

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL



Profesor Patrocinante: Álvaro Julio Suazo Schwencke.

**“COMPARACIÓN DE LA EROSIÓN EN TALUDES
DESPROTEGIDOS DE PENDIENTE BAJA CON
DIFERENTES TIPOS DE PERFIL”**

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero Civil**

RODOLFO ANIBAL ANTONIO TRONCOSO MUÑOZ

Concepción, Marzo 2014.

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres quienes siempre creyeron en mí y me otorgaron las herramientas para salir adelante, a quienes no solo les debo mi educación, sino que también una formación llena de valores y amor.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por protegerme y darme fuerzas y quien ha puesto el camino para lograr mi objetivo. “Confía en Dios con todo tu corazón, y no te apoyes en tu propia inteligencia”.

A mis padres: Rodolfo Troncoso Castro y Marlene Muñoz Caballol, quienes han sido guía y apoyo, que gracias a su esfuerzo y constante preocupación he llegado al final de esta etapa. Gracias por su entrega incondicional que siempre han sabido demostrar en cada instante de mi vida. Agradezco también a toda mi familia, la que se ha mantenido unida por el cariño y ha sabido demostrar su entera preocupación junto con compartir las alegrías por cada logro obtenido.

Al cuerpo docente de la universidad en especial del departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, que han brindado sus conocimientos y herramientas para mi formación profesional. También agradecer al personal administrativo del departamento por su disposición y ayuda a lo largo de este proceso.

Como no agradecer a los amigos que se han formado en estos seis años de carrera: Álvaro, Felipe, Katherine, Manuel, Mariano y tantos más, con los cuales he compartido innumerables momentos de alegría, ansiedad estrés y logros. Agradecer especialmente a Álvaro y a mi amigo Andrés, por su apoyo en la realización de los experimentos para este estudio.

Junto con esto quiero agradecer a mis amigos, ya que siempre han brindado su amistad y ayuda en este proceso.

Rodolfo Troncoso Muñoz.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1.- INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1.- Objetivos | 4 |
| 1.1.1.- Objetivo General | 4 |
| 1.1.2.- Objetivos Específicos | 4 |
| 2.- EROSIÓN Y MORFOLOGÍA DE TALUDES | 5 |
| 2.1.- Proceso de erosión de suelos por acción pluvial | 5 |
| 2.2.- Factor antropogénico..... | 6 |
| 2.3.- Geomorfología | 7 |
| 2.4.- Evolución de morfología de taludes..... | 7 |
| 2.4.1.- Segmentos convexos | 7 |
| 2.4.2.- Segmentos cóncavos | 8 |
| 2.4.3.- Segmentos rectos..... | 8 |
| 2.4.4.- Segmentos compuestos | 8 |
| 3.- ANTECEDENTES DE TALUDES REALES | 8 |
| 3.1.- Ribera río Andalién | 9 |
| 3.2.- Talud Urbano en zona de Penco..... | 10 |
| 3.3.- Talud en enlace Penco..... | 11 |
| 3.4.- Análisis de los taludes observados | 11 |
| 4.- METODOLOGÍA DE LA ETAPA EXPERIMENTAL | 12 |
| 4.1.- Lisímetros..... | 12 |
| 4.2.- Suelo experimentado | 14 |
| 4.3.- Método de compactación y perfilado..... | 14 |
| 4.4.- Control de características del suelo en el talud | 15 |
| 4.5.- Sistema de Lluvia Artificial | 16 |

| | |
|--|----|
| 4.6.- Medición de material erodado en el talud | 16 |
| 4.7.- Clavos de erosión (erosion pins) | 17 |
| 4.8.- Procedimiento de Ensayos | 18 |
| 4.9.- Metodología del análisis estadístico..... | 20 |
| 5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS | 21 |
| 5.1.- Análisis de clavos de erosión | 21 |
| 5.2.- Control de densidad y humedad..... | 22 |
| 5.3.- Material erodado en el canal | 22 |
| 5.4.- Material en suspensión..... | 23 |
| 5.5.- Material total erodado | 24 |
| 5.6.- Análisis estadístico..... | 24 |
| 6.- CONCLUSIONES | 26 |
| 7.- OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES | 27 |
| BIBLIOGRAFÍA | 28 |
| ANEXO A | 31 |
| A.1.- Diseño de lisímetros | 31 |
| A.2.- Elementos de recolección y funcionamiento..... | 31 |
| ANEXO B | 33 |
| B.1.- Diseño de sistema de lluvia artificial..... | 33 |
| ANEXO C | 34 |
| C.1.- Resultados clavos de erosión..... | 34 |
| ANEXO D | 35 |
| D.1.- Control de densidad y humedad | 36 |

“COMPARACIÓN DE LA EROSIÓN EN TALUDES DESPROTEGIDOS DE PENDIENTE BAJA CON DIFERENTES TIPOS DE PERFIL”

Rodolfo Aníbal Antonio Troncoso Muñoz

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

rodotroncoso@outlook.com

Álvaro Julio Suazo Schwencke

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

En el presente estudio se analizan y comparan tres tipos de perfiles de taludes desprotegidos, para de esta forma analizar si este factor tiene implicancia con la pérdida de suelo a causa de la erosión hídrica por acción pluvial. Para esto se dispone de tres lisímetros, cada uno con diferentes curvas: uno de los perfiles es recto y los otros dos constan de secciones verticalmente curvas, de forma cóncava y convexa.

No obstante, éstas poseen la misma pendiente media la cual es del 25%. Los lisímetros son sometidos a una lluvia erosiva, la cual es generada mediante un sistema de lluvia artificial, el cual genera la degradación y remoción del suelo en la superficie del talud donde estos sedimentos perdidos del lisímetro serán cuantificados. Estos datos serán cotejados por pruebas comparativas entre los distintos tipos de perfil mediante un análisis estadístico no paramétrico. Los resultados que arrojó el estudio muestran que el talud de superficie cóncava fue el que tuvo mayor resistencia frente a la lluvia, pues fue el que presentó la menor cantidad de material erodado.

Palabras claves: Erosión hídrica, Talud desprotegido, Perfiles de talud.

Número de palabras: $6145 + 250 \cdot 15 = 9895$.

“COMPARISON ON THE EROSION OF LOW-GRADIENT UNPROTECTED SLOPES WITH DIFFERENT PROFILE TYPES”

Rodolfo Aníbal Antonio Troncoso Muñoz

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

rodotroncoso@outlook.com

Álvaro Julio Suazo Schwencke

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío-Bío

asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

In the present study, three kinds of profiles of unprotected slopes are analyzed and compared, in a way to investigate whether this factor has implication in the soil loss because of the rainfall erosion. For this, there are three lysimeters, each one with different curves: one of the profiles is straight and the other two have vertically curved sections, which are concave and convex.

Nevertheless, these possess the same average gradient, which is 25%. Lysimeters are subject to erosive rain that is generated through a sprinkler system. This produces deterioration and removal of the soil in the surface of the slope where these sediments will be quantified. These data will be collated by comparative tests among the diverse kinds of profiles through non-parametric statistical analysis. The results of the study show that the slope of the concave surface was the one that had better resistance against rain, since it presented smaller quantity of eroded material.

Keywords: Rainfall erosion, unprotected slope, profiles of slopes.

1.- INTRODUCCIÓN

En la ingeniería los taludes son cualquier superficie que está inclinada con respecto a la horizontal, con estructura de roca o, como la presente investigación, de suelo. Estos pueden ser naturales, los que son formados por la naturaleza a través de su historia geológica, o artificiales, los cuales son creados por el hombre, cuyo propósito son para la construcción de obras tales como carreteras, represas, líneas de ferrocarriles u otras construcciones que necesiten cortar en forma lateral una fracción del suelo. El diseño de taludes es uno de los aspectos de mayor importancia en la Geotecnia, pues está presente en la mayoría de las obras constructivas y extractivas de la Ingeniería civil.

La erosión del suelo es el proceso de remoción de material superficial debido al viento, hielo o el agua, en este último, el proceso se presenta gracias a su presencia en forma pluvial o de escorrentía, que al contacto con el suelo vencen la resistencia de las partículas del suelo, cohesión y fricción, generándose este proceso (Duque, 2002). Esto se puede ver de forma clara en taludes de la zona, provocada por las grandes precipitaciones de la región, junto con la poca, o a veces nula, protección posterior a su construcción.

Existen diversos modos que se emplean para controlar el fenómeno de erosión en taludes, que principalmente, se encargan de cubrir la superficie del talud para así evitar el contacto directo con las precipitaciones y de esa forma evitar la pérdida de suelo. Estas soluciones pueden ser tales como cubiertas vegetales, cubiertas de hormigón, geotextiles u otros, en conjunto, además, con canaletas entre las bermas intermedias que poseen los taludes.

Actualmente, existen variados métodos de medición para la pérdida de suelos, tales como, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo “Universal Soil Loss Equation” (USLE) o bien, la USLE modificada (MUSLE), que se diferencian en su propósito, ya que la primera hace una estimación promediada a largo plazo y la última calcula el aporte de sedimento para un evento singular. Para ambas ecuaciones se trabaja con una pendiente media, es decir, no se considera la morfología que puede tener esta pendiente (Wischmeier et al., 1978).

En la práctica se ha observado que taludes planos desprotegidos se transforman en cóncavos a causa de la erosión provocada por la lluvia. Se hace necesario determinar el grado de modificación

del material erodado de taludes desprotegidos, con distintos tipos de perfiles, pero con una misma pendiente media.

En el presente estudio se realiza una comparación experimental entre distintos tipos de perfiles de taludes, con equivalente pendiente media, la cantidad de material erosionado y la forma que adopta posterior a la lluvia.

1.1.- Objetivos

1.1.1.- Objetivo General

- Analizar el efecto de la erosión en distintos tipos de perfiles de taludes desprotegidos a través de la experimentación de distintos perfiles con igual pendiente media.

1.1.2.- Objetivos Específicos

- Observar en terreno los taludes que poseen perfiles desprotegidos ya existentes, para determinar la forma que adoptaron debido a la erosión.
- Registrar de forma experimental la cantidad de material erodado de taludes con distintos perfiles.
- Relacionar la pérdida de material de los perfiles que se realizaron en forma experimental con los perfiles de los taludes observados en terreno.

2.- EROSIÓN Y MORFOLOGÍA DE TALUDES

En el presente capítulo se muestra las principales características y parámetros necesarios para comprender el proceso de erosión hídrica que produce principalmente la lluvia junto también con la escorrentía que se forma sobre la superficie debido a la acción pluvial. Ésta puede ser muy perjudicial para el suelo o los taludes, como es el caso, pudiendo incluso generar fallas más grandes en el talud (Figura 1). Además se muestra las características y morfología que posee el suelo natural, para así entender de mejor forma el comportamiento y evolución de los taludes al ser afectados por agentes climáticos, principalmente la lluvia.



Figura 1: Talud erodado, Obra en rivera de río Andalién (Fuente: Elaboración propia)

2.1.- Proceso de erosión de suelos por acción pluvial

La erosión pluvial de suelos es la acción de degradación, transporte y depositación de las partículas de éste, a causa de las precipitaciones. Cuando las gotas de lluvia impactan en la superficie disgregan partículas del suelo. La magnitud depende del tamaño y velocidad con el que cae la gota. Las partículas de suelo arrastradas por el escurrimiento superficial, que se produce luego de que la precipitación venza la capacidad de infiltración de almacenamiento superficial del suelo (Tarbuck, 2005).

Cuando ya disminuye la velocidad del escurrimiento ocurre la depositación de las partículas que se degradaron y transportaron. Estos se van depositando dependiendo el tamaño de la partícula quedando más alejado el material fino y en una menor distancia el material arenoso.

2.2.- Factor antropogénico

Un elemento que influye de gran manera como causante de erosión es el factor humano, pues el hombre al intervenir sobre los suelos removiendo el estrato vegetal, lo que produce una erosión acelerada. Al cambiar de vegetación, como lo es el paso de vegetación nativa a cultivos, se produce un aumento a la erosión, lo que provoca que el suelo pierda nutrientes haciéndolo infértil e inservible, produciéndose un fenómeno conocido como desertificación.

También depende mucho del tipo de vegetación que se encuentre en la zona, pues los árboles absorben mucha agua y en su ausencia esta corre en la superficie. Además las hojas y el resto de la vegetación influyen de forma protectora ya que la gota de lluvia impacta sobre éstos. También controla la escorrentía, ya que la vegetación produce que la velocidad de corriente de agua sea menor.

Se puede apreciar este fenómeno de forma clara en la construcción de taludes pues por ausencia de la cubierta vegetal junto con el gran aumento de la pendiente del suelo, sumándole la nueva superficie expuesta a la atmosfera, hace que los taludes sean bastante vulnerable al fenómeno de erosión.

También uno de los de los daños que produce la erosión de suelos es la desertificación, la cual se conoce como el que un territorio que no posee condiciones climáticas de desierto, termina adquiriendo la característica de éstos. Según datos del Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (PNUMA), el 35% de la superficie de los continentes puede considerarse como áreas desérticas (Costa, 2009).

2.3.- Geomorfología

La geomorfología, del griego geos (tierra), morfeé (forma) y logos (estudio y conocimiento) es la rama de la geografía física, que tiene como objeto, tal y como su nombre lo señala, el estudio de las formas de la geografía terrestre. Suarez (2002) define la geomorfología como el estudio de las formas de la superficie de la tierra, su origen, los procesos relacionados con su desarrollo y las propiedades de los materiales, con lo cual se puede predecir el comportamiento y el futuro estado.

Para elaborar el modelo de comportamiento de un talud, es determinante analizar la geomorfología y su efecto sobre los procesos de inestabilidad; los procesos actuales y pasados son la base para los procesos que van a ocurrir. Las condiciones geomorfológicas presentes son esenciales en el análisis de la ocurrencia de deslizamientos, debido a que los procesos de vertiente son parte integral de los procesos dinámicos como variables que controlan la evolución del paisaje (Aristizabal et al., 2006).

La geomorfología refleja los procesos que están actuando sobre el talud, así como los paleo-procesos que lo han afectado en el pasado y su relación con la litología y otros elementos constitutivos, no solamente de un talud en particular, sino de todo el ambiente de una zona. Por ejemplo, una ladera afectada por procesos tectónicos (morfología con escarpes empinados) posee una morfología diferente a una afectada principalmente por procesos de depositación (morfología suave u ondulada). El comportamiento de los taludes depende de las características de la geomorfología general del sector.

2.4.- Evolución de morfología de taludes

Gran parte de la superficie terrestre está formada por pendientes. Desde el punto de vista de la geomorfología el tipo y forma de la pendiente de los taludes pueden tener variadas formas, dependiendo del ambiente. La pregunta es; ¿Qué controla la forma de la pendiente?

2.4.1.- Segmentos convexos

Normalmente forman la parte superior de laderas debido a la escorrentía, y la erosión. En el caso de los taludes también suelen formarse en la cabeza del talud, haciéndolo similar a las laderas de cerros y montes.

2.4.2.- Segmentos cóncavos

Se producen principalmente en laderas inferiores debido a la deposición de las partículas del suelo que son arrastradas de la zona superior de la pendiente o talud.

2.4.3.- Segmentos rectos

Normalmente son los segmentos de media ladera, se caracteriza por la remoción o deposición a una velocidad uniforme de los residuos, o bien cuando posee una erosión uniforme y la deposición del sedimento queda fuera de la pendiente.

2.4.4.- Segmentos compuestos

La mayoría de las laderas consisten en una serie de los segmentos visto anteriormente, como por ejemplo y más común, laderas convexas-cóncavas, producidas por las condiciones ya antes mencionadas.

Los taludes normalmente, debido a este arrastre de sedimento que causa la erosión, van transformándose de perfiles rectos y planos a perfiles más bien curvos, que normalmente también causa que su pendiente media vaya disminuyendo progresivamente (Clark, 1982; Chorley, 1984; Dalrymple, 1968).

3.- ANTECEDENTES DE TALUDES REALES

Lo que principalmente se busca con este estudio es la comparación de distintas curvas de taludes. Por este motivo, para determinar los distintos perfiles que se le dan a los experimentos, se compara con taludes desprotegidos ya existentes que hayan sido atacados por la acción de las lluvias.

Entre los taludes estudiados se pueden apreciar tres comportamientos diferentes frente la erosión, aunque estos también varían en el tipo de suelo, altura y tiempo de construcción. No obstante lo anterior, los tres taludes que se presentan a continuación están relativamente en zonas cercanas una de otra, por lo cual las condiciones climáticas a las que están expuestas son las mismas (Figura 2).



Figura 2: Posición geográfica de taludes analizados (Fuente: Google Maps.)

3.1.- Ribera río Andalién

Este talud se encuentra en el sector del río Andalién, y corresponden a las obras que se han realizado en la ribera del río. A pesar de que no tenía más de un año desde su construcción presenta altos niveles de erosión (Figura 1).

Para el estudio se considera como un talud desprotegido, aunque posee una cubierta vegetal de trébol, debido que sólo cubre de forma parcial la superficie del suelo. El talud se encuentra separado por terrazas y como cada segmento presenta un deterioro similar el estudio solo se realiza en la zona superior del mismo. La superficie del suelo se encuentra bastante dañada a causa de la lluvia por lo que se observan cárcavas a lo largo de toda la superficie del talud. La erosión que presenta es evidente pero la curva de su perfil se mantiene recta.

El sedimento que fue arrastrado se puede apreciar claramente en las bermas que posee el talud el cual no es retenido en la pendiente. La erosión es relativamente uniforme en la totalidad del talud, la cual influye para que se mantenga con un perfil, aunque rugoso, plano (Figura 3).



Figura 3: Talud sector río Andalién (Fuente: Elaboración propia)

3.2.- Talud Urbano en zona de Penco

Este talud se encuentra a la entrada de una población nueva para damnificados del tsunami que se encuentra al comienzo de la zona Urbana de Penco en la ruta 150 Concepción-Penco. Aunque este talud al igual que el anterior, era bastante reciente, se encontraba en un estado bastante avanzado de erosión.

El talud no posee berma. Aunque este posee un talud en su parte superior, pero éste se encuentra a una distancia considerable de la cabecera por lo cual se considera como un talud independiente al de arriba.

El talud se encuentra bastante deteriorado a causa de la erosión. Los sedimentos se observan de forma clara y en abundancia en el pie del talud, mas a diferencia del anterior, se logra apreciar una curva convexa (Figura 4).



Figura 4: Talud Erosionado Penco (Fuente: Elaboración propia)

3.3.- Talud en enlace Penco

El talud se encuentra en el enlace de la ruta Itata con la ruta 150 Concepción-Penco. A diferencia de los taludes anteriores este se observa muy poco erosionado puesto que con el tiempo desarrolló una cubierta vegetal. Aún así se aprecia una figura cóncava en muchos sectores del talud.

Este es un talud de bastante altura y con una berma intermedia. Se encuentra una valla en la parte inferior que detiene los sedimentos arrastrados aunque son menores (Figura 5).



Figura 5: Talud poco erosionado, enlace de ruta Itata con ruta 150. (Fuente: Elaboración propia)

3.4.- Análisis de los taludes observados

El objetivo de estas inspecciones visuales es principalmente el analizar el grado y el tipo de curvatura que desarrollaron los taludes al estar expuestos a la acción de la erosión pluvial. Se midió la diferencia que existía en la cabecera, punto medio y pies de los taludes con respecto a la línea recta siguiendo su pendiente, tal y como lo muestra la figura 3. Los datos obtenidos variaron dentro de los mismos taludes, lo que muestra que no existe un tipo de curva definitiva.

También se observa que los diversos taludes frente a distintos grados de erosión, van aumentando su curvatura y perdiendo su pendiente, mas no se observa una curvatura específica de equilibrio sino más bien como un deterioro progresivo.

4.- METODOLOGÍA DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

En esta etapa lo que se busca es definir un procedimiento estandarizado para así lograr un nivel de homogeneidad de parámetros y variables como lo son para este caso el tipo de perfil, compactación, lluvia y tipo de suelo. Se define una serie de casos de estudio para de esta forma responder los objetivos que se proponen en la investigación. Finalmente se requiere realizar los experimentos con una metodología lo más controlada posible, para que así los parámetros sean comparables.

El desarrollo de esta etapa tiene lugar en la Universidad del Bío-Bío, Campus Concepción, en el sector designado para la experimentación en taludes llamado “Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente” (LAGEMA) bajo condiciones ambientales normales en época de verano. Las muestras obtenidas fueron ensayadas en el “Laboratorio de Ingeniería Civil y Ambiental” de la institución.

4.1.- Lisímetros

Para los experimentos, que serán descritos posteriormente, se utiliza el diseño de los lisímetros propuestos por Riquelme (2010) (Ver Anexo A). Se adoptó también las modificaciones propuestas por Hernandez (2011), para la recolección de los sedimentos arrastrados en la evacuación de la escorrentía superficial, que consta básicamente en un aumento en la capacidad del canal de recolección, junto con el aumento del diámetro de la salida de la canaleta colectora (Figura 6). Los lisímetros utilizados tienen una superficie de 1 m^2 aproximadamente con una pendiente media de 25% se decide esta inclinación puesto que estudios ya realizados por los autores ya mencionados se observa que es posible y comparable utilizar pendientes bajas para analizar los efectos de la erosión.

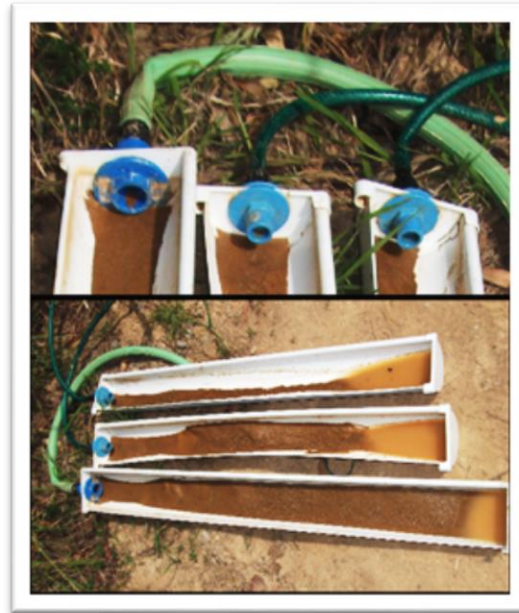


Figura 6: Modificación en el sistema de retención de escorrentía Superficial (Fuente: Hernández, 2011)

Debido a que el estudio tiene por objetivo el analizar los efectos de la erosión y no el analizar la permeabilidad del suelo, se consideró elaborarlos sin la pendiente ni cubierta inferior para que así la evacuación del agua infiltrada sea por el mismo suelo del terreno, que además es el mismo que poseen los lisímetros.

Como lo que se busca es la comparación del comportamiento de distintos tipos de perfil frente a la erosión a causa de la lluvia, es necesario determinar los perfiles utilizados en los ensayos. Para ello es necesario considerar las diversas curvas existentes en la naturaleza y en taludes desprotegidos, según lo observado previamente. Se decide trabajar con una curva cóncava, una convexa y una de forma plana.

Se requiere determinar el grado de curvatura de cada uno de los perfiles curvos: cóncavo y convexo. Como no existe un grado de curvatura definida, es decir no existen parámetros fijos de la suavidad de la curva, ya que existen suaves y cerradas, se considera el uso de un perfil que se encuentre dentro de los parámetros existentes en terreno y que no afecte de forma local o general la pendiente media del talud. Por su tamaño se escoge un arco con una altura máxima o mínima de 4 cm en su punto medio en comparación con un perfil recto, con un radio de giro de 334 cm.

4.2.- Suelo experimentado

El suelo empleado en los experimentos es el que se encuentra en el LAGEMA de la Universidad del Bío-Bío. Los estudios arrojan que el tipo de suelo es una arena limosa (SM), un suelo característico de la región, el cual se encuentra en pendientes medias y altas. Los estudios de Mecánica de Suelos ya se han elaborado en variados estudios pasados donde se ocupó el mismo suelo como Meneses (2012) que fue corroborado en el estudio realizado por López (2012).

Los resultados son:

- Clasificación U.S.C.S: Arena Limosa (SM).
- Densidad compactada seca: 1254 kg/m³.
- Límite líquido: 36%.
- Límite plástico: N.P.
- Índice de plasticidad: N.P.
- Densidad Máxima Compactada Seca (D.M.C.S): 1759 kg/m³.
- Humedad óptima: 14%.

4.3.- Método de compactación y perfilado

Para la preparación del suelo dentro de los lisímetros se opta por una compactación estandarizada para cada experimento, que consta en la misma cantidad de golpes hasta lograr una densidad sobre el 60% de la densidad máxima compactada seca, la cual es 1759 kg/m³. Por el espacio reducido que existe al interior de los lisímetros de 1 m² se compacta con un pisón de madera hasta alcanzar la densidad requerida, la cual será medida in-situ el que es extraído mediante probetas.

Los bordes de los lisímetros poseen las curvas ya definidas, la superficie del suelo debe seguir estas curvas lo cual se logra con una iteración entre la compactación y un barrido de la superficie para eliminar el exceso de suelo, este proceso se repite hasta lograr en forma óptima el perfil deseado (Figura 7).



Figura 7: Perfilado de Lisímetros. Perfil cóncavo (Fuente: Elaboración propia)

4.4.- Control de características del suelo en el talud

Para obtener parámetros y variables controladas se necesita tener un registro de la densidad y un conocimiento de la humedad que posee cada ensayo (Lisímetros). Para ello se optó por un extractor de testigos que logra medir la densidad de la superficial de los taludes a escala de una forma no invasiva. Este extractor consta de un tubo de PVC de 25 mm con diámetro interior de 22 mm, el que es adelgazado en uno de sus extremos, para luego ser insertado en el suelo.

Este extractor fue validado y comparado con el ensayo de densidad in-situ, el que arrojó que el extractor más confiable es el de una profundidad de 25 mm de su punta, con un promedio de error inferior a 5% (Hernández, 2011).

En cada uno de los ensayos a realizar se extraerán cuatro muestras con las probetas ya mencionadas, las cuales serán secadas y pesadas para de esta forma determinar la densidad y humedad que poseía el suelo al momento de los ensayos.

4.5.- Sistema de Lluvia Artificial

Para recrear una lluvia que tenga carácter erosivo y debido a la época de escasa lluvia en el que se realiza la experiencia, es necesario recurrir al sistema de lluvia artificial (Anexo B). Las principales características del sistema son las siguientes:

- La presión de trabajo utilizado es de 0,5 bar, para controlar el caudal a través del manómetro.
- Manguera de ½” con perforaciones con separación de 5 cm.
- Diámetro de perforación de 0,5 mm.
- Altura de la estructura 3,2 m
- Tiempo de precipitación de 5 minutos.

Para la obtención de la cantidad de precipitación se utiliza la metodología utilizada por Hernández (2013). Se obtiene un caudal cuya presión es de 0,5 bar (por la logística es lo máximo que se utilizará), la cual se instala un manómetro a una altura de 0,6 m y mediante pluviómetros se verifica una precipitación de 295 mm/hr. Por lo que por los 5 minutos de cada ensayo se obtienen 24,5 litros de agua.

4.6.- Medición de material erodado en el talud

Como objetivo de este estudio, lo que se busca es comparar la erosión de entre los taludes, para lo cual se mide la cantidad de material que es arrastrado por el agua. Para ello se medirá la cantidad de material que es arrastrado a causa de la escorrentía.

El material que es removido llega a una canaleta en donde las partículas de mayor tamaño y masa quedan retenidas. Al finalizar la experiencia el suelo de la canaleta es extraído para posteriormente secarlo y pesarlo, para de esta forma obtener la masa de material particulado que es arrastrado.

Los sólidos que no son retenidos en la canaleta y se encuentran en suspensión en el agua, debido a su volumen y masa, son llevados a un bidón (Figura 8), donde se extraerá una porción de agua con el material disuelto para luego ser secado y pesado y así de esta forma obtener la concentración que posee.



Figura 8: Bidón de recolección de sólidos disueltos (Fuente: Elaboración propia)

4.7.- Clavos de erosión (erosion pins)

Una manera simple que existe para medir los cambios en el nivel de la superficie del terreno erosionado, es por medio del método de los clavos de erosión (figura 9) los cuales consisten en clavos de 20 cm de largo, con una goma soldada a su cabeza (García- Chevesich, 2005). La metodología propone la instalación de clavos en forma perpendicular a la superficie del suelo, quedando ésta al mismo nivel de la cabeza. Una vez terminado el tiempo de medición, la que puede ser una tormenta o lluvia abundante, se mide la distancia entre la cabeza y la superficie del suelo.

De una forma análoga se realizará lo mismo sobre la superficie de los lisímetros con 9 clavos de $\frac{3}{4}$ ". Estos no representan una superficie invasiva del terreno. Los clavos se ubican en la zona alta media y baja del talud.



Figura 9: Clavo de erosión en areniscas de Arizona, después del incendio forestal Rodeo-Chediski (Fuente: García-Chevesich, 2005)

4.8.- Procedimiento de Ensayos

El objetivo de los ensayos es medir la erosión hídrica causada por la lluvia de los distintos perfiles de pendiente media similar. Para ello se consideran los siguientes pasos por cada ensayo realizado, propuesto también en estudios anteriores pero con las modificaciones pertinentes para el estudio de este caso:

1. Re-perfilar talud: Lo que es retirar la capa superficial del lisímetro para reemplazarla por otra, la que posee similares condiciones del anterior, para asegurar el nivel de compactación deseada se extraen 6 cm y se compacta en dos capas de 3 cm de forma uniforme.
2. Retirar cuatro testigos de densidad, introduciendo el extractor en el suelo mediante un doble giro de 360° hasta alcanzar la profundidad de 25 mm. Luego se verifica tal profundidad y los testigos son pesados para comprobar la densidad. Los agujeros de los testigos son rellenados de forma manual. Estos son llevados al laboratorio de Ingeniería Civil y Ambiental, donde son secados para así determinar humedades de las muestras.
3. Colocar los nueve clavos de erosión a nivel hasta que su cabeza quede a nivel de talud, estos se ubican de forma uniforme a una distancia de 33 cm aproximadamente uno de otro.
4. Montar el sistema recolector de escorrentía, lo que es el canal con manguera más depósito de mezcla sólido-líquido.

5. Realizar el montaje del simulador de lluvias. Una vez instalado en la posición adecuada se procede a conectar la manguera de alimentación y se abre la llave de paso, se verifica la presión y cuando cae la primera gota en la superficie del lisímetro comienza a correr el tiempo.
6. Una vez transcurrido el tiempo del ensayo, se cierra la llave de alimentación y se desconecta de forma inmediata la manguera al sistema de lluvias, para de esta forma evitar el goteo posterior.
7. Transcurrido un breve periodo para que el material sólido de mayor diámetro se decante, se retira el canal de sedimentos.
8. Extraer el recipiente con mezcla sólido-líquido para ser colocado en una base horizontal.
9. Se extrae la mezcla de la canaleta cuando ya han pasado unos minutos y se coloca en un recipiente para luego ser llevado al laboratorio y determinar su masa (figura 10).
10. Luego se mide la distancia de la cabeza de los clavos de erosión a la superficie del terreno.
11. Se extrae una muestra homogénea de la mezcla sólido-líquido de 50 ml con jeringa y se deposita en un recipiente para luego ser secado y pesado.



Figura 10: Extracción del material de la canaleta (Fuente: Elaboración Propia)

4.9.- Metodología del análisis estadístico

Para el análisis de los datos recogidos, la elección de un buen análisis es trascendental para evitar conclusiones equivocadas, por este motivo es que se decide realizar la prueba de comparación de Wilcoxon, test que proviene de la estadística no paramétrica. Este método permite afirmar si la cantidad de suelo erodado de un talud posee diferencias estadísticamente significativas con las otras curvas.

El método plantea una hipótesis nula (H_0), donde no existen diferencias significativas entre las muestras y una hipótesis alternativa (H_1) donde si existen. (Wilcoxon, 1945, Citado por Martínez 2011).

El nivel de significancia representa la probabilidad de rechazar una hipótesis nula verdadera, matemáticamente se puede considerar cualquier valor entre cero y uno; pero para estudios de pruebas de hipótesis normalmente está entre 0,05 y 0,1.

Los análisis y obtención de datos de las tablas de comparación, se utiliza un software estadístico Infostat versión estudiantil, con un nivel de significancia (p-valor) $<0,05$, por lo tanto, si (p-valor) es menor o igual a 0,05 se acepta H_1 y se rechaza H_0 , por el contrario, si (p-valor) es mayor que 0,05, se acepta H_0 y se rechaza H_1 .

5.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analiza los resultados obtenidos por los ensayos realizados en cada uno de los lisímetros de diferentes perfiles. Las variables de comparación que se utilizó principalmente fue la masa del material erodado, tanto como el material retenido en la canaleta y el material en suspensión del bidón. Los valores obtenidos son analizados y comparados para de esta forma dar solución a los objetivos planteados al inicio de este estudio.

5.1.- Análisis de clavos de erosión

Este modelo de comparación propuesto se utiliza principalmente para observar la pérdida de suelo obtenida en la zona alta, media y baja del lisímetro. De esta forma se tiene una comparación más detallada de la erosión por cada perfil. Sin embargo, los resultados obtenidos en este ensayo no son concluyentes debido a que la medición en el mayor de los casos no arrojó resultados cuantificables (Ver Anexo C). No obstante el método utilizado no se considera un fracaso debido a que facilita la inspección visual de las pérdidas de suelos en las distintas zonas de los perfiles.

Aunque no se observaron mayores diferencias entre los lisímetros experimentados, cabe señalar que se observan diferencias en los clavos inferiores del lisímetro de perfil cóncavo en la mayoría de los casos. A diferencia del resto de los clavos, los inferiores no quedaban expuestos si no que por el contrario, en la mayoría de los casos quedaban enterrados en el sedimento, provocado por el arrastre de material en la zona superior. A pesar de que sí existía erosión en la zona inferior también ésta retenía el material erodado, provocando que llegue menos material a la canaleta. Cuando se observa esta depocitación sobre los clavos, no es posible realizar una medición, debido que la capa que se deposita sobre la cabeza del clavo es demasiado delgada (menor a un milímetro).

También existieron casos en gran parte de los lisímetros o en distintas zonas del talud donde los clavos no presentaron ningún tipo de cambios cuantificables o bien, como ya fue mencionado, se encontraban enterrados a causa del arrastre de sedimento, aunque no era posible una medición por lo delgada de la capa. Esto se producía debido que, en algunos casos, se producen pequeños surquillos generados por la escorrentía y pocas veces pasaban por donde se encontraba uno de estos clavos (ver figura 11).



Figura 11: Izquierda; suelo erosionado pero no es posible realizar medición, Medio: clavo con erosión de 1mm aprox. derecha; clavo con depositación, pero no es posible realizar medición.

(Fuente: Elaboración propia)

5.2.- Control de densidad y humedad

Se registraron las densidades esperadas con las cuales se trabajó, las que fueron de alrededor del 70% +/-10% de la D.M.C.S. en donde las humedades naturales que arrojaron los resultados y con las cuales se realizaron los experimentos, rondaron cercanos al 20% en cada experimento. El detalle de los valores ya mencionado se encuentra en el Anexo D.

5.3.- Material erodado en el canal

El material erodado que se retiene en el canal ubicado a los pies del lisímetro corresponde a partículas con mayor tamaño y peso que son arrastradas por la escorrentía superficial provocada por la lluvia la cantidad de suelo arrastrado. Las distintas cantidades que se retuvieron en los distintos ensayos están arrojadas en la tabla 1 donde se puede apreciar cuanto material retuvo cada tipo de perfil.

La curva que presento diferencias en la cantidad de material retenido fue el perfil cóncavo. Esto debido a que parte del material erodado lo retiene el mismo lisímetro en su superficie ya que por su curvatura se crea una zona de baja pendiente en la zona inferior. En cambio el perfil convexo no parece presentar cambios significativos en la erosión con respecto al perfil plano ya que no representa una disminución aparente en la pérdida de material.

Tabla 1: Material erodado en el canal

| Ensayo | MATERIAL ERODADO EN CANAL (g) | | |
|--------|-------------------------------|----------------|----------------|
| | Perfil plano | Perfil cóncavo | Perfil convexo |
| 1 | 651,1 | 420,2 | 630,7 |
| 2 | 462,2 | 433,7 | 473,2 |
| 3 | 607,3 | 302,5 | 522,5 |
| 4 | 582,2 | 501,9 | 588,3 |
| 5 | 550,0 | 470,2 | 477,1 |
| 6 | 460,3 | 360 | 442,7 |

Fuente: Elaboración Propia

5.4.- Material en suspensión

El material erodado que se encuentra en suspensión corresponde a partículas de menor tamaño y peso las cuales son retenidas en el canal. Las distintas cantidades que se retuvieron en el bidón se presentan en la tabla 2 donde es posible apreciar cuanto material en suspensión arrastró cada tipo de perfil.

Tabla 2: Material erodado en suspensión en el bidón

| Ensayo | MATERIAL ERODADO EN BIDÓN (g) | | |
|--------|-------------------------------|----------------|----------------|
| | Perfil plano | Perfil cóncavo | Perfil convexo |
| 1 | 237,6 | 152,2 | 257,2 |
| 2 | 142,2 | 166,6 | 166,6 |
| 3 | 189,3 | 148,8 | 150,1 |
| 4 | 179,4 | 188,2 | 146,8 |
| 5 | 169 | 201,5 | 173,3 |
| 6 | 153,6 | 140,9 | 107,1 |

Fuente: Elaboración propia

A diferencia con los datos observados en el canal, en este material no se observan mayores diferencias entre la erosión entre los distintos perfiles.

5.5.- Material total erodado

El total del material erodado corresponde a la suma del material erodado precipitado que es el que se encontraba en el canal y el que se extrajo del bidón, el material en suspensión. Los resultados de la erosión en total se expresan en la tabla 3.

Tabla 3: Total de material erodado en los lisímetros

| Ensayo | MATERIAL ERODADO TOTAL (g) | | |
|--------|----------------------------|----------------|----------------|
| | Perfil plano | Perfil cóncavo | Perfil convexo |
| 1 | 888,7 | 572,4 | 887,9 |
| 2 | 604,4 | 600,3 | 639,8 |
| 3 | 796,6 | 451,3 | 672,6 |
| 4 | 761,6 | 690,1 | 735,1 |
| 5 | 719 | 671,7 | 650,4 |
| 6 | 613,9 | 500,9 | 549,8 |

Fuente: Elaboración Propia

Aún se mantiene que el lisímetro que registra menor cantidad de material erodado es el que posee un perfil cóncavo.

5.6.- Análisis estadístico

A continuación se procede a comparar el efecto de la erosión sobre los distintos perfiles, para lo cual se aplica al material erodado total, se considera comparar el perfil plano con los perfiles curvos así como también el efecto entre ambos lisímetros con curvatura, realizado con la prueba de comparación de Wilcoxon (Tabla 4).

Tabla 4: Comparación de Experimentos de erosión entre los distintos perfiles

| Comparación | | N | Media (dif) | DE (dif) | p-valor |
|-------------|---------|---|-------------|----------|---------|
| Plano | Convexo | 6 | 41,43 | 4,69 | 0,5887 |
| Plano | Cóncavo | 6 | 149,58 | 15,93 | 0,026 |
| Cóncavo | Convexo | 6 | 108,15 | 114,05 | 0,1797 |

Fuente: Elaboración Propia

Para la comparación entre los perfiles planos versus los de curva convexa, el p-valor encontrado es mayor al p-valor asumido (p-valor <0,05) lo que según el criterio ya mencionado se asume la hipótesis nula (H_0) que indica que no existen diferencias significativas entre estas dos experiencias. Ello quiere decir que no hay mayores diferencias estadísticas con respecto a la erosión y pérdida de suelos al utilizar en un perfil plano o convexo.

En forma análoga, en la comparación entre perfiles planos y cóncavos se indica que el material erodado de estos dos presenta diferencias estadísticamente significativas, de esta forma, se puede asumir que el talud con curvatura cóncava se comporta mejor frente la erosión, lo que refleja una menor pérdida de material.

Los resultados obtenidos al comparar ambos taludes curvos se acoge la hipótesis nula, lo que quiere decir que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ambos perfiles. A pesar de que el talud convexo no presenta grandes cambios versus el de forma plana, tampoco los presenta hacia el perfil cóncavo. Esto debido a que en el perfil convexo también se apreció disminución de la erosión pero en una menor escala.

6.- CONCLUSIONES

Los taludes desprotegidos que existen tienden a una disminución de su pendiente debido a la acción climática a la que están expuestos. Junto con esto al menos un 65% de los taludes desprotegidos adoptan algún tipo de curvatura vertical en su superficie, como también se puede apreciar en las pendientes que se pueden encontrar en la naturaleza, ya que casi la totalidad de ellas poseen curvas en su longitud vertical.

Los experimentos que resultan con menor pérdida de suelo debido a la erosión hídrica son los que se realizan con un perfil cóncavo, en los cuales se observa una disminución promedio del 20% en la pérdida de material. Esto sucede debido a que estos perfiles poseen una pendiente menor en su zona inferior, lo cual ayuda a la retención dentro del mismo talud de parte de las partículas más gruesas de sedimento que arrastra la escorrentía, proveniente de la zona superior del lisímetro.

Las diferencias que se obtienen entre el perfil convexo y el perfil plano, es una leve disminución en la erosión del primer lisímetro, con un promedio del 6% en la disminución en la pérdida de sedimentos, los cuales no resultan cambios estadísticamente significativos. Por ello se puede asumir que ambos se comportan en forma similar frente la acción de la lluvia. Cabe señalar que se observó una erosión menor en la zona superior del perfil cóncavo, lo cual obedece la teoría de que la pérdida de suelos es proporcional a la pendiente que ésta posea, pero como ya fue mencionado, la pendiente media no se vio afectada. A pesar de la leve disminución de erosión en dicha zona del talud cóncavo, no hubo grandes cambios en el total de material erodado entre estos dos perfiles.

Con los datos obtenidos sería razonable deducir que una forma para el control de la erosión sin la utilización de recubrimiento es el perfil cóncavo. Sin embargo, este perfil obtuvo una disminución en el material erodado debido a la retención de partículas dentro de su misma superficie, es decir, no hubo una disminución real en la erosión, esto se puede observar en los clavos de erosión de la zona inferior, los cuales resultaron enterrados por el sedimento. Lo cual también es observado en terreno, pues la curvatura adoptada por los taludes que se encuentran desprotegidos se debe a la remoción y la depositación, por lo tanto no resulta un método de control de erosión sino más bien un efecto de la acción de esta misma, disminuyendo en parte la cantidad de material perdido, no obstante éste fenómeno continuará hasta la destrucción del talud.

7.- OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

En el tiempo que se aplicaba la lluvia al lisímetro de perfil plano, no se observó que este adoptara alguna curva. Por el contrario, éste mantuvo su perfil plano a diferencia como ocurre con las pendientes que se observan en la naturaleza. Esto se puede explicar ya que el talud experimentado al no tener una continuidad de suelo al terminar su cabeza, se genera escorrentía casi despreciable en esta zona. Por ello no tiende a generar la curvatura cóncava característica que se observan en la zona superior de las pendientes planas. Tampoco se generó superficies curvas en su pie debido a que el sedimento no se depositaba sobre el suelo sin pendiente, sino que iban a la canaleta recolectora.

En los taludes desprotegidos de la zona se observaban a distinta escala notorios daños producidos a causa de la erosión. Se puede apreciar también que gran parte del material que había sido arrastrado o perdido a causa de la escorrentía, se encontraba a los pies del talud, o sus terrazas en el caso de taludes más altos, es decir, el material perdido no se encontraba tan lejano y en algunos casos la depositación observada era tal que podía alcanzar capas de varios centímetros. Un fenómeno parecido fue lo que ocurrió en el perfil cóncavo, que debido a su disminución de pendiente en la zona baja, la velocidad de depositación de sedimentos era mayor a la de remoción en esa zona, lo que a largo o mediano plazo se reflejaría en una disminución de pendiente más acelerada, en comparación con el resto de los perfiles.

Se puede afirmar que la aplicación de curvaturas ayudaría a disminuir la erosión en pendientes, debido además porque es la forma que el suelo adopta en la naturaleza. Sin embargo no quiere decir que el suelo sólo tienda a adoptar la curva propiamente tal, sino que también a disminuir su pendiente media a lo largo que se ve afectado frente a la acción pluvial, tal y como sucedió en taludes observados. Por lo anterior para la construcción de un talud no sería razonable el administrarle algún grado de curvatura para la ayudar al control de la erosión, si no que más bien un método para la disminución de la erosión, para su control sería recomendado algún tipo de recubrimiento o cubierta vegetal.

BIBLIOGRAFÍA

- Aristizabal E., Yokota S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburra. Revista N°149 vol. 73 de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Colombia
- Chorley, R.J., Schumm, S.A., Sugden, D.E., (1984). Geomorphology. Methuen and Co. Ltd., London.
- Clark, M.J., and Small, R.J., (1982), Slopes and weathering. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Estrada M, Bonafeu S., Ferrer R., Roger E., Costa V. (2009). Ciències de la terra i del medi ambient. Ed. Castellnou, Barcelona, España.
- Conacher, A. J., Dalrymple, J.B. (1968), An hypothetical nine unit landsurface model, England.
- Duque, G. E., (1998). Capítulo 16 Movimientos Masales Manual De Geologia Para Ingenieros. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. 24p.
- Garcia-Chevesich, P., (2009). Erosion processes and control, Departamentr Of Agricultural and Biosystems Engieneering, The University of Arizona.
- Hernández, D. (2011). Influencia de la pendiente y la precipitación en la erosión de taludes desprotegidos. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.

- Meneses, A. (2011). Estudio de la erosión hídrica en taludes sembrados con trébol enano durante el otoño. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Riquelme, C. (2010). Diseño de lisímetros para estudiar la erosión hídrica en taludes a escala. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Suarez. J., (2002). Deslizamientos y análisis geotécnico, Ed. Brusden, Colombia.
- Tarbuck, E. J. and Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la Tierra, 8ª edición. Pearson Educación S. A., Madrid.
- Wilcoxon, F. (1945) Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics* 1, 80-83.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA-SEA, US. Govt. Printing Office, Washington, DC.

ANEXOS

ANEXO A

A continuación se muestran los diseños de los lisímetros que se utilizaron para la etapa experimental de este estudio.

A.1.- Diseño de lisímetros

El diseño que se utilizó es el diseño de Riquelme (2010), no obstante se le realizaron algunas modificaciones tanto como para mejorar la resistencia del lisímetro al empuje que genera el propio suelo, como también modificaciones prácticas para el estudio, como lo fue la eliminación del fondo del lisímetro debido a que no se estudiaría el fenómeno de infiltración.

Un cambio menor que se realizó fue en los perfiles de los lisímetros, ya que a estos se les brindó las curvas que se requerían para el perfilado de cada talud.

Los materiales que se utilizaron en la elaboración de los lisímetros, se describen a continuación:

- Placas de OSB Estructural utilizados en el cuerpo de los lisímetros, los cuales fueron unidos por refuerzos interiores.
- Pino dimensionado 2x2” se utiliza para reforzar las uniones de la madera OSB tanto como en el interior de los lisímetros como en el exterior. También se utilizaron otros tipos de maderas dimensionados para los refuerzos exteriores, para evitar un colapso de la estructura.
- Clavos de 2 ½” para refuerzos interiores junto con clavos de 4” para los refuerzos exteriores.

A.2.- Elementos de recolección y funcionamiento

Son aquellos que se utilizaron para permitir la funcionabilidad de los lisímetros, las características de los ya mencionaos elementos se describen posteriormente.

- Canaleta de PVC, ubicado en cada lisímetro en la parte delantera donde se recoge el caudal de escorrentía superficial que se produce por la pendiente del talud.
- Ganchos de Canaleta, ubicados en los extremos de la parte delantera de cada lisímetro que ayudan a soportar las canaletas de PVC.
- Tapas de Canaleta, ubicados en los extremos de la canaleta para sellar la canaleta y contener el agua producida por el caudal de escorrentía y suelo degradado producto del arrastre.
- Conexión de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada, ubicada en el sistema de recolección de flujo superficial y que une una tapa de la canaleta, con una manguera de $\frac{3}{4}$ pulgada la cual se conecta al bidón plástico de 25 litros.
- Manguera de $\frac{3}{4}$ de pulgada, la cual es utilizada para conducir las aguas a los bidones receptores del flujo erodado.
- Pegamento de PVC, para unir todos los elementos de la canaleta, para evitar posibles fugas de agua.
- Bidones de 5 litros, ubicadas bajo los tubos de PVC, para poder medir y cuantificar el flujo de infiltración que se producirá en el suelo que contiene el lisímetro.
- Bidones Receptores, con una capacidad para almacenar de 25 litros ubicados en la zona de recolección de flujo superficial.

ANEXO B

A continuación se muestra el diseño del sistema de lluvia artificial.

B.1.- Diseño de sistema de lluvia artificial

El diseño fue realizado por Hernández (2011) el cual consta de una estructura de madera de 1,2 m por 1,2 m el cual se distribuyen cuatro líneas de aspersion en forma uniforme separadas por 20 cm. Estas últimas están elaboradas con un circuito de manguera de 13 mm de diámetro, el cual está perforada cada 30 mm con un orificio de diámetro de 0,5 mm.

El sistema es alimentado por una manguera conectada a una llave de paso, cuyo caudal se regula mediante el control de la presión utilizando para esto un manómetro el cual se reguló a 0,5 bar, para lograr el caudal requerido se controla directamente con el nivel de apertura que se le da a la llave de alimentación. Este sistema está ubicado sobre una estructura que lo eleva a 3.2 metros sobre el nivel del suelo. A esta se le instaló una cubierta de polietileno transparente en tres de las cuatro caras para proteger la lluvia de la acción del viento debido a que los experimentos se realizaron a la intemperie y de esta forma asegurar que la lluvia caiga sobre la superficie de los lisímetros.



Figura 12: Sistema de lluvia artificial (Fuente: Hernández, 2011)

ANEXO C

El presente Anexo muestra los datos obtenidos por los clavos de erosión utilizados en los experimentos realizados.

C.1.- Resultados clavos de erosión

Los valores expresados en la siguiente tabla muestran la distancia entre la cabeza del clavo y la superficie del terreno, que es producida a causa de la pérdida de suelo que es arrastrada por la lluvia. Cuando no existe diferencias aparecerá con la sigla “NP” (no presenta). No se utilizó el valor cero debido a que en muchos casos se encontraban enterradas.

A continuación se muestra la tabla con los datos obtenidos donde se muestra el número de ensayo y los valores obtenidos, donde los prefijos de cada número indican el perfil en cual se trabajó:

CC: perfil cóncavo.

CV: perfil convexo.

PL: perfil plano.

Clavos:

Clavo d.: Clavo derecho.

Clavo m.: Clavo medio.

Clavo i: Clavo izquierdo.

Tabla 5: Resultados clavos de erosión

| Ensayo | Zona superior | | | Zona media | | | Zona baja | | |
|--------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Clavo d. (mm) | Clavo m. (mm) | Clavo i. (cm) | Clavo d. (mm) | Clavo m. (mm) | Clavo i. (cm) | Clavo d. (mm) | Clavo m. (mm) | Clavo i. (cm) |
| cc1 | NP | 1 | 2 | NP | NP | 2 | NP* | NP* | NP |
| cc2 | 1 | NP | NP | NP | NP | NP | NP* | NP | NP* |
| cc3 | NP | NP | NP | NP | NP | 1 | NP* | NP* | NP |
| cc4 | NP | 1 | NP | 2 | NP | NP | NP* | NP* | NP* |
| cc5 | 1 | 2 | NP | NP | 1 | NP | NP* | NP | NP* |
| Cc6 | NP | NP | NP | 1 | NP | 2 | NP* | 1 | NP |
| cv1 | NP | NP | NP | 1 | 2 | NP | 2 | NP | 3 |
| cv2 | NP | NP | 1 | 2 | NP | 3 | NP | 1 | NP |
| cv3 | 1 | NP | NP | NP* | 1 | NP | NP | 2 | NP* |
| cv4 | NP | NP | 1 | NP | NP | NP | NP | NP | 3 |
| cv5 | NP | 2 | NP | NP | 2 | NP | 2 | 2 | NP |
| Cv6 | 3 | NP | 4 | NP | 3 | 4 | NP | 3 | 1 |
| pl1 | NP | NP | NP | 2 | NP | NP | NP* | NP | 2 |
| pl2 | NP | NP | 1 | NP* | NP | 2 | 1 | NP | NP |
| pl3 | 1 | NP | 2 | NP | NP | NP | 1 | 2 | NP |
| pl4 | 1 | 1 | NP | NP | 1 | NP | NP | NP | NP* |
| Pl5 | NP | NP | NP | 2 | NP | NP* | 3 | NP | NP |
| Pl6 | NP | 2 | NP | NP | 2 | NP | 1 | NP | 1 |

Fuente: Elaboración propia

Donde NP son los datos que no es posible cuantificar la diferencia del material ya que es menor a 1 mm y donde NP* tampoco es posible la medición por la misma razón, sin embargo se observa que el clavo de erosión se encuentra levemente cubierto por acción de la depositación.

ANEXO D

A continuación se mostrará los valores que se obtuvieron en los ensayos realizados in-situ de extracción de testigos, cuyo objetivo era poseer y controlar las densidades y humedades con las cual se realizaron los experimentos.

D.1.- Control de densidad y humedad

Se muestra la tabla con los datos obtenidos donde se muestra el número de ensayo y los valores obtenidos, donde los prefijos de cada número indican el perfil en cual se trabajó:

Tabla 6: Control de densidad in-situ y humedad

| Ensayo | masa húmeda (g) | masa seca (g) | Humedad (%) | Densidad (g/cm ²) | % D.M.C.S |
|--------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------------|-----------|
| cc1 | 50,7 | 40,1 | 21% | 1,335 | 76% |
| cc2 | 52,1 | 42,8 | 18% | 1,372 | 78% |
| cc3 | 49,5 | 41,1 | 17% | 1,304 | 74% |
| cc4 | 52,6 | 40,5 | 23% | 1,384 | 79% |
| cc5 | 49,4 | 40,6 | 18% | 1,302 | 74% |
| Cc6 | 53,2 | 42,7 | 20% | 1,400 | 80% |
| cv1 | 53,6 | 42,9 | 20% | 1,411 | 80% |
| cv2 | 51,5 | 41,8 | 19% | 1,356 | 77% |
| cv3 | 50,2 | 41,7 | 17% | 1,322 | 75% |
| cv4 | 51,5 | 40,7 | 21% | 1,355 | 77% |
| cv5 | 49,5 | 39,6 | 20% | 1,303 | 74% |
| cv6 | 54,2 | 43,4 | 20% | 1,426 | 81% |
| pl1 | 49,4 | 39,6 | 20% | 1,302 | 74% |
| pl2 | 45,7 | 38,0 | 17% | 1,204 | 68% |
| pl3 | 52,7 | 43,3 | 18% | 1,388 | 79% |
| pl4 | 52,1 | 41,2 | 21% | 1,372 | 78% |
| pl5 | 52,6 | 40,5 | 23% | 1,384 | 79% |
| pl6 | 49,3 | 39,9 | 19% | 1,297 | 74% |

Fuente: Elaboración propia