2.8 bar
1H130WSQ 1HH130WSQ	0.3	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
	1	1.2	1.5	1.7	2	2
	1.5	1.7	2.1	2.4	2.7	2.9
	2	2.1	2.6	3	3.4	3.6
1 1/4H190WSQ	0.3	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
	1	1.2	1.5	1.7	2	2
	1.5	1.8	2.1	2.4	2.9	2.9
	2	2.1	2.7	3.2	3.7	3.7
1 1/2H250WSQ	0.3	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	1	1.4	1.7	1.8	2	2
	1.5	1.8	2.3	2.7	3	3
	2	2.3	2.9	3.4	3.8	3.8
2H580WSQ	0.3	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
	1	1.4	1.7	1.8	2.1	2
	1.5	2	2.4	2.7	3.2	3
	2	2.4	3	3.5	4	3.8
2 1/2H830WSQ	0.3	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8
	1	1.6	1.7	2	2.1	2.1
	1.5	2.1	2.4	2.9	3.2	3
	2	2.6	3	3.7	4.1	3.6
3H1070WSQ	0.3	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	1	1.5	1.7	2	2.1	2.1
	1.5	2.1	2.6	2.9	3.2	3.2
	2	2.8	3.2	3.7	4.1	4
3H1070WSQ	0.3	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	1	1.5	1.7	2	2.1	2.1
	1.5	2.1	2.6	2.9	3.2	3.2
	2	2.8	3.2	3.7	4.1	4
3H1070WSQ	0.3	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	1	1.5	1.7	2	2.1	2.1
	1.5	2.1	2.6	2.9	3.2	3.2
	2	2.8	3.2	3.7	4.1	4

FOR FURTHER DETAILS ON WIDE ANGLE SQUARE SPRAY FullJet® NOZZLES SEE OUR INDUSTRIAL CATALOG.

DESCRIPTION

SPRAY PATTERN DIMENSIONS FOR WIDE ANGLE SQUARE SPRAY FullJet® NOZZLES SPRAYING VERTICALLY DOWNWARD (METRIC)

Spraying Systems Co.

Spray Nozzles and Accessories

North Avenue and Schmale Road, Wheaton, Illinois 60188

Ref :

Revision No.

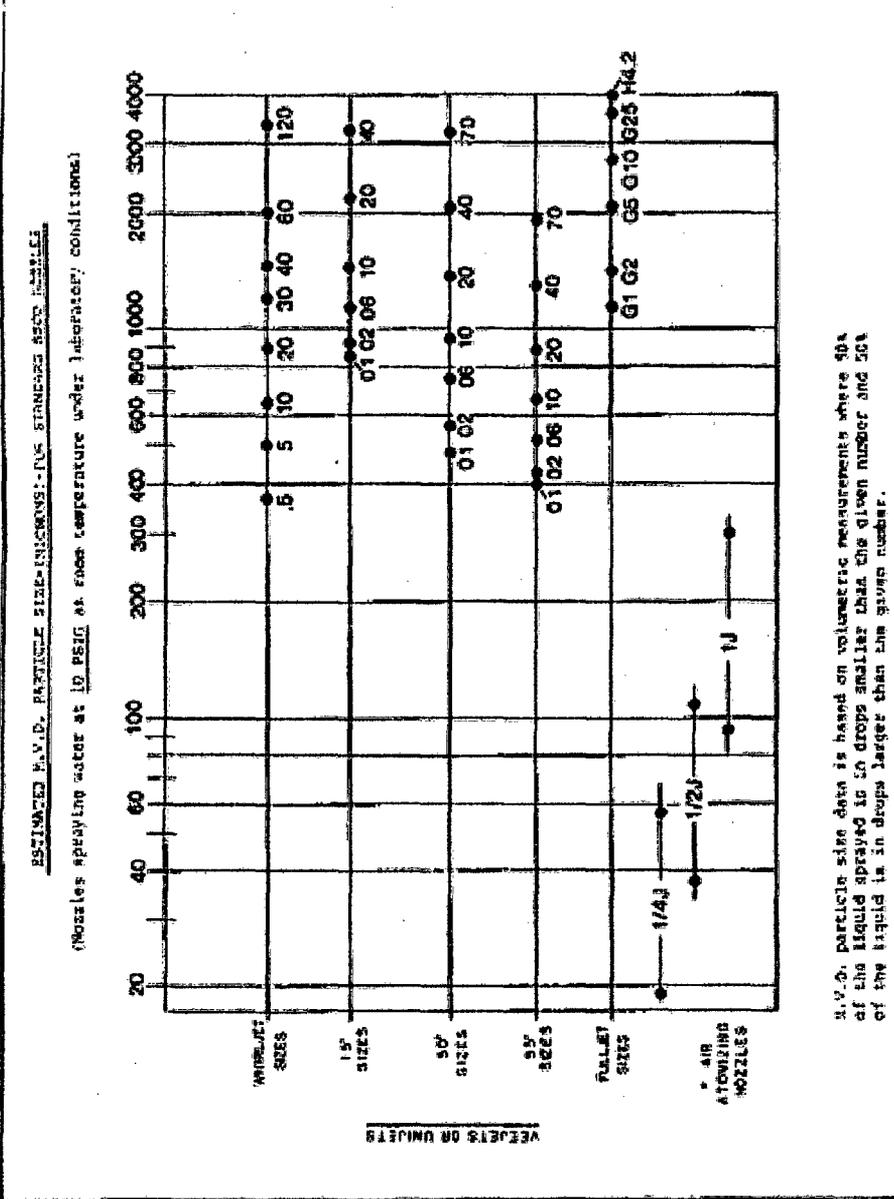
Data Sheet No.

9164M

© Spraying Systems Co. 1990

PARTICLE SIZE RANGE (MICRONS) (VOLUMETRIC)	COMPARATIVE SUBJECT PARTICLE SIZE	TIME FOR PARTICLE TO FALL 10 FEET (SECONDS)
5000 to 20000	Heavy Rain	0.55
2000 to 10000	Intense Rain	0.9
1000 to 5000	Appreciable Rain	1.3
500 to 1000	Light Rain	1.6
100 to 500	Very Heavy Rain	1.8
50 to 100	Mist	11
10 to 50	Fog	1000
1.0 to 10.0	Fumes	Suspended**
.01 to .001	Smoke	Suspended**
Below .001	Molecular Dimensions	in air

One micron = 1/25400 of an inch
23.4 microns = .001" (one thousandth of an inch)
1000 microns = 1 millimeter
**Below 0.1 microns, particles are suspended in air due to molecular shock (Brownian motion)



SSO is used in spraying water under laboratory conditions using Spraying Systems Co. spraying nozzle catalog.

M.V.D. particle size data is based on volumetric measurements where 50% of the liquid sprayed is in drops smaller than the given number and 50% of the liquid is in drops larger than the given number.

- EXAMPLE:** To determine the approximate M.V.D. of a SSO Nozzle:
1. Find 90° series line for nozzle.
 2. Locate--10 position in row of dots.
 3. Read the particle diameter directly from the scale above.

Answer: 940 Microns (approx.)

*All Atomizing Nozzle particle size ranges shown are generalized only. For more specific information, please write Spraying Systems Co.

DESCRIPTION

COMPARATIVE PARTICLE SIZE DATA FOR SSO SPRAY NOZZLES AND RAIN DROP PARTICLE SIZE TAB. (10 P.S.I.)

SPRAYING SYSTEMS CO.
Engineers and Manufacturers

NORTH AVENUE AT NEWMALE ROAD WILMINGTON, DEL.

DN BY E.S. DWG. NO. 13911-2

DATE 10/29/81

ANEXO C

Análisis Estructural y Diseño en Acero

C.1. Diseño de Vigas

Las vigas descritas en el Capítulo 3 se diseñarán con tramos de sección constante, para las cuales se hará uso del apéndice F2-2 de las AISCS para hallar esfuerzos de flexión. Con el fin de poder utilizar estas especificaciones se tienen en cuenta los siguientes requerimientos:

- La sección debe tener por lo menos un eje de simetría que debe ser perpendicular al plano de giro.
- Las alas deben ser de áreas iguales y constantes a lo largo de todo el elemento.

Se realizará la determinación del perfil más económico mediante el uso del programa SAP 2000 para luego comprobar los perfiles obtenidos.

Caso I: Vigas secundarias.

1. Condiciones Iniciales

Se tiene la siguiente condición:

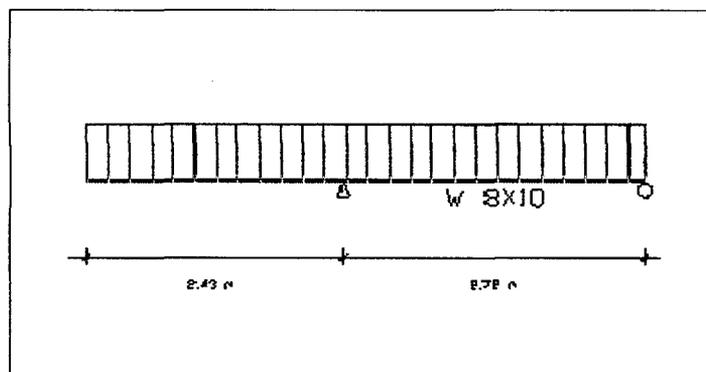


Figura C.1. Esquema de una de las vigas secundarias.

$$L_b = 2 \times 2.43 \text{ m} = 4.86 \text{ m} = 15.95 \text{ '}$$

Se toma las siguientes combinaciones de carga:

Combinación 1: 1.2 D + 1.6 L

Combinación 2: 1.4 D

Metrado de Cargas. Las cargas vivas y muertas se presentan a continuación:

D	W (Kg/m)
Tierra	402,6
Plancha	10,37
Peso propio	20
Sub-Total	432,97

L	W (Kg/m)
Techo Ligero	22,875
Sub-Total	22,875

Total	
Combinación1	556,164
Total	
Combinación2	606,158

Razón por la cual se llega a lo siguiente:

$$M_u = 1818.5 \text{ Kg m}$$

$$V_u = 3120 \text{ Kg}$$

$$C_b = 2.49$$

Mediante la ejecución del programa SAP 2000 bajo las condiciones indicadas se obtiene como resultado el perfil W 8X10, siendo sus características las siguientes:

W 8X10

$$A = 2.96 \text{ in}^2$$

$$d = 7.89 \text{ in}$$

$$h = 6.625 \text{ in}$$

$$t_w = 0.17 \text{ in}$$

$$b_f = 3.94 \text{ in}$$

$$t_f = 0.205 \text{ in}$$

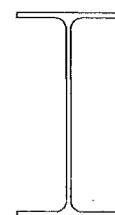
$$I_x = 30.8 \text{ in}^4$$

$$I_y = 2.09 \text{ in}^4$$

$$S_x = 7.81 \text{ in}^3$$

$$S_y = 1.06 \text{ in}^3$$

$$Z_x = 8.87 \text{ in}^3$$



W 8X10

$$r_x = 3.22 \quad \text{in} \qquad Z_y = 1.66 \quad \text{in}^3$$

$$r_y = 0.841 \quad \text{in}$$

2. Comprobación del perfil obtenido

i. Verificación del tipo de sección.

$$\frac{0.5 \cdot b_f}{t_f} = 9.61 \qquad \lambda_p = \frac{65}{\sqrt{F_y}} = 10.8 \qquad \text{Ala compacta}$$

$$\frac{h}{t_w} = 46.6 \qquad \lambda_p = \frac{640}{\sqrt{F_y}} = 106.7 \qquad \text{Alma compacta}$$

Por lo tanto tenemos un perfil compacto.

Al tener un perfil compacto tenemos que verificar dos estados de falla: el de pandeo lateral-torsional y el de fluencia, sin embargo, descartamos la falla por fluencia pues la longitud arriostrada es mucho mayor que la L_r , por lo que pasamos a comprobar directamente el pandeo lateral-torsional.

ii. Determinando $\phi b M_n$

De acuerdo al Apéndice F2-2 del AISC, el momento de diseño en flexión para el estado límite de pandeo lateral-torsional de miembros compactos, en los que $L_b > L_r$, es como sigue:

$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p$$

Donde ,

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J_c}{S_x h_0} \cdot \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2}$$

C_b =Coeficiente de flexión

M_n =Resistencia nominal en flexión, N-mm

M_p =Momento de flexión plástico, N - mm

F_{cr} =Esfuerzo crítico, MPa

S_x =Módulo de sección, de la sección crítica

E=Módulo de elasticidad del acero (E = 200 000 MPa)

L_b =Longitud no arriostrada lateralmente, mm

r_{ts} =radio de giro, mm

J_c =Constante torsional para la sección, mm⁴

S_x =Módulo de sección, de la sección crítica, mm³

h_0 = Distancia libre entre alas menos el filete, mm

De acuerdo a la anotación incluida en el reglamento, la expresión radical de esta ecuación se puede igualar a 1.0.

De la anterior ecuación:

$$F_{cr} = \frac{b_f}{\sqrt{12 \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \frac{ht_w}{b_f t_f}\right)}}$$

Donde: b_f =Ancho de ala, mm

h =Distancia entre centroides, mm

t_w =Espesor del alma, mm

t_f =Espesor del ala, mm

Por lo que llegamos a lo siguiente:

$$M_n = 2174 \text{ Kg m}$$

$$\phi_b M_n = 1848 \text{ Kg m} > 1818.5 \text{ Kg m} = M_u$$

Entonces el perfil seleccionado cumple con las condiciones dadas!

iii. Verificación por corte

$$\frac{h}{t_w} = 38.9 \quad , \quad \frac{418}{\sqrt{F_y}} = 69.6 \quad , \quad \frac{523}{\sqrt{F_y}} = 87.2$$

$$a_w = 7.89 \times 0.17 \text{ in}^2 = 8.66 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0.6 \times 2531 \times 8.66 = 13\,140 \text{ Kg} > 3120 \text{ Kg} = V_u$$

OK!!

Por lo tanto se establece que el perfil W8X10 cumple con las exigencias dadas.

Caso II: Viga principal.

1. Condiciones Iniciales

Se tiene la siguiente condición:

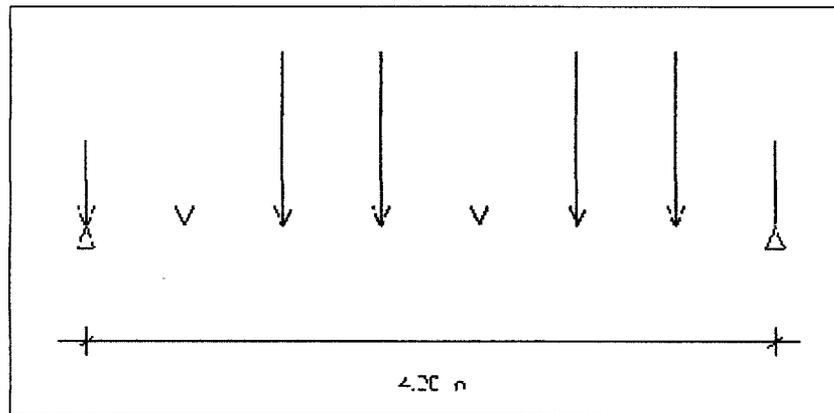


Figura C.2. Esquema de una de la viga principal.

$L_b = 4.20 \text{ m} = 13.81 \text{ '}$

Se toma las siguientes combinaciones de carga:

Combinación 1: 1.2 D + 1.6 L

Combinación 2: 1.4 D

Metrado de Cargas.

D	P (Kg.)
Tierra	2039,4
plancha	52,53
Peso propio	30
Sub-Total	2121,93

L	P
Techo Ligero	123,75
Sub-Total	123,75

Total	
Combinación1	2744,316
Total	
Combinación2	2970,702

Razón por la cual se llega a lo siguiente:

$$M_u = 10696 \text{ Kg m}$$

$$V_u = 8913 \text{ Kg}$$

$$C_b = 1.13$$

Mediante la ejecución del programa SAP 2000 bajo las condiciones indicadas se obtiene como resultado el perfil W 8X10, siendo sus características las siguientes:

W 16X31

$$A = 9.12 \text{ in}^2$$

$$d = 15.88 \text{ in}$$

$$h = 13.625 \text{ in}$$

$$t_w = 0.275 \text{ in}$$

$$b_f = 5.525 \text{ in}$$

$$t_f = 0.440 \text{ in}$$

$$r_x = 6.41 \text{ in}$$

$$r_y = 1.17 \text{ in}$$

$$I_x = 375 \text{ in}^4$$

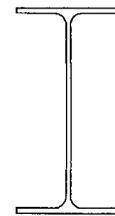
$$I_y = 12.4 \text{ in}^4$$

$$S_x = 47.2 \text{ in}^3$$

$$S_y = 4.49 \text{ in}^3$$

$$Z_x = 54.0 \text{ in}^3$$

$$Z_y = 7.03 \text{ in}^3$$



W 16 X 31

2. Comprobación del perfil obtenido

i. Verificación del tipo de perfil.

$$\frac{0.5 \cdot b_f}{t_f} = 6.28$$

$$\lambda_p = \frac{65}{\sqrt{F_y}} = 10.8$$

Ala compacta

$$\frac{h}{t_w} = 49.6$$

$$\lambda_p = \frac{640}{\sqrt{F_y}} = 106.7$$

Alma compacta

Por lo tanto tenemos un perfil compacto.

Al tener un perfil compacto tenemos que verificar dos estados de falla: el de pandeo lateral-torsional y el de fluencia, sin embargo, descartamos la falla por fluencia pues la longitud arriostrada es mucho mayor que la L_p (4.9), por lo que pasamos a comprobar directamente el pandeo lateral-torsional.

ii. Determinando $\phi_b M_n$

De acuerdo al Apéndice F2-2 del AISC, el momento de diseño en flexión para el estado límite de pandeo lateral-torsional de miembros compactos, en los que $L_p < L_b < L_r$, es como sigue:

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - 0.7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p$$

Donde: C_b =Coeficiente de flexión
 M_n =Resistencia nominal en flexión, N-mm
 M_p =Momento de flexión plástico, N - mm
 F_y = Esfuerzo de fluencia mínimo, MPa
 L_b =Longitud no arriostrada lateralmente, mm
 L_p =Longitud límite lateralmente sin arriostrar
 L_r =Longitud límite no arriostrada lateralmente para pandeo inelástico
 S_x =Módulo de sección, de la sección crítica, mm³

Por lo que llegamos a lo siguiente:

$$M_n = 260.40 \text{ kip-ft} = 18480 \text{ Kg m}$$

$$\phi_b M_n = 15715 \text{ Kg m} > 10700 \text{ Kg m} = M_u$$

El perfil seleccionado cumple con las condiciones dadas!

iii. Verificación por corte

$$\frac{h}{t_w} = 49.54 \quad , \quad \frac{418}{\sqrt{F_y}} = 69.6 \quad , \quad \frac{523}{\sqrt{F_y}} = 87.2$$

$$a_w = 13.625 \times 0.275 \text{ in}^2 = 3.75 \text{ in}^2 = 24.17 \text{ cm}^2$$

$$V_n = 0.6 \times 2531 \times 24.17 = 36709 \text{ Kg} > 8913 \text{ Kg} = V_u$$

OK!!

Por lo tanto se establece que el perfil W16X31 cumple con las exigencias dadas.

C.2. Diseño del Tijeral por el Esfuerzo Combinado de Torsión, Flexión y Compresión

La sub estructura, o soporte principal del Simulador (Ver Capítulo 3), resulta ser un caballete constituido por dos tijerales tal como se muestra a continuación:

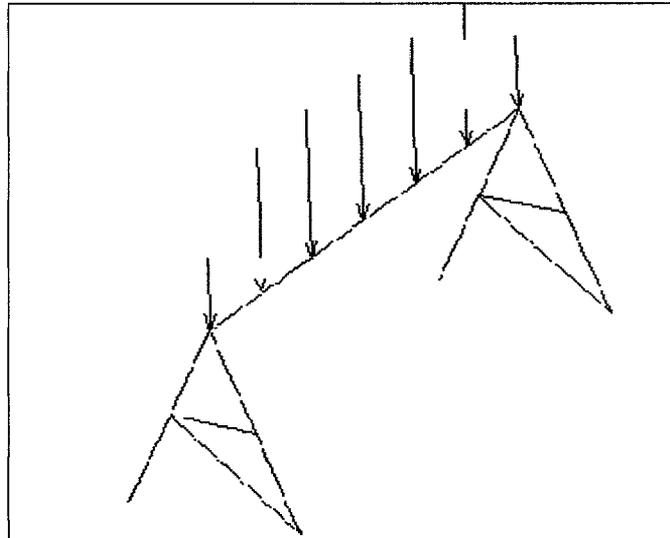


Figura C.3. Esquema de la estructura de soporte.

Por lo tanto los elementos conformantes del tijeral se verán expuestos a requerimientos combinados: Flexión, Torsión y Compresión.

Gracias a la ayuda de software estructura se obtuvieron los siguientes esfuerzos últimos para cada uno de los miembros:

Compresión	:	6100 Kg f
Flexión	:	196 Kg f.m
Corte	:	270 Kg f
Torsión	:	1.30 Kg f.m

Para estos casos se debe recurrir al Apéndice H de la AISC para determinar los esfuerzos correspondientes. Para poder utilizar estas especificaciones se tienen los siguientes requerimientos:

- La sección debe tener por lo menos un eje de simetría que debe ser perpendicular al plano de giro.

- Se recomienda el uso de tubos estructurales HHS (Hollow Structural Steel) pues estos presentan una considerable resistencia a la torsión, más que los perfiles abiertos como los W.

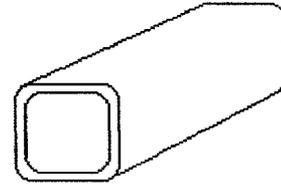
Diseño de Miembros para Esfuerzos Combinados y Torsión

Se usará el tubo estructural cuadrado TC 75X75X4.5

i. Diseño por Compresión

Se verificará el tubo estructural:

Perfil TC
75X75X4.5



	S.I.		U.S.
A	12.17	cm ² =	1.88635377 in ²
I	98.6	cm ⁴ =	62.611 in ⁴
S	26.28	cm ³ =	1.60370399 in ³
R	2.85	cm =	1.12204724 in
J	584.9	cm ⁴ =	90.6596813 in ⁴
B	7.5	cm =	2.95275591 in
T	0.45	cm =	0.17716535 in
Z	26.29	cm ³ =	1.60451764 in ³

Además:

$$K_x = 1$$

$$K_y = 1$$

ii. Verificación de la sección y miembros esbeltos:

Verificación del alma

$$\frac{b}{t} = 13.7 \leq \frac{795}{\sqrt{F_y}} = 15.8 \quad \text{ok!}$$

Verificación del ala

$$\frac{b}{t} = 13.7 \leq \frac{2112}{\sqrt{F_y}} = 42 \quad \text{ok!}$$

No hay pandeo local,

Esbeltez del miembro:

$$\frac{Kl}{r} = 49.13 \leq 200 \quad \text{ok!}$$

iii. Determinación de la resistencia a la compresión.

Se debe calcular:

$$P_n = F_{cr} A_g$$

De acuerdo a lo mostrado el Esfuerzo de Flexión por pandeo se calcula como sigue:

(a) si:

$$\frac{Kl}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

entonces:

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y$$

(b) cuando:

$$\frac{Kl}{r} \leq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

entonces:

$$F_{cr} = 0.877 F_e$$

donde

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2}$$

en este caso:

$$4.71 \sqrt{\frac{F_y}{E}} = 133.68 > 49.13$$

Por lo tanto:

$$F_{cr} = 2228.9 \text{ Kg} / \text{cm}^2$$

$$P_n = 27125.56 \quad \text{Kg f}$$

$$\Phi P_n = 23056.7223 \quad \text{Kg f} \quad 23.0567223 \quad \text{Ton}$$

$$23056 \text{ Kg f} = \Phi P_n > P_u = 6100 \text{ Kg f} \quad \text{OK!}$$

iv. Verificación por Flexocompresión

$$P_r = P_u = 6.1 \quad \text{ton}$$

$$M_{ntx} = 0.196 \quad \text{ton-m}$$

$$M_{ltx} = 0 \quad \text{ton-m}$$

$$M_{nty} = 0 \quad \text{ton-m}$$

$$M_{lty} = 0 \quad \text{ton-m}$$

$$K_{lx} = 1.4 \quad \text{m} \quad 4.59016393 \quad \text{ft}$$

$$K_{ly} = 1.4 \quad \text{m} \quad 4.59016393 \quad \text{ft}$$

$$F_y = 36 \quad \text{ksi} \quad 2530.8 \quad \text{kg/cm}^2$$

a) Por Fluencia :

$$M_n = M_p = F_y Z_x$$

Por lo que

$$\phi b M_n = 0.85 \cdot 2531 \cdot 26.29 \text{ Kg f} / \text{cm}^2$$

$$\phi b M_n = 598 \text{ Kg f} \cdot \text{m} > M_u \quad \text{ok!}$$

b) Por flexocompresión.

(a) para $\frac{P_r}{P_c} \geq 0.2$

$$\frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0$$

(b) para $\frac{P_r}{P_c} < 0.2$

$$\frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.0$$

Según el segundo caso:

$$\frac{6100}{23056} + \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{196}{598} \right) = 0.56 < 1.0 \quad \text{ok!}$$

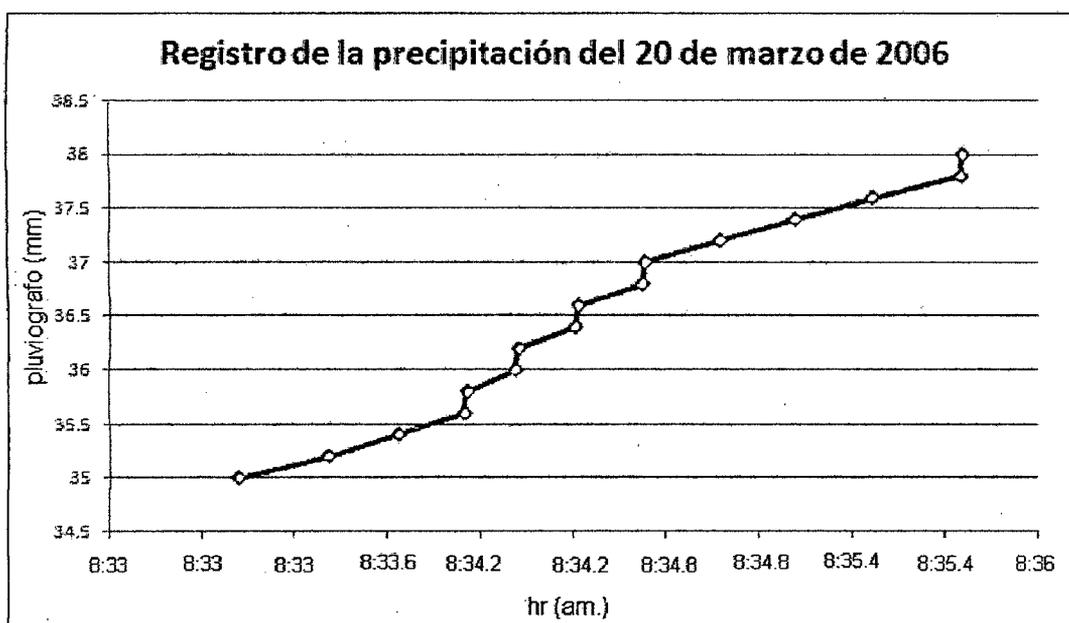
El tubo estructural cuadrado TC 75X75X4.5 responde a los requerimientos de flexocompresión por lo que será usado para la construcción del modelo.

ANEXO D

Registro de Lluvias de Tingo María

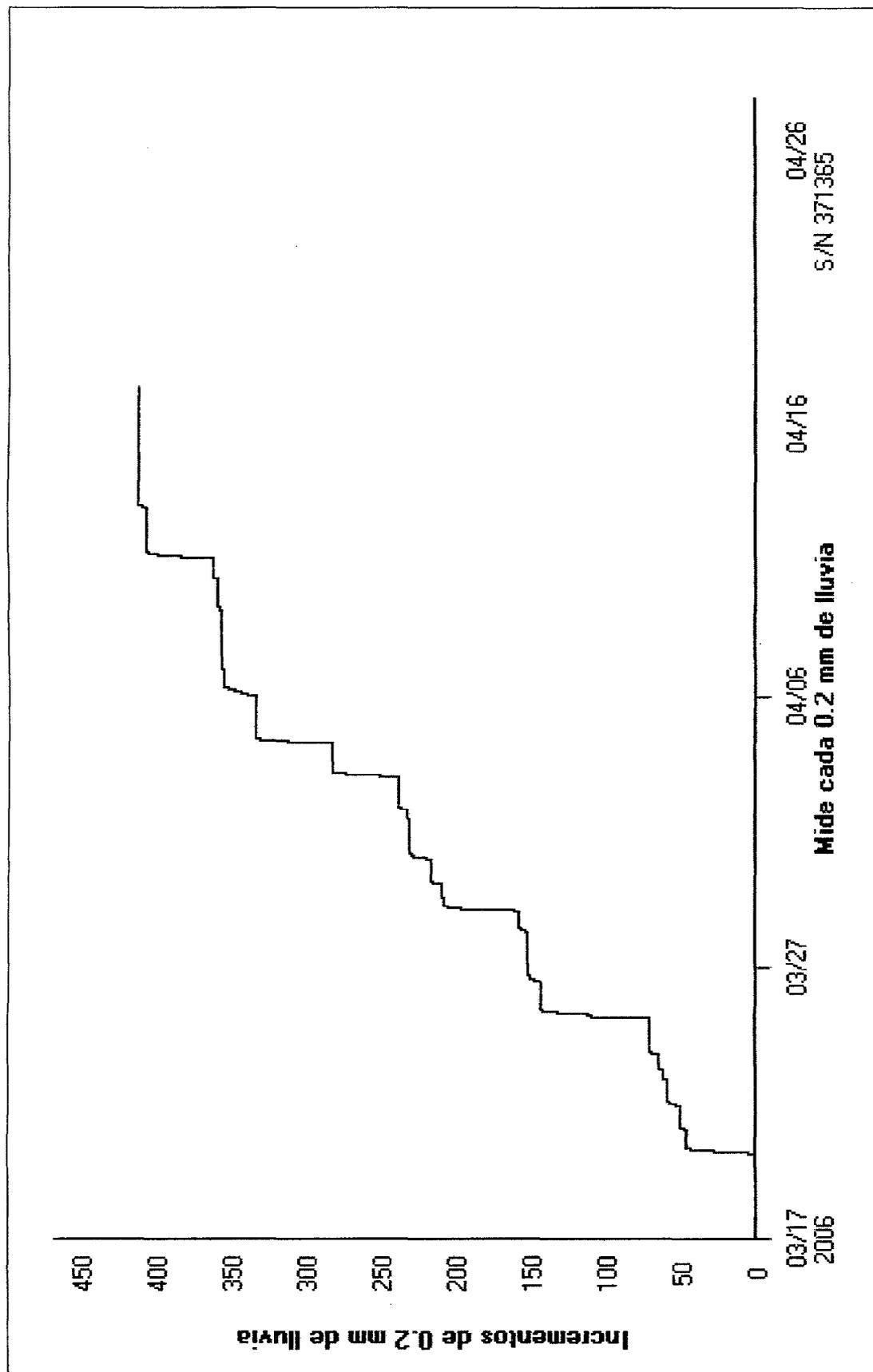
Registro de Lluvias de Tingo María

Durante el verano de 2006 se instaló en un punto de la ciudad de Tingo María (ciudad ubicada en la selva alta del departamento de Huánuco) un pluviógrafo con la finalidad de registrar las precipitaciones ocurridas en esa ciudad. Durante los meses de enero, febrero y marzo se obtuvieron una serie de datos interesantes e importantes para la calibración del modelo, consiguiéndose, por ejemplo, gráficos como el siguiente:



Esta gráfica nos muestra una variación en la lectura del pluviógrafo de 3 mm en 144 segundos (entre las 8:33 y las 8:35, aproximadamente), el cual representaría una lluvia de 80 mm/h. Este es un patrón que se observa frecuentemente en los registros de Tingo María, por lo que se simuló una lluvia de semejantes características.

En la siguiente página se muestra el gráfico del registro entero almacenado por el pluviógrafo descrito en este anexo.



ANEXO E

Resultados del Estudio de Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
 PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
 UBICACION : Laboratorio Nacional de Hidráulica
 FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

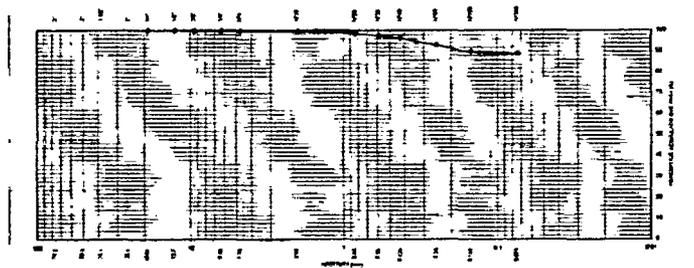
Muestra : M-1

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Tamiz	Abertura (mm)	(%)	
		Parcial	Reten / Pasa
3"	76.200	-	-
2"	50.300	-	-
1 1/2"	38.100	-	-
1"	25.400	-	-
3/4"	19.050	-	100.0
1/2"	12.700	-	100.0
3/8"	9.525	0.3	0.3 99.7
1/4"	6.350	-	0.3 99.7
N°4	4.760	-	0.3 99.7
N°10	2.000	0.2	0.5 99.4
N°20	0.840	0.8	1.4 98.6
N°30	0.590	1.1	2.5 97.5
N°40	0.426	1.2	3.7 96.3
N°60	0.250	3.2	6.8 93.2
N°100	0.149	3.3	10.1 89.9
N°200	0.074	0.9	11.0 89.0
- N°200		89.0	

% grava	: 0.3
% arena	: 10.7
% finos	: 89.0

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra remitida e identificada por el Solicitante
 Ejecución: Tec. JUAN CHÉVELU
 Revisión: Bach. Ing. N. MOREÑA V.

NILTONSON MOREÑA VALVERDE.
 BACH ING RESPONSABLE DE AREA
 Lab. de Mecánica de Suelos UMI

JOSÉ WILFREDO GUTIERREZ LAZARES
 ING. JEFE DEL LABORATORIO
 Lab. de Mecánica de Suelos UMI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil, Roberto Cáceres Izquierdo
 PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
 UBICACION : Laboratorio Nacional de Hidráulica
 FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : M-2

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Tamiz	Abertura (mm)	(%)	
		Parcial	Reten / Pasa
3"	76.200	-	-
2"	50.300	-	-
1 1/2"	38.100	-	-
1"	25.400	-	-
3/4"	19.050	-	-
1/2"	12.700	-	-
3/8"	9.525	-	-
1/4"	6.350	-	100.0
N°4	4.750	-	100.0
N°10	2.000	0.1	0.1 99.9
N°20	0.840	0.3	0.4 99.6
N°30	0.590	0.5	0.9 99.1
N°40	0.425	0.2	1.1 98.9
N°60	0.250	2.8	3.9 96.1
N°100	0.149	2.9	6.8 93.2
N°200	0.074	1.0	7.8 92.2
- N°200		92.2	

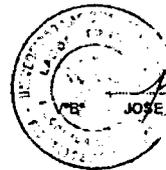
% grava	:	—
% arena	:	7.8
% finos	:	92.2

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra remitida e identificada por el Solicitante
 Ejecución: Tec. Julio Chávez U.
 Revisión: Bach. Ing. N. Noreña V.

NILTHSON NOREÑA VALVERDE.
 BACH. ING. RESPONSABLE DE AREA
 Lab. de Mecánica de Suelos UNI



JOSE VILFREDO GUTIERREZ LAZARES
 ING. JEFE DEL LABORATORIO
 Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
UBICACION : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

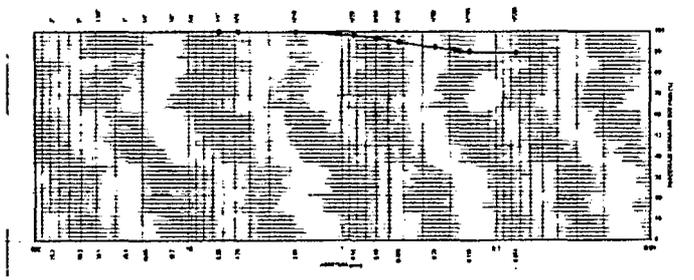
Muestra : M-4

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Tamiz	Abertura (mm)	(%)		Pasa
		Parcial	Reten	
3"	76.200	-	-	
2"	50.300	-	-	
1 1/2"	38.100	-	-	
1"	25.400	-	-	
3/4"	19.050	-	-	
1/2"	12.700	-	-	
3/8"	9.525	-	-	
1/4"	6.350	-	-	100.0
N°4	4.750	-	-	100.0
N°10	2.000	0.1	0.1	99.9
N°20	0.840	1.4	1.5	98.5
N°30	0.590	1.4	2.8	97.1
N°40	0.426	1.8	4.7	95.3
N°60	0.250	2.7	7.4	92.6
N°100	0.149	2.0	9.4	90.6
N°200	0.074	0.6	10.0	90.0
- N°200			90.0	

% grava	---
% arena	10.0
% finos	90.0

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra remitida e identificada por el Solicitante
Ejecución: Tac. Julio Chávez U
Revisión: Bach. Ing. N. Noreña V

NILTHSON NOREÑA VALVERDE.
BACH. ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



JOSÉ WILFREDO GUTIÉRREZ LAZARES
ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
UBICACION : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

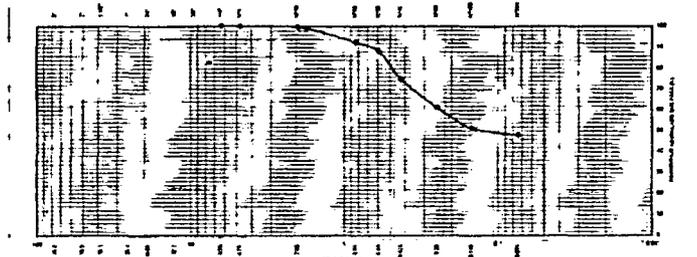
Muestra : M-6

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Tamiz	Abertura (mm)	(%)		(%) Pasa
		Parcial	Reten	
3"	76.200	-	-	
2"	50.300	-	-	
1 1/2"	38.100	-	-	
1"	25.400	-	-	
3/4"	19.050	-	-	
1/2"	12.700	-	-	
3/8"	9.525	-	-	
1/4"	6.350	-	-	100.0
N°4	4.760	-	-	100.0
N°10	2.000	0.6	0.6	99.4
N°20	0.840	7.3	7.9	92.1
N°30	0.600	4.3	12.2	87.8
N°40	0.425	13.3	25.5	74.5
N°60	0.250	13.6	39.1	60.9
N°100	0.149	9.8	48.6	51.2
N°200	0.074	3.4	52.2	47.8
- N°200		47.8		

% grava	---
% arena	52.2
% finos	47.8

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Elaboración : Tec. Julio Chávez U
Revisión : Bach. Ing. N. Noreña V

NILTHSON NOREÑA VALVERDE.
BACH. ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
LABORATORIO N° 2
REPUBLICA PERUANA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
JOSE WILFREDO GUTIERREZ LAZARES
ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
UBICACIÓN : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

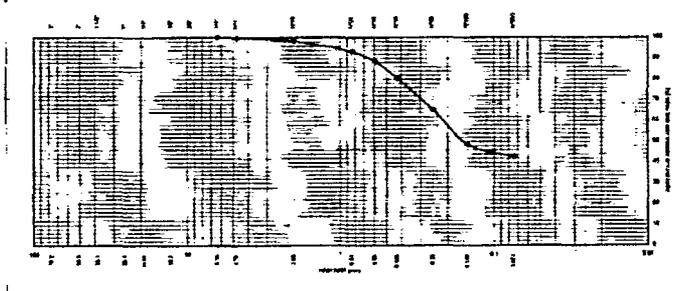
Muestra : M-8

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Tamiz	Abertura (mm)	(%)		Pasa
		Parcial	Reten	
3"	76.200	-	-	
2"	50.300	-	-	
1 1/2"	38.100	-	-	
1"	25.400	-	-	
3/4"	19.050	-	-	
1/2"	12.700	-	-	
3/8"	9.525	-	-	
1/4"	6.350	-	-	100.0
N°4	4.760	0.2	0.2	99.8
N°10	2.000	1.4	1.8	98.4
N°20	0.840	5.0	6.6	93.4
N°30	0.590	4.9	11.5	88.5
N°40	0.428	7.9	19.4	80.6
N°60	0.250	15.2	34.6	65.4
N°100	0.149	16.6	51.2	48.8
N°200	0.074	6.0	57.2	42.8
- N°200		42.8		

% grava	0.2
% arena	57.1
% finos	42.8

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra remitida e identificada por el Solicitante
Elaboración: Tec. Aldo Chávez U.
Revisión: Bach. Ing. H. Morante V.

MILTHSON NOREÑA VALVERDE.
BACH. ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
LABORATORIO N° 2
MECÁNICA DE SUELOS
JOSE WILFREDO GUTIERREZ LAZARES
ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
UBICACION : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

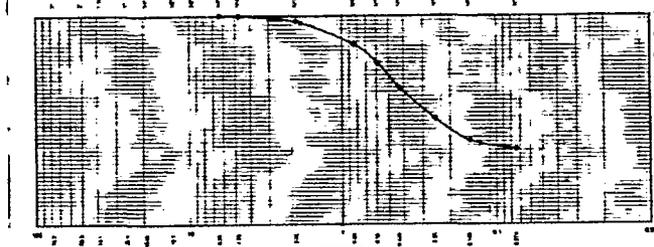
Muestra : M-10

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial	(%) Reten	(%) Pasa
3"	76.200	-	-	
2"	50.300	-	-	
1 1/2"	38.100	-	-	
1"	25.400	-	-	
3/4"	19.050	-	-	
1/2"	12.700	-	-	
3/8"	9.525	-	-	
1/4"	6.350	-	-	100.0
N°4	4.760	0.2	0.2	99.8
N°10	2.000	2.4	2.8	97.4
N°20	0.840	10.9	13.5	86.5
N°30	0.590	9.1	22.6	77.4
N°40	0.426	12.0	34.6	65.4
N°60	0.250	14.8	49.3	50.7
N°100	0.149	10.5	56.8	40.2
N°200	0.074	4.2	63.9	36.1
- N°200		36.1		

% grava	0.2
% arena	63.8
% finos	36.1

CURVA GRANULOMÉTRICA



Note: Muestra remitida e identificada por el Solicitante
Elaboración: Tec. Julio Chávez U.
Revisión: Bach. Ing. H. Novella V.

NILTHSON NORÉNA VALVERDE.
BACH. ING. RESPONSABLE DE ÁREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI

VIS. JOSÉ WILFREDO GUTIÉRREZ AZÁRES
ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
UBICACIÓN : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : M-11

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

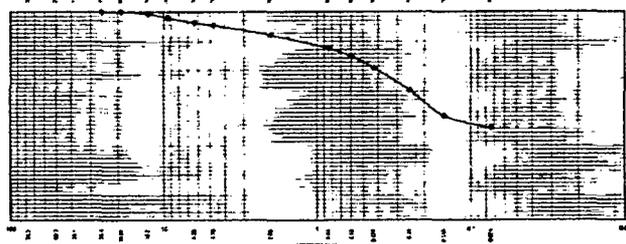
Tamiz	Abertura (mm)	Parcial		Reten		Pasa	
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
3"	76.200	-	-	-	-	-	-
2"	50.300	-	-	-	-	-	-
1 1/2"	38.100	-	-	-	-	-	-
1"	25.400	-	-	-	-	100.0	-
3/4"	19.050	-	-	-	-	100.0	-
1/2"	12.700	0.9	0.9	0.9	99.1	-	-
3/8"	9.525	1.9	2.8	97.2	-	-	-
1/4"	6.350	2.3	5.1	94.9	-	-	-
N°4	4.750	1.2	6.4	93.8	-	-	-
N°10	2.000	4.6	11.0	89.0	-	-	-
N°20	0.840	6.3	17.2	82.8	-	-	-
N°30	0.590	4.1	21.4	78.6	-	-	-
N°40	0.425	5.7	27.0	73.0	-	-	-
N°60	0.250	10.5	37.6	62.4	-	-	-
N°100	0.149	12.2	49.8	50.2	-	-	-
N°200	0.074	5.7	55.5	44.5	-	-	-
- N°200		44.5					

% grava	6.4
% arena	49.1
% finos	44.5

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido (%)	19.22
Límite Plástico (%)	NP
Índice Plástico (%)	NP

Clasificación SUCS ASTM D2487 : SM

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra recibida e identificada por el Solicitante
Elaboración: Tec. Julio Chávez U.
Revisión: Bach. Ing. N. Moreña V.

NILTHSON MOREÑA VALVERDE.
BACH. ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI

JOSE WILFREDO GUDÉRREZ LAZARES
ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
UBICACION : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : M-12

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

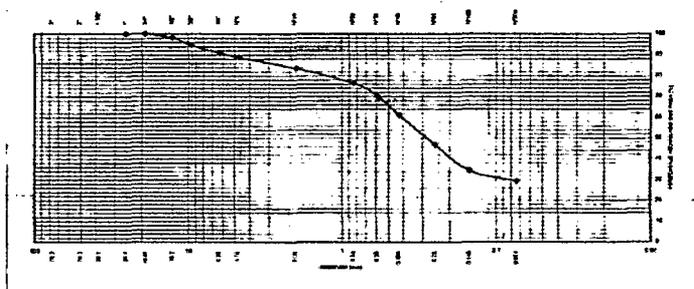
Tamiz	Abertura (mm)	(%)		Pasa
		Parcial	Reten	
3"	76.200	-	-	
2"	50.300	-	-	
1 1/2"	38.100	-	-	
1"	25.400	-	-	100.0
3/4"	19.050	-	-	100.0
1/2"	12.700	1.8	1.8	98.2
3/8"	9.525	3.6	5.4	94.6
1/4"	6.350	3.4	8.8	91.2
N°4	4.750	2.3	11.1	88.9
N°10	2.000	5.2	16.2	83.8
N°20	0.840	7.3	23.5	76.5
N°30	0.590	6.1	29.6	70.4
N°40	0.428	9.0	38.6	61.4
N°60	0.250	14.4	53.0	47.0
N°100	0.149	12.5	65.5	34.5
N°200	0.074	5.0	70.5	29.5
- N°200			29.5	

% grava	: 11.1
% arena	: 58.5
% finos	: 29.5

LÍMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido (%)	: 18.7
Límite Plástico (%)	: NP
Índice Plástico (%)	: NP

Clasificación SUCS ASTM D2487 : SM

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Tec. Julio Chávez U
Revisión : Bach. Ing. N. Noriega V.

NILTHSON NORIEGA VALVERDE.
BACH. ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
LABORATORIO N° 2
Mecánica de Suelos
JOSÉ WILFREDO GUTIÉRREZ LAZARES
ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil, Roberto Cáceres Izquierdo ;
PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
UBICACION : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : M-13

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

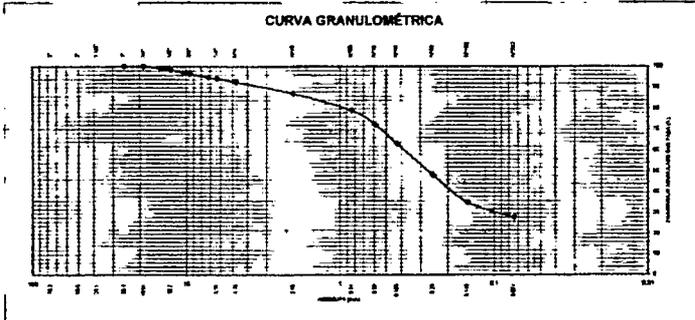
Tamiz	Abertura (mm)	%	
		Parcial	Reten Pasa
3"	76.200	-	-
2"	50.300	-	-
1 1/2"	38.100	-	-
1"	25.400	-	100.0
3/4"	19.050	-	100.0
1/2"	12.700	1.8	1.8 98.2
3/8"	9.525	1.8	3.7 96.3
1/4"	6.350	2.2	5.8 94.2
Nº4	4.760	1.7	7.6 92.4
Nº10	2.000	5.3	12.9 87.1
Nº20	0.840	8.0	21.0 79.0
Nº30	0.590	8.9	27.8 72.2
Nº40	0.426	9.1	36.9 63.1
Nº60	0.250	14.9	51.7 48.3
Nº100	0.149	13.1	64.8 35.2
Nº200	0.074	7.2	72.0 28.0
- Nº200		28.0	

% grava	7.6
% arena	64.4
% finos	28.0

LIMITE DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido (%)	20.96
Límite Plástico (%)	NP
Índice Plástico (%)	NP

Clasificación SUCS ASTM D2487 : SM

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra remitida e identificada por el Solicitante
Elaboración: Tec. Julio Chávez U.
Revisión: Bach. Ing. N. Noréna V.

NILTONSON NORÉNA VALVERDE.
BACH. ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI

ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos
Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITANTE : Bach. Ing. Civil, Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un modelo de Simulación de Lluvias
UBICACION : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

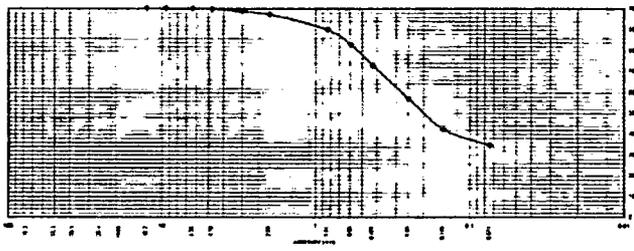
Muestra : M-14

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial	(%) Reten	(%) Pasa
3"	76.200	-	-	-
2"	50.800	-	-	-
1 1/2"	38.100	-	-	-
1"	25.400	-	-	-
3/4"	19.050	-	-	-
1/2"	12.700	-	-	100.0
3/8"	9.525	-	-	100.0
1/4"	6.350	0.2	0.2	99.8
N°4	4.750	0.2	0.4	99.6
N°10	2.000	2.4	2.8	97.2
N°20	0.840	7.3	10.2	89.8
N°30	0.590	7.2	17.3	82.7
N°40	0.425	10.0	27.3	72.7
N°60	0.250	15.8	43.1	56.9
N°100	0.149	14.6	57.7	42.3
N°200	0.074	7.6	65.3	34.7
- N°200		34.7		

% grava :	0.4
% arena :	64.9
% finos :	34.7

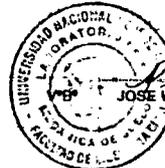
CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra recibida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Tec. Julio Chávez U.
Revisión : Bach. Ing. N. Noreña V.

NILTONSON NOREÑA VALVERDE.
BACH. ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



JOSE WILFREDO GUTIERREZ LAZARES
ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITADO : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un Modelo de Simulación de Lluvias
UBICACIÓN : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

I. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Muestra M -11

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.04457	26.15
0.03184	23.24
0.02030	21.21
0.01452	18.36
0.01198	16.15
0.00863	13.71
0.00608	9.65
0.00308	7.26
0.00131	5.00

RESULTADOS :

Gravas (%)	: 6.4
Arenas (%)	: 49.1
Limos (%)	: 37.2
Arcillas y Coloides (%)	: 7.3

CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	13.2
ASTM D 2216	
LIMITE LIQUIDO (%)	19.22
ASTM D4318	
LIMITE PLASTICO (%)	NP
ASTM D4318	
INDICE PLASTICO (%)	NP
CLASIFICACION SUCS	SM

Muestra Remitida e Identificada por el solicitante

Revisado por : Tac. Julio Chávez U.
Revisado por : Ing. N. Noreña V.

NILTON NOREÑA VALVERDE
ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



JOSE WILFREDO GUTIERREZ LAZARES
ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITADO : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un Modelo de Simulación de Lluvias
UBICACIÓN : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

I. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Muestra M -12

Díámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.04481	15.84
0.03201	14.67
0.02045	13.44
0.01462	12.17
0.01210	10.66
0.00866	8.75
0.00611	7.14
0.00311	4.16
0.00131	3.03

RESULTADOS :

Gravas (%)	: 11.1
Arenas (%)	: 59.5
Limos (%)	: 25.3
Arcillas y Coloides (%)	: 4.2

LIMITE LIQUIDO (%)	18.70
ASTM D4318	
LIMITE PLASTICO (%)	NP
ASTM D4318	
INDICE PLASTICO (%)	NP
CLASIFICACION SUCS	SM

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Realizado por : Tec. Julio Chávez U.

Revisado por : Ing. N. Moreña V.

NILTONSON MOREÑA VALVERDE

ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI



ING. JEFE DEL LABORATORIO

Lab. de Mecánica de Suelos UNI



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Lima 100 - Perú Teléfono: (51-14) 811070 Anexo 308 - Telefax: 3813842

INFORME N° S08-056

SOLICITADO : Bach. Ing. Civil. Roberto Cáceres Izquierdo
PROYECTO : Diseño y Construcción de un Modelo de Simulación de Lluvias
UBICACIÓN : Laboratorio Nacional de Hidráulica
FECHA : 29 de Febrero del 2008

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

I. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Muestra M-13

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.04279	10.87
0.03056	10.16
0.01954	9.44
0.01396	8.69
0.01155	7.75
0.00828	6.81
0.00590	5.87
0.00295	3.57
0.00125	2.41

RESULTADOS :
Gravas (%) : 7.6
Arenas (%) : 64.4
Limos (%) : 24.4
Arcillas y Coloides (%) : 3.6

LIMITE LIQUIDO (%) : 20.96
ASTM D4318
LIMITE PLASTICO (%) : NP
ASTM D4318
INDICE PLASTICO (%) : NP
CLASIFICACION SUCS : SM

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Realizado por : Tec. Julio Chávez U.
Revisado por : Ing. N. Noreña V.


NILTONSON NOREÑA VALVERDE
ING. RESPONSABLE DE AREA
Lab. de Mecánica de Suelos UNI




JOSÉ WILFREDO GUTIERREZ LAZARES
ING. JEFE DEL LABORATORIO
Lab. de Mecánica de Suelos UNI

ANEXO F

Fertilización de la Parcela Experimental

F. Fertilización de la Parcela Experimental

Se decidió ejecutar este proceso de fertilización de la parcela de pruebas debido a que el suelo utilizado originalmente tenía una fertilidad muy baja, puesto que provenían del sub suelo de un área cercana. En la primera oportunidad que se sembró las semillas del pasto de la variedad Bermuda para el experimento solo se obtuvo una germinación del 5%.

En vista de lo ocurrido se decide mejorar ostensiblemente la calidad del substrato con la adición de fertilizantes para el incremento de los niveles de Nitrógeno, Fósforo, Potasio y humus de lombriz mejorando la textura del suelo, además de incrementar de manera significativa la materia orgánica del mismo. Los componentes que aportan estos insumos son los siguientes:

Tabla F.1. Componentes nutritivos aportados y sus respectivos valores medios

Componentes	Valores medios
Nitrógeno	1.95 - 2.2%
Fósforo	0.23 - 1.8%
Potasio	1.07 - 1.5%
Calcio	2.70 - 4.8%
Magnesio	0.3 - 0.81%
Hierro disponible	75 mg/l
Cobre	89 mg/kg
Zinc	125 mg/kg
Manganeso	455 mg/kg
Boro	57.8 mg/kg
Carbono Orgánico	22.53%
C/N	11.55%
Ácidos Húmicos	2.57 g Eq/100g
Hongos	1500 c/g
Levaduras	10 c/g
Actinomicetos total	170.000.000 c/g
Act. Quitinasa	100 c/g
Bacterias aeróbicas	460.000.000 c/g
Bact. Anaeróbicas	450.000 c/g
Relación aer/anaerob.	1.:1000

Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo. Lombricultura S.C.I.C

Aporte de materia orgánica

La cantidad de humus de lombriz utilizado ha sido de 4 sacos de 20 Kg. para cada una de las dos parcelas estudiadas haciendo un total de 160Kg. en total.

Cada una de las parcelas contiene una cantidad de sustrato de 2200 Kg. haciendo un total de 4400 Kg. entre ambas.

La adición de 160 Kg. de humus equivale a elevar el porcentaje de materia orgánica, inicialmente en un valor muy cercano a cero, hasta 3.27% que es un nivel promedio de las tierras agrícolas donde crecen pastos, árboles, arbustos, matorrales, etc.

Para este cálculo se ha considerado que el humus aporta un 90% de materia orgánica constituyendo el restante 10 % el agua y diversos elementos minerales nutritivos como el Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Boro (B), Carbono (C), etc. Esto quiere decir que se han aportado 144 Kg. de Materia orgánica para 4,400 Kg. de sustrato, lo que significa el 3.27%.

Aporte de fertilizantes

En lo que se refiere a fertilizantes se ha adicionado solo a la parcela donde se va a sembrar el pasto tal como se describe a continuación:

- **PRIMER ABONAMIENTO (a la siembra):** 1 Kg. de abono compuesto por 10-10-10 % de N, P, K y 1/8 Kg. de Urea de 46% de N. Lo que equivale a aportar 100 gramos de unidades asimilables de Nitrógeno, fósforo y Potasio además de 57.5 gramos de Nitrógeno procedente de la Urea.
- **SEGUNDO ABONAMIENTO (a los 25 días):** 1/8 Kg. de Urea con 46% de N, lo que equivale a aportar otros 57.5 gramos de Nitrógeno.
- **TOTAL DE FERTILIZANTES:**

Nitrógeno (N)	:	215 gr.
Fosforo (P)	:	100 gr.
Potasio (K)	:	100 gr.

- **FORMULA DE ABONAMIENTO:** De acuerdo a las Unidades Asimilables adicionadas al substrato suelo, la formula de abonamiento que se ha aplicado es la siguiente:

215	100	100
Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Potasio (K)

Que es una fórmula de abonamiento promedio para la instalación de pastos y otros cultivos.