

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke



**INFLUENCIA DE LA HUMEDAD
INICIAL EN LA EROSIÓN HÍDRICA DE
UN TALUD.**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para optar al título de Ingeniero Civil

VÍCTOR JOSÉ PARDO BARRERA

CONCEPCIÓN, MARZO 2014

NOMENCLATURA

LAGEMA Laboratorio de Geotecnia y Medioambiente, Departamento de Ingeniería Civil.
Universidad del Bío –Bío.

USCS Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

USLE Ecuación universal de pérdida de suelo.

DMCS Densidad Máxima Compactada Seca.

NCH Norma Chilena.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1: INTRODUCCIÓN.....	3
1.1.- Objetivos.....	4
1.1.1 Objetivo General.....	4
1.1.2 Objetivos Específicos.....	4
1.2.- Alcances del trabajo.....	5
1.3.- Organización de trabajo.....	5
2: EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO.....	6
2.1.- Principales factores que afectan la erosión hídrica.....	8
2.1.1 Erosividad.....	8
2.1.2 Erodabilidad.....	8
2.1.3 Topografía.....	9
2.1.4 Cobertura.....	9
2.1.5 Control de la erosión.....	10
2.2.- Condiciones que modifican la erodabilidad.....	10
a).- Nivel de compactación.....	10
b).- Capacidad de infiltración.....	10
c).- Humedad inicial.....	11
2.3.- Estimación de efectos de la humedad en la erosión.....	11
2.3.1 Efecto del gradiente y el aspecto de la pendiente en la erosión.....	12
2.3.2 Incidencia de la condición inicial en la erodabilidad de un suelo.....	12
2.3.3 Relación lluvia-deslizamiento en la estabilidad de taludes.....	13
3: METODOLOGÍA.....	14
3.1.- Lisímetros.....	14
3.2.- Estudio del suelo.....	15
a).- Extractor de testigos de suelo.....	15
b).- Método de llenado y compactación del suelo en lisímetros.....	15
3.3.- Simulador de lluvia.....	16
3.4.- Casos de estudio.....	17
3.5.- Procedimiento de ensayo.....	17
3.6.- Métodos de análisis de resultados.....	18
4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	19
4.1.- Material erodado.....	19
4.2.- Escorrentía superficial.....	21
4.3.- Densidades.....	24
5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	26
Bibliografía.....	27
Anexo A: Formas de erosión hídrica.....	29
Anexo B: Mecánica de suelos.....	31
Anexo C: Cálculo de intensidad.....	34
Anexo D: Resultados.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Erosión por impacto.....	7
Figura 2: Esquema lisímetro.....	14
Figura 3: Simulador de lluvia.....	16
Figura 4: Casos de estudio.....	17
Figura 5: Material erodado para ensayos con distinta duración.....	19
Figura 6: Material erodado para distintas humedades.....	21
Figura 7: Escorrentía superficial para ensayos con distinta duración.....	22
Figura 8: Escorrentía superficial para distintas humedades.....	23
Figura 9: Densidad seca para distintas humedades.....	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados prueba para la duración de la lluvia	20
Tabla 2: Resultados prueba de los signos para humedad inicial	23
Tabla 3: Precipitaciones transformadas en escorrentía superficial.....	24
Tabla 4: Prueba de Wilcoxon para humedad inicial.....	25

INFLUENCIA DE LA HUMEDAD INICIAL EN LA EROSIÓN HÍDRICA DE UN TALUD.

VÍCTOR JOSÉ PARDO BARRERA

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

vpardo@alumnos.ubiobio.cl

ÁLVARO SUAZO SCHWENCKE

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

asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo la cuantificación del efecto de la humedad inicial en la erosión hídrica de taludes de baja pendiente, cuando se ven enfrentados a determinadas condiciones de precipitaciones. En este caso las precipitaciones serán de carácter artificial ya que la experiencia fue realizada en meses de primavera.

La investigación se realizó mediante el estudio de tres lisímetros a escala, de 1 m², con una pendiente de 25%, los que fueron llenados con arena limosa, uno de los suelos más característicos de la región del Biobío.

La experiencia se basó principalmente en el análisis de la cantidad de material arrastrado y la escorrentía superficial, para cuatro distintos rangos de humedad y tres distintas duraciones de las precipitaciones.

Se realizaron pruebas estadísticas no paramétricas a los resultados obtenidos. Finalmente se determinó que estadísticamente existe diferencia entre el material arrastrado y escorrentía superficial para los distintos rangos de humedad inicial utilizados, siendo el rango más alto de humedad inicial el que presentó una mayor cantidad de material arrastrado.

Palabras claves: Erosión hídrica, lisímetros, material erodado, escorrentía.

Número de palabras: $6.157 + 13 \cdot 250 = 9.407$ palabras.

INFLUENCE OF INITIAL SOIL WATER CONTENT IN RAINFALL EROSION OF A SLOPE.

VÍCTOR JOSÉ PARDO BARRERA

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

vpardo@alumnos.ubiobio.cl

ÁLVARO SUAZO SCHWENCKE

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

asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

The present study is a contribution to the quantification of the effect of initial moisture in water erosion of low slope when faced with certain conditions of precipitation. In this case the rainfall will be artificial as experience was made in months of spring.

The research was conducted by studying three lysimeters scale of 1 m² with a slope of 25 % which were filled with silty sand, one of the most characteristic soils of the region of Biobío.

The experience was based mainly in the analysis of the amount of entrained material and surface runoff for four different ranges of moisture and three different lengths of precipitation.

Nonparametric tests to the results statistics were performed. Finally it was determined there is statistically difference between the entrained material and surface runoff for the different initial moisture ranges used, being the highest initial moisture range the one that had a higher amount of material dragged.

Keywords: erosion, lysimeters, material dragged, surface runoff.

1: INTRODUCCIÓN

La erosión es uno de los problemas más grandes de los suelos a nivel mundial, donde afecta principalmente a la agronomía. En Chile la erosión es un gran problema que afecta a las carreteras por su gran extensión. A nivel local, en la Región del Bío-Bío la erosión afecta de manera significativa a los taludes, principalmente por la gran cantidad de lluvias, que llegan a los 1000 mm anuales, porque aproximadamente el 70% se concentra entre los meses de mayo a agosto y el suelo se encuentra altamente meteorizado y desprotegido en gran parte de la región.

Dentro de las causantes de la erosión en Chile, la hídrica es la más importante y corresponde a un proceso complejo, el cual comprende la desagregación del suelo por impacto de la gota de lluvia, el desprendimiento por el flujo superficial de agua, y el transporte por salpicado o por escurrimiento (Meyer & Harmon, 1984).

Para estimar la pérdida de suelos es posible utilizar la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelos (USLE) o la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE), en las cuales se considera como factores la lluvia, la erodabilidad del suelo, topografía, cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelos. Sin embargo, entre sus factores no se encuentra la humedad inicial. Hudson (1997) destaca que el contenido de humedad inicial de agua del suelo es relevante en la erosión. La presencia de una alta humedad inicial alteró algunos resultados en la investigación de López (2005) puesto que no estaba considerada como un factor.

Maldonado (2010), desarrollo un estudio por medio de un ensayo de goteo sobre probetas y determinó que la humedad inicial de un suelo tiene directa influencia en la erodabilidad del mismo.

En modelos de estabilidad de taludes se utiliza una relación entre la precipitación inmediata y la precedente (Ramírez, 2010), lo que reflejaría los efectos de la humedad inicial. Se han realizado estudios sobre la erosión en taludes, como Hernández (2011) que determinó la influencia de la pendiente y la intensidad de lluvia en la erosión hídrica de un talud desprotegido. Sin embargo, no incluyen la humedad inicial como un factor a considerar. El presente proyecto de título está enfocado en determinar la importancia de la humedad inicial en la erosión hídrica de un talud. Para ello se utilizarán taludes a escala diseñados por Riquelme (2010).

1.1 OBJETIVOS.

1.1.1 Objetivo general.

Analizar la influencia de la humedad inicial del suelo en la erosión hídrica de un talud en forma experimental.

1.1.2 Objetivos específicos.

- a)** Determinar el material erodado de un talud a escala sometido a diferentes humedades iniciales.

- b)** Verificar la erodabilidad de un talud a escala con distintas humedades iniciales sometido a diferentes duraciones en las precipitaciones.

- c)** Comparar el escurrimiento superficial para distintas humedades iniciales.

- d)** Determinar el efecto del escurrimiento superficial en la cantidad de material erodado.

1.2 Alcances del trabajo.

Para cumplir los objetivos del presente proyecto de título es necesario definir los alcances y limitaciones del mismo. Para simular los taludes se utilizaron los lisímetros diseñados por Riquelme (2010), los cuales tienen una pendiente constante. Para aplicar la lluvia se usó el simulador de lluvia diseñado por Hernández (2011), el cual si bien no permite simular una tormenta característica de la región, ofrece las mismas características de lluvia para todos los ensayos, permitiendo su comparación. La erosión se comparó mediante el peso del material erodado en los ensayos y la escorrentía superficial se contrastó por los volúmenes de agua recolectados.

2: EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO

La erosión es un fenómeno complejo que básicamente consiste en la disgregación o meteorización de un suelo o de un material rocoso por la acción de agentes atmosféricos, y la posterior denudación por arrastre de las partículas disgregadas (Bascuñán, 2010). Se refiere al desgaste de la superficie terrestre bajo la acción de los agentes erosivos, siendo los principales el viento y el agua. Por las características del presente proyecto de título se detallará sólo la erosión hídrica.

El agua es el agente que produce la denominada erosión hídrica, que actúa a través de dos mecanismos: el impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía superficial, que se da cuando el agua de lluvia al caer al suelo en lugar de infiltrarse o acumularse escurre sobre la superficie, pudiendo producir estos dos mecanismos disgregación y desplazamiento de partículas (De La Cruz, 2010). La erosión hídrica es el principal agente de la erosión en los taludes sin cobertura vegetal, ya que éstos están totalmente desprotegidos para soportar los impactos de las gotas de lluvia (más detalles en el anexo A).

a) Erosión por impacto.

La erosión por impacto se produce por la energía cinética de las gotas de agua que pueden alcanzar velocidades de 4 a 9 m/s dependiendo de su tamaño. Cada impacto de gota disgrega el suelo esparciendo sus partículas.

En cuanto al efecto de gotas de lluvia sobre el desprendimiento de partículas, se ha determinado que los suelos más vulnerables son aquellos cuyos tamaños medios de partículas están entre 0,063 y 0,250 mm, correspondiente a arenas finas. Los suelos más gruesos son más resistentes por el peso de las partículas, mientras que los suelos más finos son más resistentes debido a que el efecto de la gota debe vencer los enlaces químicos existentes entre los minerales que conforman las arcillas (Verdugo, 2007). En la figura 1 se representa el daño que causa la caída de una gota.

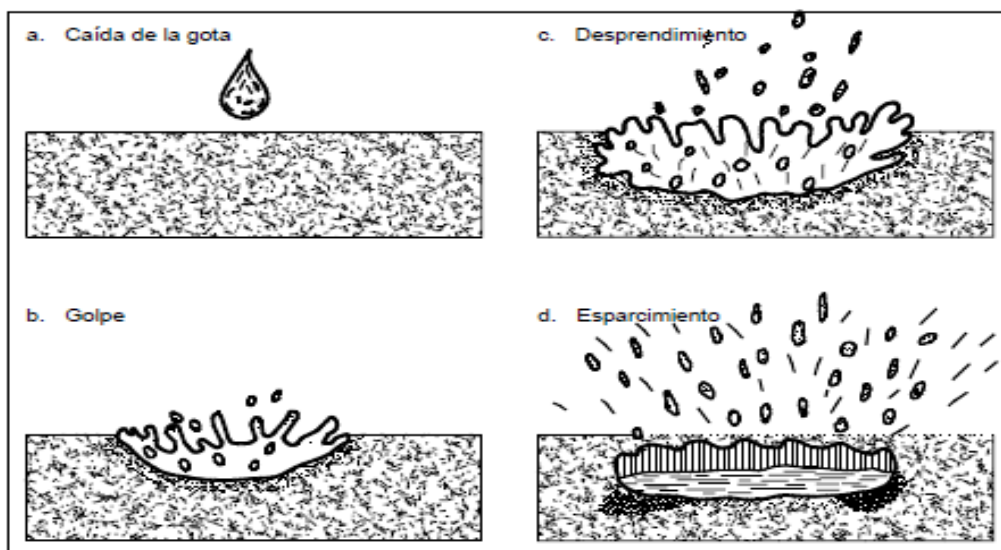


Figura 1: Erosión por impacto (Fuente: Maldonado 2010).

b) Erosión por escorrentía.

El escurrimiento superficial ocurre en pendientes cuando la capacidad de infiltración o la humedad máxima del suelo han sido superadas.

El factor más importante en cuanto a relaciones hidráulicas, es la velocidad del flujo. Debido a la resistencia inherente del suelo, la velocidad del flujo (que ejerce un esfuerzo de corte sobre el suelo) debe alcanzar un umbral antes de iniciar la erosión. Básicamente el desprendimiento se produce cuando las fuerzas ejercidas por el flujo superan las fuerzas que la mantienen en reposo. El umbral de corte se define como la velocidad del flujo que produce un esfuerzo de corte ejercido sobre una superficie, suficiente para comenzar el transporte de las partículas de dicha superficie (Bascuñán, 2010).

La erosión por escorrentía depende de varios factores naturales del suelo tales como la textura, permeabilidad, estructura del suelo, entre otras características físicas. Además depende de las características ligadas a la morfología del suelo (pendiente del terreno) y características ligadas al clima (régimen de precipitaciones y tormentas) (Rodríguez, 2005 citado por Espinoza, 2012).

2.1 Principales factores que afectan la erosión hídrica.

Los factores que influyen en la erosión hídrica son principalmente erosividad, erodabilidad, topografía, cobertura y las condiciones iniciales del terreno.

USLE es el acrónimo para Universal Soil Loss Equation, es decir, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Esta ecuación se desarrolló hacia 1930 por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de EEUU.

La USLE expresa el promedio de las pérdidas anuales de suelo a largo plazo (A), bajo usos y manejos de suelo específicos. Es una ecuación estocástica, no válida para un año concreto ni para un evento particular. La ecuación está dada por el producto lineal de seis factores independientes, como se señala a continuación:

$$A=R*K*L*S*C*P \text{ ecuación 1}$$

2.1.1 Erosividad (R).

Se define la erosividad de un clima determinado como la capacidad potencial para provocar la erosión. Es función de las características físicas de la lluvia. La erosividad de una tormenta es función de su intensidad, duración, y de la masa, diámetro y velocidad de las gotas de lluvia (Morgan, 1997).

Las pérdidas de suelo están estrechamente relacionadas con los niveles de precipitación en parte por el efecto del impacto de las gotas de agua en el desprendimiento de suelo, y en parte por su contribución a la generación de escurrimiento superficial (Garrido, 2011). La erosión se incrementa con la intensidad y duración de la lluvia. Una suave y prolongada lluvia puede tener la misma energía total que una lluvia de corta duración y más intensa.

2.1.2 Erodabilidad (K).

La erodabilidad define la resistencia del suelo al desprendimiento y al transporte. Aunque la resistencia de un suelo a la erosión depende en parte de su ubicación topográfica, la pendiente, y otros factores, las propiedades del suelo son las más relevantes. La erodabilidad varía con la textura del suelo, la estabilidad del agregado, la resistencia superficial al corte, la capacidad de infiltración y el contenido orgánico y químico (Verdugo, 2007).

De acuerdo a su textura las partículas gruesas del suelo son más resistentes al transporte, debido a las mayores fuerzas requeridas para efectuarlo, y las finas arcillosas son más resistentes debido a su cohesión. Por lo tanto las partículas menos resistentes son las arenas finas y los limos.

2.1.3 Topografía (L y S).

Las variables topográficas más importantes en la erosión hídrica son la pendiente (S) y la longitud (L). La pendiente influye primero en las partículas disgregadas por las gotas de lluvia ya que en un suelo normal éstas se esparcen aleatoriamente, pero al tener una inclinación tienden a desplazarse ladera abajo. Otro efecto es que a mayor pendiente aumenta la velocidad del flujo superficial lo que genera un aumento de la erosión.

Otro factor importante que se desprende de la forma topográfica es el que guarda relación con la capacidad de la vegetación de desarrollarse en forma proporcionalmente inversa al aumento de la pendiente a 45° ya se estima improbable el crecimiento de vegetación en forma natural (Hernández, 2011).

Hernández (2011) verificó el efecto de la pendiente en la producción de sedimentos registrando para la pendiente fuerte (60%) factores de tres y 22 veces sobre las pendientes media (25%) y suave (5%), respectivamente.

2.1.4 Cobertura (C).

La falta de vegetación es uno de los principales factores en erosión hídrica de taludes ya que en su construcción la vegetación es totalmente removida. La vegetación actúa como capa protectora entre la atmósfera y el suelo. Las hojas y tallos absorben parte de la energía de las gotas de lluvia y de los flujos de agua disminuyendo su efecto en los suelos, y los sistemas de raíces mejoran la resistencia del suelo (Morgan, 1997).

Al disminuir la energía cinética de las gotas de agua, la cubierta vegetal protege la estabilidad de los agregados superficiales contra la acción destructora de la lluvia, la cual es muy importante en la resistencia de los agregados del suelo a desintegrarse o romperse frente a la acción del agua (Maldonado, 2010).

2.1.5 Control de la erosión (P).

Prácticas complementarias de control de erosión. Representa la relación esperada de pérdida de suelo entre un terreno con una práctica complementaria (terracea, cultivo en contorno y faja) y una parcela con el mismo cultivo e idénticas condiciones de suelo y topografía, pero sin dicha práctica complementaria (Maldonado, 2010).

2.2 Condiciones que modifican la erodabilidad.

La erodabilidad está fuertemente ligada a las características y condiciones que presenta el terreno, algunas de las cuales se pueden controlar para mejorar la resistencia a la erosión.

a) Nivel de Compactación.

La compactación es un proceso de aumento de la densidad del suelo, lo que genera una disminución en su porosidad y permeabilidad, que a su vez reduce su capacidad de retener agua. El suelo, al perder su capacidad de retención de agua, favorece el aumento de la escorrentía superficial ya que el agua proveniente de lluvias ya no logra infiltrarse en el terreno. Ello genera un aumento en la erosión sobre todo cuando hay pendientes elevadas.

Conforme va aumentando la densidad del suelo el crecimiento de las plantas es menor, las raíces van requiriendo un mayor gasto de energía y su desarrollo se va viendo afectado. Esto se debe especialmente a que una mayor resistencia mecánica del suelo genera una aireación más deficiente, al existir menos cantidad de macroporos, y a una escasa tasa de infiltración del agua (Maldonado, 2010).

b) Capacidad de infiltración.

Se denomina capacidad de infiltración a la velocidad máxima con que el agua penetra en el suelo. La capacidad de infiltración depende de muchos factores principalmente de su índice de poros y humedad, un suelo desagregado y permeable tendrá una capacidad de infiltración mayor que un suelo arcilloso y compacto.

La capacidad de infiltración de un suelo disminuye en función del tiempo, como consecuencia de que los poros del suelo se van saturando.

La capacidad de infiltración es influenciada por el tamaño y estabilidad de los poros y el perfil de suelo. Los suelos con agregados estables mantienen mejor el tamaño de sus poros, mientras los suelos con arcillas expansivas que son inestables con el agua tienden a tener bajas capacidades de infiltración (Verdugo, 2007).

c) Humedad inicial.

Se refiere al contenido de agua presente en el suelo el cual se expresa en porcentajes. Esta condición del suelo afecta la erosión hídrica, ya que el agua presente en el suelo separa las partículas del mismo y así disminuye la fuerza de cohesión entre ellas, lo que genera una disminución de su defensa frente a las gotas de lluvia.

Además una alta humedad favorece el llegar a la saturación del suelo por lo que se alcanza rápidamente a la generación de flujo superficial, lo que finalmente aumenta la erosión.

El contenido de humedad se encuentra relacionado con el comportamiento del suelo y la consistencia. A mayor contenido de humedad el suelo puede pasar por diversas formas de consistencia como lo son: blanda o suave, plástica y pegajosa. Al contrario, cuando el contenido de humedad es bajo el suelo adquiere una consistencia dura o rígida (Maldonado, 2010).

2.3 Estimación de efectos de la humedad en la erosión.

Para incorporar los efectos de la humedad inicial en la USLE, se debe utilizar en el factor de erodabilidad (K) que refleja las características del suelo.

La estimación del factor de erodabilidad K ($\frac{\text{Ton}}{\text{ha} \cdot \text{año}}$) se obtiene por medio de la ecuación empírica de Loch y Rosewell:

$$K = 2,77 M^{1,14} (10^{-7}) (12 - a) + 4,28 (10^{-3}) (b-2) + 3,29(10^{-3}) (c-3) \quad \text{ecuación 2}$$

Donde:

M: Parámetro de fracciones finas ((% limo+% arena muy fina) x (100 % - % arcilla)).

a : Porcentaje de materia orgánica (%)

b : Código de la estructura del suelo del horizonte superficial (1 granular muy fino; 2 granular fino; 3 granular medio a grueso y 4 masivo o de bloque).

c : Código de permeabilidad del perfil (1 rápida; 2 moderada a rápida; 3 moderada; 4 moderada a lenta; 5 lenta y 6 muy lenta).

Para incorporar la humedad inicial habría que agregar un nuevo factor a la ecuación de Loch y Rosewell, pero al ser una ecuación empírica se requeriría una calibración mediante una gran cantidad de ensayos.

2.3.1 Efecto del gradiente y el aspecto de la pendiente en la erosión hídrica de un suelo

López (2005) evaluó el efecto de la pendiente en la erosión hídrica a través de tasas de erosión generadas por lluvias naturales y artificiales. Para ello construyó 9 parcelas de estudio con distintas pendientes. En sus resultados había dos eventos en los cuales las tasas de erosión eran muy superiores llegando a un aumento de más de 10 veces respecto a los demás ensayos. Esto sucedió porque había un tiempo menor en la lluvia precedente lo que generaba un aumento en la humedad inicial del terreno, por lo cual presentaba características más propicias para que ocurra erosión.

2.3.2 Incidencia de la condición inicial en la erodabilidad de un suelo

Maldonado (2010) analizó la influencia de la condición inicial en la erodabilidad de un suelo. Para lo cual utilizó un sistema de goteo que simula la caída de las gotas de lluvia, con frecuencia, tamaño y velocidades constantes, en probetas que representan un volumen de suelo en estado natural. Se establecieron condiciones de variación de la humedad con respecto al nivel de compactación. En los resultados se observa que para tres niveles de compactación la erosión aumenta cuando la humedad inicial es más alta. Sin embargo cuando se aumentó la humedad inicial hasta llegar al límite plástico la erosión es menor, por lo que se concluyó que para valores extremos de humedad, la erodabilidad es menor por efectos de la compactación experimentada o el cambio en la consistencia del suelo para humedades altas.

2.3.3 Relación lluvia-deslizamiento en la estabilidad de taludes

Ramírez (2010) estudió la relación Lluvia - Deslizamiento que se genera en la región, utilizando una recopilación de estudios que han sido elaborados durante años en este campo. Luego de analizar distintos modelos se concluye que existe una relación Lluvia - Deslizamiento y ésta influye de forma directa e indirecta en la estabilidad de taludes. Los factores asociados a esta relación se dividen en dos clases, los que modifican de forma interna la estructura del talud, que incluye los procesos que se generan producto de la infiltración, y los factores que cambian de forma externa la estructura de los mismos como lo hace la escorrentía. Ambas variables son ocasionadas por la precipitación y determinadas por la humedad superficial.

Por las características climáticas de la zona, se puede estudiar la precipitación prestando atención a las lluvias acumuladas y a la intensidad, debido a que la Región del Biobío se caracteriza por tener aumentos de la intensidad en los frentes, o varios días lluviosos que atraviesan esta zona.

3: METODOLOGÍA

La etapa experimental se desarrolla en el Campus Concepción de la Universidad del Bío-Bío, en un sector designado para experimentación en taludes denominado Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente (LAGEMA), bajo condiciones ambientales normales en meses de primavera. Las muestras fueron procesadas en el laboratorio de mecánica de suelos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

El ensayo consiste en simular un talud a escala en un lisímetro de un área efectiva de 1 m^2 y 25% de pendiente, el cual es llenado con suelo con distintas humedades iniciales para posteriormente aplicar una lluvia mediante un simulador de lluvia construido por Hernández (2011). De este ensayo se obtendrá la escorrentía superficial y el material erodado.

Además se desarrolló un procedimiento estandarizado para garantizar una homogeneidad en las variables que se necesitan controlar como son humedad inicial, pendiente, compactación, lluvia, tipo de suelo, entre otras.

3.1 Lisímetros.

Los lisímetros utilizados corresponden a los diseñados por Riquelme (2010) y con las modificaciones de López (2012). Estos son tres y tienen una pendiente de 25% como se observa en la figura 2. Los lisímetros además están en un terreno inclinado 5% hacia atrás para favorecer la evacuación de agua infiltrada. Las canaletas reciben escorrentía con material erodado, al bidón van sólo los excedentes, para evitar pérdidas.

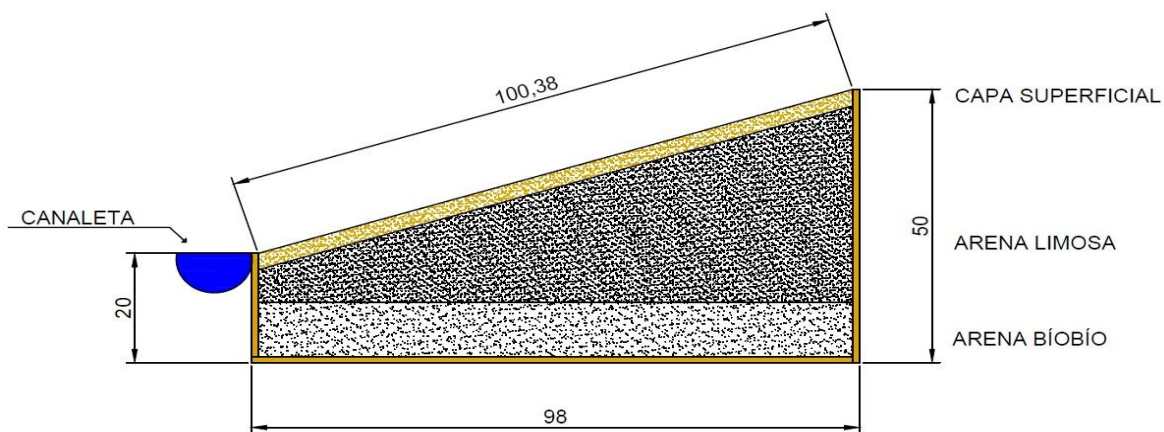


Figura 2: Esquema Lisímetro longitudes en cm (Fuente: Elaboración propia).

3.2 Estudio del suelo.

En lo que respecta al suelo empleado en los ensayos, éste corresponde a una arena limosa que se encuentra en el Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente. Es un suelo característico de la Región del Biobío y ya fue analizado en estudios anteriores (López, 2012). Los resultados son clasificación U.S.C.S.: Arena Limosa (SM), densidad natural húmeda 1583 kg/m^3 , densidad compactada seca 1254 kg/m^3 , humedad natural 26%, límite líquido 42%, límite plástico no presenta, Densidad Máxima Compactada Seca (D.M.C.S) 1768 kg/m^3 y humedad óptima 14%. El estudio de mecánica de suelos se encuentra en el Anexo B.

a) Extractor de testigos de suelo.

La densidad del suelo afecta la cantidad de material erodado (Maldonado, 2010). Para controlar la densidad en los ensayos se utilizó la metodología y calibración realizada por Hernández (2011), la cual consiste en un tubo de PVC de 24,5 mm de diámetro exterior y 22 mm de diámetro interior. Es adelgazado en el extremo que se inserta en el suelo, con la finalidad de disminuir el efecto de borde o de confinamiento sobre la muestra de suelo. Este extractor se inserta a una profundidad de 25 mm en el suelo mediante un doble giro de 360° .

b) Método de llenado y compactación del suelo en lisímetros.

Como los lisímetros ya habían sido utilizados con anterioridad sólo fue necesario reperfilear los primeros 3 centímetros. Están conformados por la siguiente estratigrafía:

- Estrato I (Inferior): 25 kg de arena tipo Biobío, cuya función principal es facilitar el drenaje de las aguas infiltradas y la retención de partículas finas de suelo presentes en ellas (López, 2012).
- Estrato II (Intermedio): Arena limosa (SM), extraída del laboratorio LAGEMA de la Universidad del Biobío y el cual representa un tipo de suelo característico de la región del Biobío (López, 2012).
- Estrato III (Superficial): Estrato de Arena limosa (SM), extraída del laboratorio LAGEMA, el cual tendrá distintas humedades iniciales para cada lisímetro.

Después del reperfilado es necesario compactar hasta alcanzar un 55% de la D.M.C.S. Esto se realiza mediante un pisón manual de peso 5,56 kg. Este parámetro se controla mediante el extractor de testigos explicado anteriormente.

3.3 Simulador de lluvia.

Se utilizó el simulador de lluvia diseñado y construido por Hernández (2011). Sus características son presión de trabajo 0,5 bar, manguera de ½" con perforaciones cada 5 cm, diámetro de perforación de 0,5 mm hecho con la punta de una aguja, manómetro de precisión de 0,1 bar ubicado a una altura de 1,7 metros, altura de la estructura 3,2 m y la intensidad de la lluvia es 162 mm/hr (ver anexo C). En la figura 3 se puede apreciar el simulador utilizado.



Figura 3: Simulador de lluvia. 1) Manguera de alimentación; 2) Bifurcación; 3) Manómetro; 4) Estructura soportante; 5) Sistema de aspersión

(Fuente: Hernández 2011).

3.4 Casos de Estudio.

Las variables que se modificaron en los distintos ensayos fueron dos: humedad inicial y duración de las precipitaciones. Las variables compactación, intensidad de lluvia, pendiente y tipo de suelo se mantendrán constante en todos los ensayos.

Se utilizaron tres duraciones de precipitaciones (5; 7,5 y 10 minutos) y cuatro rangos de humedades (10%; 20%; 30% y 40%) con una tolerancia de $\pm 5\%$.

Esto da un total de ocho casos de estudio los cuales tendrán tres repeticiones, Las distintas combinaciones de casos de estudios se muestran en la figura 4.

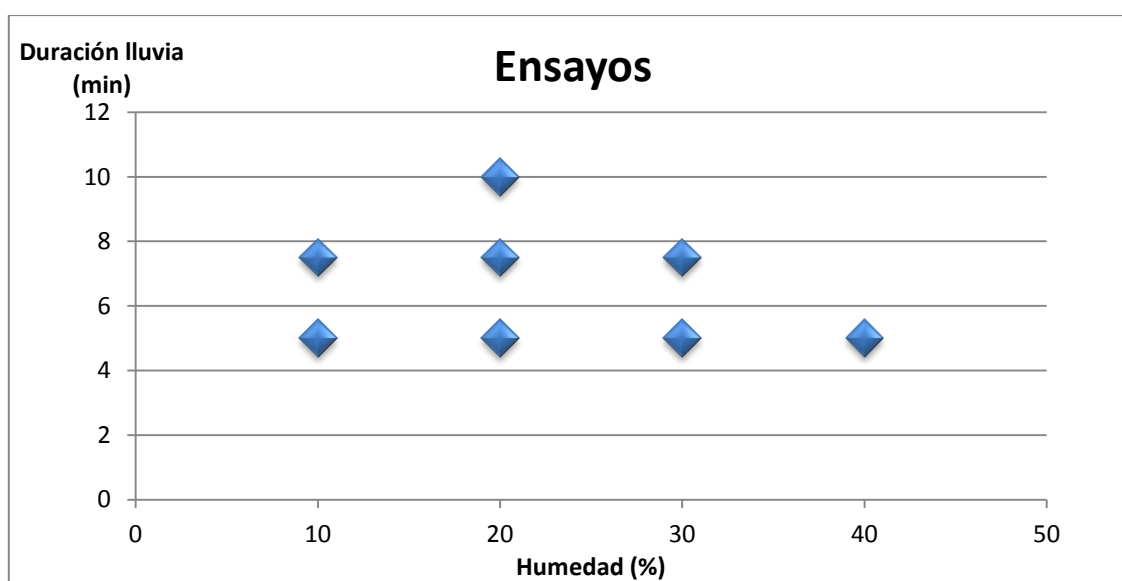


Figura 4: Casos de estudio

(Fuente: Elaboración propia).

3.5 Procedimiento de ensayo.

Antes de realizar el registro de mediciones es necesario tener un procedimiento estandarizado para asegurar que las condiciones sean las mismas en todos los ensayos.

a) Preparación del lisímetro, perfilado y humedad inicial.

b) Control de humedad y densidad.

c) Aplicación de la lluvia.

d) Medición de la escorrentía recolectada en el bidón, posteriormente se traspasa a un balde de diámetro conocido y se mide su altura.

e) Medición del material erodado; se extrae el material depositado en la canaleta para luego ser secado y pesado.

3.6 Métodos de análisis de resultados.

La mayoría de las pruebas estadísticas requieren diversos supuestos sobre la distribución de la población. Pero en este estudio no se justifican tales supuestos por el tamaño de la muestra, por lo que se utilizaron métodos independientes de la distribución de la población.

El método no paramétrico utilizado es la prueba de rangos con signo de Wilcoxon cuando la cantidad es de más de 14 datos, con un nivel de confianza de 95%, la cual busca definir si existe una diferencia entre las muestras, se definieron las siguientes hipótesis:

H0: los datos apareados tienen diferencias que provienen de una población con una mediana igual a cero.

H1: los datos apareados tienen diferencias que provienen de una población con una mediana diferente de cero.

El método utilizado cuando la cantidad de datos es inferior a 14 datos es la prueba de los signos, con un nivel de confianza de 95%, Para obtener los resultados se utilizó una aproximación normal a la distribución binominal.

Para la aplicación de la prueba de los signos se definieron las hipótesis: nula (H0) y alternativa (H1):

H0: Las muestras provienen de la misma población

H1: Las muestras son de distintas poblaciones.

4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Material erodado

En la figura 5 se observa el incremento del material erodado a medida que aumenta la humedad inicial. Para el tiempo 5 minutos los aumentos en comparación al rango de humedad de 13%, son de 50%, 150% y 400%, para los rangos de humedad inicial de 19%, 32% y 40%, respectivamente. El aumento en el material erodado muestra una tendencia exponencial con una correlación de 0,88. La cual se ajusta mejor que la tendencia lineal con una correlación de 0,74. Para los ensayos de 7,5 minutos los aumentos en relación al primer rango de humedad de 13%, son de 25% y 220% para los rangos de humedad de 32% y 40% respectivamente. Si bien el primer aumento de material erodado es inferior a lo presentado en los ensayos de 5 minutos, el segundo aumento es superior. La tendencia de los resultados es lineal con una correlación de 0,82.

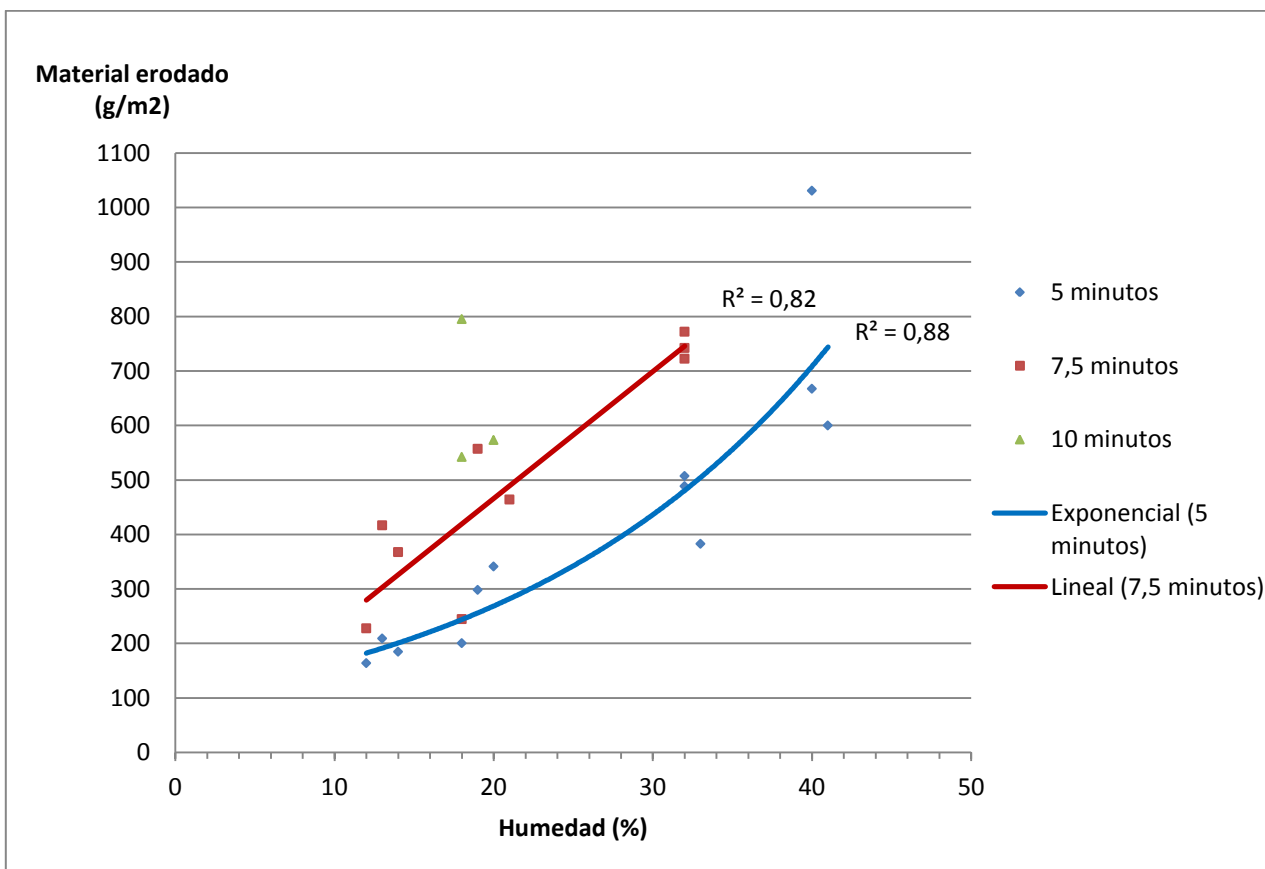


Figura 5: Material erodado para ensayos con distinta duración (Fuente: elaboración propia).

Para el análisis estadístico las primeras muestras a comparar corresponden a los resultados de los ensayos de duración 5 minutos y 7,5 minutos. El test utilizado para este caso corresponde a la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon. Los resultados se aprecian en la tabla 1.

Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon	
Tipo	Material erodado
Comparación	5 min y 7.5 min
T	0
n	9
Tc	6
Resultado H0	Se rechaza

Tabla 1: Resultados prueba para la duración de la lluvia (Fuente: Elaboración propia).

Para el material erodado, los ensayos de 5 minutos y 7,5 minutos no pertenecen a la misma población. Esto demuestra que son estadísticamente distintos.

En la figura 6 se presenta el material erodado para distintos tiempos y humedades iniciales, para los rangos de humedad 13% y 19% la pendiente en el primer tramo son similares (42 y 60 g/m²/min). Esto ocurre por la cercanía de las humedades. En cambio para el rango de humedad de 32% la pendiente es de 97 g/m²/min siendo casi el doble de las anteriores. Analizando el rango de 19% se aprecia que la curva tiene una tendencia lineal con una correlación de 0,63. Por lo tanto su tendencia es la misma que presenta la USLE ante el aumento de tiempo en las precipitaciones.

Maldonado (2010) determinó que la humedad inicial en un suelo aumenta su erosión con tasas de aumento similares, pero sus ensayos fueron válidos sólo para rangos bajos de humedad inicial. Para los rangos cercanos al límite líquido del suelo, la erosión disminuía por la acción de una lámina de agua que amortiguaba los impactos de las gotas y así lograba disminuir su material erodado. En este estudio, no ocurrió de la misma forma debido a que la pendiente de los lisímetros impedía que se formara cualquier lámina de agua, por lo que las precipitaciones que no se infiltraban se transformaban en escorrentía superficial. Esto permitió que para humedades iniciales altas cercanas al límite líquido, la erosión fuera mayor.

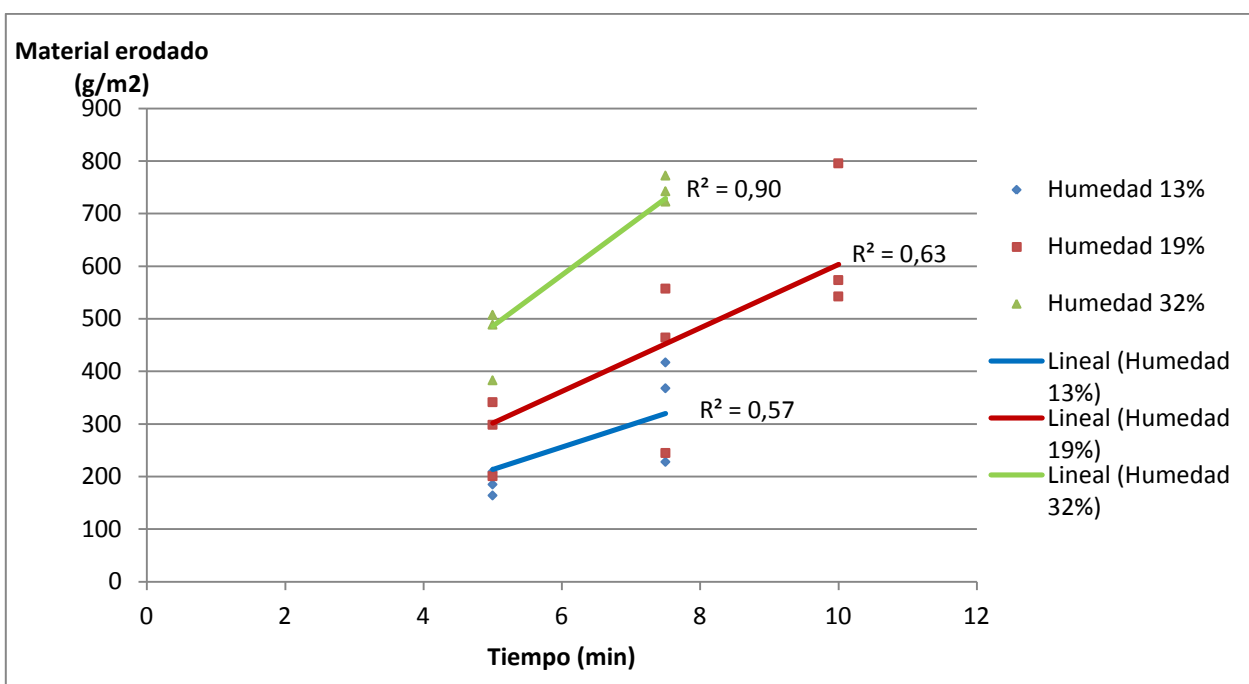


Figura 6: Material erodado para distintas humedades (Fuente: elaboración propia).

4.2 Escorrentía superficial

En la figura 7 se observa que para los ensayos de 5 minutos, la escorrentía superficial aumenta linealmente conforme aumenta la humedad inicial. Su tendencia se asemeja a una recta con pendiente de $0,22 \frac{L}{\% \text{ humedad}}$ y correlación de 0,67. Esta forma de aumento difiere de la vista en la figura 5 de material erodado que presentaba una tendencia exponencial. Esto se debe al bajo tiempo del ensayo ya que la escorrentía superficial requiere de cierta cantidad de tiempo para comenzar (en este caso sólo dependía de la humedad inicial). En el tiempo utilizado (10 minutos) no se alcanzó a observar un gran aumento entre las distintas humedades iniciales.

En los resultados para los ensayos con duración 7,5 minutos, se observa que la tendencia lineal se ajusta de mejor manera (correlación de 0,76). El promedio de escorrentía para un tiempo de 7,5 minutos es de 9,3 litros con un rango de humedad de 32%, la cual es superior al máximo promedio de escorrentía para 5 minutos a pesar tener un rango de humedad inferior. Esto indica que para la escorrentía superficial es más importante la duración de la lluvia que la humedad inicial del terreno.

Se observa que a medida que aumenta humedad inicial, aumenta la erosión y la pendiente de la recta, la que depende principalmente de la duración de los ensayos.

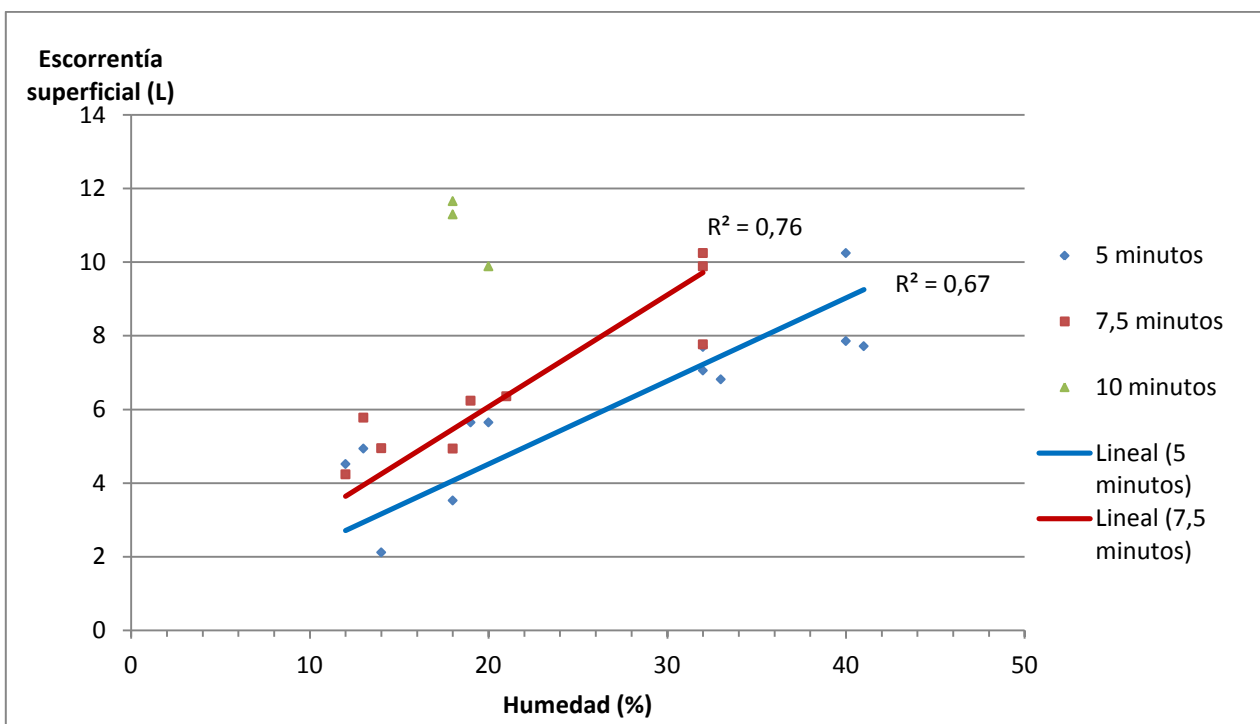


Figura 7: Escorrentía superficial para ensayos con distinta duración (Fuente: elaboración propia).

La figura 8 proporciona la comparación de la escorrentía entre las distintas humedades. Se ve claramente el efecto de la humedad inicial en la escorrentía, registrando un gran aumento entre el rango de 19% y 32%. Esto ocurrió porque al tener una mayor humedad inicial la escorrentía superficial comenzó antes en el rango de 32%, lo que permitió acumular una mayor escorrentía durante el ensayo. En cuanto a la duración de los ensayos se ve el gran aumento para un tiempo de 10 minutos. Lo que ocurre después de los primeros 7,5 minutos es que ya no existe ninguna oposición de parte del suelo para la escorrentía superficial ya que está totalmente saturado y esto genera las condiciones ideales para la escorrentía superficial.

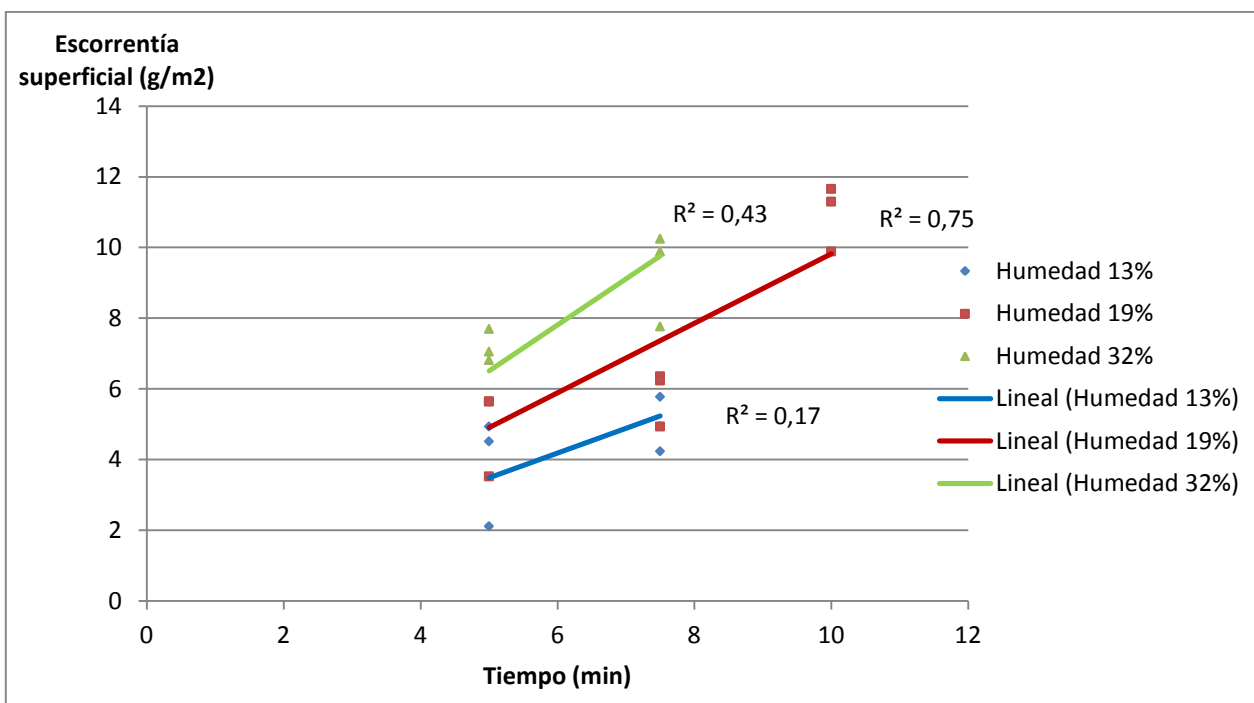


Figura 8: Escorrentía superficial para distintas humedades (Fuente: elaboración propia).

Para el análisis estadístico se utilizó la prueba de los signos, la cual busca demostrar que existen diferencias estadísticas entre los distintos rangos de humedad inicial. Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tipo	Escorrentía superficial		
	Humedad 13% y 19%	Humedad 19% y 32%	Humedad 32% y 40%
Comparación	Humedad 13% y 19%	Humedad 19% y 32%	Humedad 32% y 40%
P/N	0 P y 6 N	0 P y 6 N	0 P y 3 N
Np	6	6	3
μ	3	3	1.5
varianza	1.22	1.22	0.87
z	2.86	2.86	2.31
Resultado H0	Se rechaza	Se rechaza	Se rechaza

Tabla 2: Resultados prueba de los signos para humedad inicial (Fuente: Elaboración propia).

En la tabla 2 se aprecia que la hipótesis H0 se rechaza en todos los casos de escorrentía superficial. Esto sucedió porque durante la prueba todas las comparaciones resultaron con signo negativo. Por lo tanto se demuestra que estadísticamente sí hay diferencias entre los distintos rangos de humedad inicial.

En la tabla 3 se encuentran los porcentajes de las precipitaciones que se transformaron en escorrentía superficial. Se observa que mientras aumenta la humedad inicial un mayor porcentaje de las precipitaciones se transforma en escorrentía. Esto sucede porque a medida que es mayor la humedad inicial menos agua se debe infiltrar en el suelo para la aparición de la escorrentía superficial.

Humedad/tiempo	Humedad 13%	Humedad 19%	Humedad 32%	Humedad 40%
5 minutos	33%	42%	52%	76%
	37%	42%	57%	58%
	16%	26%	50%	57%

Tabla 3: Precipitaciones transformadas en escorrentía superficial (Fuente: Elaboración propia).

Los resultados detallados de cada ensayo se encuentran en el anexo D.

4.3 Densidades

En la figura 9 se muestran los resultados de densidad seca para distintas humedades. Como se observa las densidades promedio oscilan alrededor del 55% de la DMCS, donde el máximo valor es de 66,6% con una humedad de 18% y el menor es 45,6% con una humedad de 41%. Por lo cual se cumple con la metodología planteada que exigía un rango de $\pm 10\%$ alrededor de 55%, en el 99% de los casos.

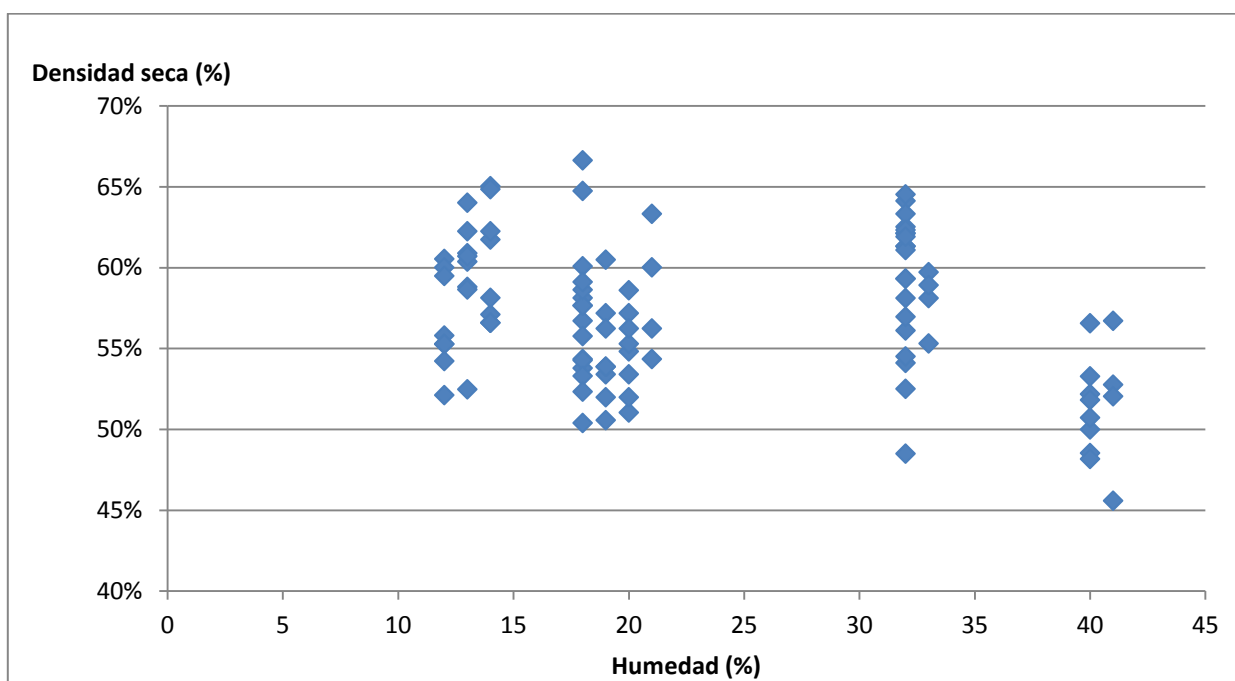


Figura 9: Densidad seca para distintas humedades (Fuente: elaboración propia).

En la tabla 4 se encuentra el análisis estadístico para las compactaciones entre los distintos rangos de humedad. Se puede ver que para las comparaciones entre los rangos más bajos de humedad la hipótesis H0 no se rechaza lo que indica que las muestras provienen de una misma población, lo cual debía cumplirse para mantener las mismas condiciones entre los distintos ensayos. En la comparación entre los rangos de 32% y 40% de humedad inicial, la hipótesis fue rechazada lo que indica que las muestras tienen una diferencia estadística. En la cual la compactación para el último rango de humedad inicial es menor que su antecesor. Esto se explica porque el método de compactación utilizado no es tan eficiente para las humedades altas por lo que no se logró obtener la compactación requerida.

Tipo	Compactación		
Comparación	Humedad 13% y 19%	Humedad 19% y 32%	Humedad 32% y 40%
T	89.5	91	0
n	24	24	12
Tc	81	81	13
Resultado H0	No se rechaza	No se rechaza	Se rechaza

Tabla 4: Prueba de Wilcoxon para densidad con distinta humedad inicial

(Fuente: elaboración propia).

5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La humedad inicial tiene una influencia directa en la erosión hídrica de taludes, el material erodado presenta una tendencia exponencial a medida que aumenta la humedad inicial, obteniéndose aumentos de 0,5; 1,5 y 4 veces la cantidad de material erodado para rangos de 19%, 32% y 40% de humedad inicial respectivamente en comparación a un rango de 13%.

Cuando aumenta la duración de los ensayos la tendencia se transforma en lineal, obteniendo un aumento de 2,2 veces la cantidad de material erodado para un rango de humedad de 32% de humedad en comparación a un rango de 13%, a medida que aumenta la duración de los ensayos para un mismo rango de humedad, la tendencia de aumento de material erodado es lineal, los dos rangos de humedad más baja poseen pendientes de aumento similares de 42 y 60 g/m²/min, en cambio el rango de humedad de 32% presenta una pendiente de aumento de casi el doble en comparación a los otros rangos.

La escorrentía superficial es mayor cuando aumenta la humedad inicial; los aumentos siguen una tendencia lineal. El aumento de la escorrentía es de $0,22 \frac{L}{\% \text{ humedad}}$ para una duración baja de precipitaciones, para una mayor duración el promedio es de $0,30 \frac{L}{\% \text{ humedad}}$. Estos aumentos se explican porque cuando la humedad inicial era mayor la escorrentía superficial comenzaba antes. En cuanto al factor duración de las precipitaciones en la escorrentía superficial, se obtuvo un gran aumento cuando se pasó de un tiempo de 7,5 a 10 minutos, el aumento de la escorrentía fue casi el doble de lo recolectado en los primeros 7,5 minutos. Esto se explica porque la escorrentía requiere saturar el suelo antes de aparecer, por lo que mientras mayor sea el tiempo de los ensayos se obtendrá un mayor aumento de escorrentía hasta que logre su equilibrio.

Finalmente se puede afirmar que mientras mayor sea la escorrentía superficial provocará un aumento del material erodado de un talud.

Como recomendaciones se plantea estudiar un recubrimiento vegetal que se pueda desarrollar con una baja humedad inicial. Incorporar y calibrar un factor que refleje la humedad inicial en el término de erodabilidad (K) de la USLE.

BIBLIOGRAFÍA

- Bascuñán, S. 2010. Relación entre la erosión producida por un flujo superficial en suelos finos y algunas propiedades de estos. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- De la Cruz, I. 2010. Caracterización de la lluvia simulada y su aplicación de parcelas experimentales de erosión en taludes de infraestructuras lineales. Proyecto de título, Ingeniería técnica forestal, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España.
- Espinoza, C. 2012. Validación de una experiencia de laboratorio para determinar la erodabilidad hídrica de un suelo. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Garrido, C. 2011. Comparación de la erosión en taludes a escala con erodabilidad obtenida en laboratorio. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- 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.
- Hudson, N. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. Boletín de suelos N° 68. Food and Agriculture Organization, Roma, Italia.
- López, A. 2012. Análisis de la Erosión en Taludes de baja pendiente tratados con mezcla de Biosólidos, Suelo y Trébol enano. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.

- López, A. 2005. Efecto del gradiente y el aspecto de la pendiente en la erosión hídrica de un suelo del secano interior de la zona central de Chile. Proyecto de título, Ingeniería Agrónoma, Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- Maldonado, R. 2010. Incidencia de la condición inicial en la determinación experimental de la erodabilidad de un suelo. Proyecto de título. Ingeniería Civil. Universidad del Bío-Bío. Concepción. Chile.
- Meyer. L and Harmon W. 1984. Susceptibility of Agricultural Soils to Interrill Erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J. Vol.48 1152-1157.*
- Morgan R.P.C. (1997). Erosión y conservación del suelo. Versión Española Mundi-Prensa. España.
- Norma Chilena NCh 165 of 77. “Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría”
- Norma Chilena NCh 1517/ I. “Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido”
- Norma Chilena NCh 1517/ II of 1979. “Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 2: Determinación del límite plástico”
- Ramírez, S. 2010. Estudio de la relación Lluvia-deslizamiento en la estabilidad de taludes. 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.
- Verdugo, J. 2007. Desarrollo de una metodología para evaluar la susceptibilidad de los taludes de suelo al efecto de la erosión por flujo superficial. Proyecto de título, Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Santiago. Chile.

Anexo A Formas de erosión hídrica.

Existen distintos tipos en las formas de la erosión hídrica, las cuales pueden estar combinadas en terreno, normalmente se presentan en orden creciente en función del daño causado.

a) Erosión laminar o en manto.

Consiste en una remoción de delgadas capas de suelo producidas por el agua que discurre por terrenos uniformes y de poca pendiente, provocando la pérdida de la porción de suelo con mayor contenido en materia orgánica, lo que conduce a un empobrecimiento en elementos nutrientes y a un descenso de la capacidad de almacenamiento de agua (Bascuñán, 2010). Es una forma peligrosa de erosión ya que es casi imperceptible en un comienzo, solo será visible pasado un tiempo y cuando haya aumentado su intensidad, esta erosión favorece la aparición de surcos y posteriormente cárcavas.

b) Erosión en regueros o surcos.

Esta erosión se produce por pequeñas concentraciones de flujo en las líneas de máxima pendiente del terreno, lo cual genera un aumento de la velocidad del agua y como consecuencia un incremento de su potencia erosiva y de arrastre de sedimentos, lo cual forma pequeños canales en forma de U o V, es fácilmente detectable por los mismos como se puede apreciar en la figura 10. No existe ningún límite definido que señale el final de la erosión laminar y el comienzo de la erosión en surcos. Los cuales pueden formarse casi inmediatamente de iniciarse el flujo superficial y pueden ser de un tamaño minúsculo o de un tamaño que permita que se los perciba fácilmente (De la Cruz, 2010).



Figura 10: Formación de surquillos en suelo con pendiente (Fuente: Maldonado 2010).

c) Erosión en cárcavas o barrancos.

Las cárcavas es la máxima expresión del proceso erosivo por el agua, se produce después de la erosión por surcos. Los canales crecen en profundidad y en anchura por erosión de la corriente de agua y de los materiales que ésta arrastre, por la caída de agua en la cabecera de la cárcava, lo que da lugar a una erosión remontante, y por desmoronamiento de las paredes debido a la inestabilidad de la ladera en la que encaja. (Bascañán, 2010). Los efectos que producen las cárcavas se pueden apreciar en la figura 11.



Figura 11: Formación de cárcavas

(Fuente: <http://es.wikipedia.org/>).

Anexo B Mecánica de suelos.

B.1.- Granulometría

Se realizó una granulometría siguiendo lo recomendado por la norma NCh 165 of. 77, los resultados obtenidos se exponen en la tabla 5.

Tamiz	Peso Ret. (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
N° 4	0,00	0,00	0,00	100
N° 10	0,42	0,16	0,16	99,83
N° 20	2,35	0,91	1,07	98,93
N° 40	6,00	2,33	3,40	96,60
N° 60	23,87	9,30	12,70	87,30
N° 200	115,59	45,03	57,73	42,27

Tabla 5: Granulometría (Fuente: Manzo, 2010).

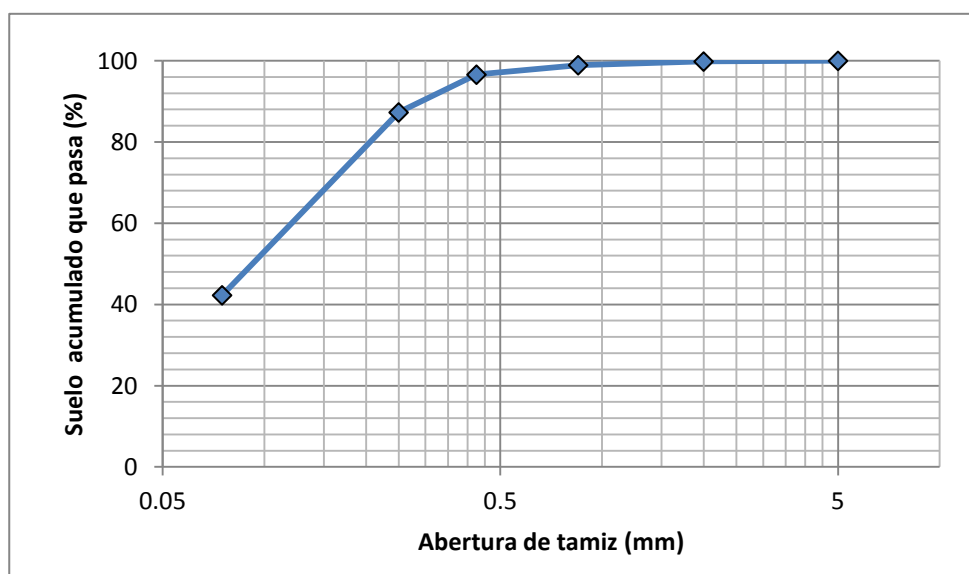


Figura 12: Curva granulométrica suelo. (Fuente: Hernández 2011).

B.2.- Límites de Atterberg

Para encontrar el límite líquido se utilizó la norma NCh 1517/ I of. 1979 y para el límite plástico la NCh 1517/ II of. 1979.

a) Límite líquido.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Cápsula N°	60 J	13 A	13 F
N° de golpes	23	16	31
Peso Cápsula + Suelo Húmedo	30,83	25,03	24,07
Peso Cápsula + Suelo Seco	27,19	21,95	21,31
Peso Cápsula	18,09	14,96	14,31
Peso Agua	3,64	3,08	2,76
Peso Suelo Seco	9,10	6,99	7,00
% Humedad	40,00	44,10	39,40

Tabla 6: Resumen ensayos para límite líquido (Fuente: Hernández, 2011).

B.3.- Proctor modificado

Se realizó un Proctor modificado según de la NCh 1534 of. 1979.

Fracción	Humedad Agregada (%)	Masa molde + Suelo húmedo (g)	Masa molde (g)	Masa suelo húmedo	Volumen molde (cm ³)	Densidad húmeda ρh (g/cm ³)	Densidad seca ρs (g/cm ³)
1	14	3508	1591	1917	946	2,026	1,703
2	12	3528	1591	1937	946	2,048	1,761
3	10	3498	1591	1907	946	2,016	1,763
4	8	3614	1731	1883	946	1,990	1,757
5	6	3395	1591	1804	946	1,907	1,722

Tabla 7: Densidad de moldes según grado de humedad agregada (Fuente: Hernández, 2011).

Cápsula	N° 70	N° 6	N° 60	N° 26	N° 23
Masa húmeda + cápsula (g)	532,46	503,60	548,36	371,66	358,57
Masa seca + cápsula (g)	469,18	452,21	497,09	339,96	334,77
Masa cápsula (g)	136,28	136,93	139,07	101,96	112,57
W humedad final (%)	19,01	16,30	14,32	13,32	10,71

Tabla 8: Determinación de humedades (Fuente: Hernández, 2011).

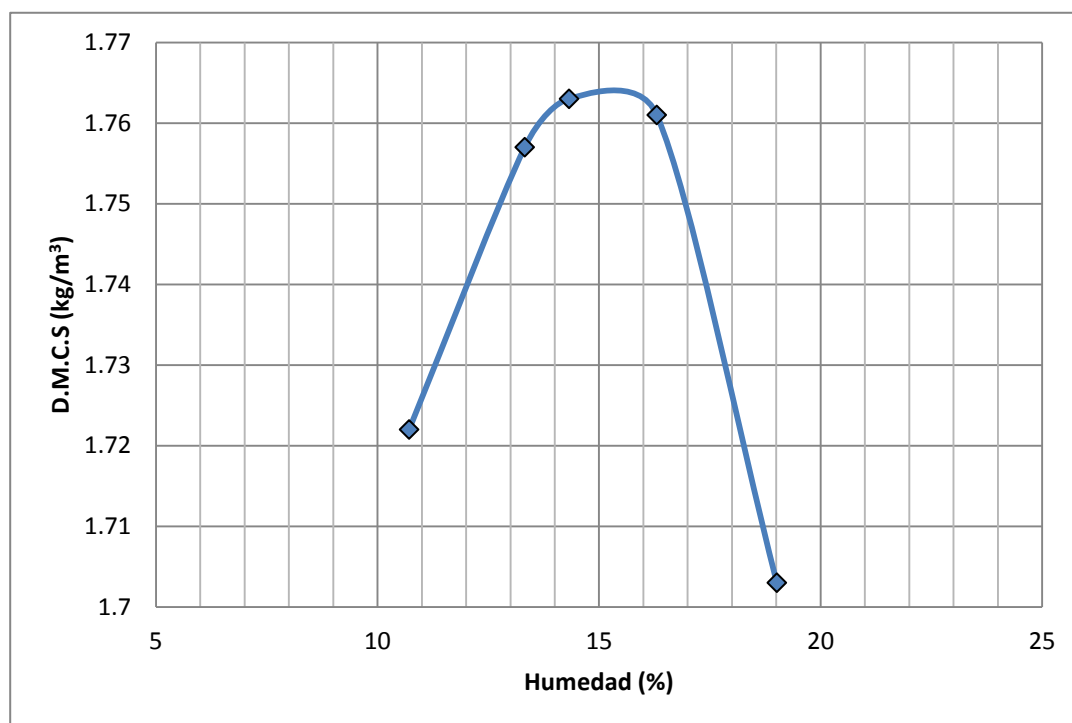


Figura 13: Densidad máxima compactada seca según humedad óptima.

(Fuente: Hernández 2011).

Según la figura 13 se obtiene que la máxima densidad que se puede alcanzar para el suelo analizado es de 1768 kg/m³ con una humedad óptima de 15,2 %.

Anexo C Cálculo de intensidad

C.1 Calibración del sistema de aspersión

Con la finalidad de cuantificar y caracterizar la pluviosidad, se realizó una calibración del sistema empleando el valor de presión utilizado, evaluando la pluviosidad a través de vasos receptores ubicados en un cuadrículado de 18,5 x 17,5 cm, cubriendo una superficie de 1 m² para cada prueba.

El procedimiento fue el mismo utilizado por Hernández (2011) como se ilustra en la figura 14.



Figura 14: Calibración: a) Trazado de grilla y excavación para apoyo de vasos, b) Colocación de vasos de acuerdo serie 1-2-3 (superior), 4-5-6 (medio) y 7-8-9 (inferior), c) Aplicación de la lluvia, d) Recolección del volumen precipitado, e) Medición del volumen almacenado.

(Fuente: Hernández 2011).

La pluviosidad se caracterizó a través de los coeficientes señalados a continuación.

C.1.1 Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CU)

El Coeficiente de Uniformidad fue desarrollado por Christiansen (1942). Es una representación estadística de la uniformidad, utilizado principalmente en los sistemas de aspersión; es el parámetro de uniformidad de uso más generalizado. En sistemas de riego por aspersión

estacionario se recomiendan valores de CU mayores al 80% (aunque depende de la velocidad del viento (Tarjuelo 1995, Tarjuelo et al 1992). Se expresa en % mediante la expresión siguiente:

$$CU = 100 \left(1 - \frac{\sum |x - \bar{x}|}{\sum x} \right)$$

Donde:

x = altura de agua recogida por cada pluviómetro.

\bar{x} = altura media de agua recogida en el total de los pluviómetros.

C.1.2 Coeficiente de Variación (CV)

Es el cociente entre la desviación estándar y la media aritmética, muestra para bajos valores una alta concentración de los datos. Su expresión es dada por

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}}$$

Donde, \bar{x} y S_x son la media y la desviación estándar, respectivamente, para una misma población.

En ocasiones se suele presentar la información mediante el por ciento, sobre todo al momento de comparar dos muestras, por lo que el coeficiente suele presentarse como:

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}} \times 100$$

Su utilidad radica en que podemos determinar la variabilidad existe entre dos muestra en las que inclusive la información no tienen las mismas unidades.

C.2 Resultados obtenidos

Los resultados se presentan en las tablas, considerando tres repeticiones con una presión de 0,5 bar.

Ensayos 5 min					Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
	Intensidad (mm/hr)						
Vaso n°	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	CU	63.9	61.3	61.5
1	250.6	163.4	260.9	CV	0.45	0.47	0.43
2	137.6	285.3	243.7				
3	269.5	127.6	127.3				
4	164.0	110.7	207.6				
5	184.1	208.2	240.3				
6	71.7	246.0	122.1				
7	114.7	104.4	98.9				
8	217.9	92.9	111.2				
9	65.9	77.4	83.1				

Tabla 9: Medición de altura precipitada (Fuente: Elaboración propia).

Finalmente se obtuvo la intensidad de lluvia la cual se muestra en la tabla 8.

	Intensidad (mm/hr)		
	164.0	157.3	166.1
Promedio	162.5		

Tabla 10: Precipitación final (Fuente: Elaboración propia).

Anexo D resultados

En las tablas 11 al 14 se encuentran los resultados de todos los ensayos realizados, contienen la información de humedad, duración, material erodado y escorrentía superficial.

Ensayo n°	1	2	3	4	5	6
Humedad (%)	18	21	18	19	20	20
Duración (min)	7,5	7,5	5	5	10	5
Material erodado (g/m2)	245	464,46	200,9	298,6	573,7	341,6
Escorrentía superficial (L)	4,94	6,36	3,53	5,65	9,89	5,65

Tabla 11: Resultados de ensayos 1 a 6. (Fuente: elaboración propia.)

Ensayo n°	7	8	9	10	11	12
Humedad (%)	19	33	18	18	32	32
Duración (min)	7,5	5	10	10	7,5	7,5
Material erodado (g/m2)	557,5	383,16	542,6	795,64	742,6	722,9
Escorrentía superficial (L)	6,24	6,72	11,3	11,66	9,89	10,25

Tabla 12: Resultados de ensayos 7 a 12. (Fuente: elaboración propia.)

Ensayo n°	13	14	15	16	17	18
Humedad (%)	32	41	32	32	14	14
Duración (min)	5	5	5	7,5	5	7,5
Material erodado (g/m2)	488,98	600,36	507,6	772,4	185,16	368
Escorrentía superficial (L)	7,06	7,72	7,7	7,77	2,12	4,95

Tabla 13: Resultados de ensayos 12 a 18. (Fuente: elaboración propia.)

Ensayo n°	19	20	21	22	23	24
Humedad (%)	13	12	13	12	40	40
Duración (min)	7,5	7,5	5	5	5	5
Material erodado (g/m2)	417,16	228,1	209,46	164,24	667,72	1031,2
Escorrentía superficial (L)	5,78	4,24	4,94	4,52	7,86	10,25

Tabla 14: Resultados de ensayos 19 a 24. (Fuente: elaboración propia.)